

AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

"Wasserzerstäubung in Mehrzweckstrahlrohren"

7

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

Karlsruhe
Dezember 1965

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. STRÖMUNGSVORGÄNGE IM STRAHLROHR	2
2.1. Vollstrahl	2
2.2. Sprühstrahl	2
3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR BERECHNUNG DES ZERSTÄUBUNGSVORGANGES	4
3.1. Zusammenhang zwischen Rückdruck und Zer- stäubung. Größter in einem Gemisch auf- tetender Tropfen	7
3.2. Tropfenverteilung in einem Gemisch	12
3.3. Mittlerer Tropfendurchmesser	13
3.4. Strahlwinkel in Abhängigkeit vom Drall	14
4. DISKUSSION DER THEORETISCHEN ÜBERLEGUNGEN	17
4.1. Einfluß von Rückdruck und Wasserdurchfluß sowie der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit auf die Zerstäubung	18
4.2. Parameter β in Abhängigkeit von der Tropfen- verteilung in einem Gemisch	19
4.3. Beeinflussung des mittleren Tropfendurchmes- sers durch den Parameter β	20
4.4. Zusammenhang zwischen Strahlwinkel und Zerstäubung	22
5. VERGLEICH DER THEORETISCHEN ERKENNTNISSE MIT VERSUCHSERGEBNISSEN AN MEHRZWECKSTRAHLROHREN.	24
6. ZUSAMMENFASSUNG	32
7. ANHANG: MESSVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG VON WURFBILDERN FÜR MEHRZWECKSTRAHLROHRE	34
8. LITERATURVERZEICHNIS	39
9. BILDER	43

FORMELZEICHEN

a_1, a_2	Konstanten
A	Zerstäubungsenergie
b	Größe, definiert durch Gleichung (19)
C	Konstante
d	Durchmesser
d_m	Mittlerer Durchmesser nach Gleichung (29)
d_{max}	Tropfen mit dem größten Durchmesser in einem Gemisch
d_{red}	Reduzierter Durchmesser nach Gleichung (21)
E	Energiebetrag
F	Fläche
g	Gravitationskonstante
G	Gewicht
H	Druckhöhe
i	Anzahl der Tropfen
k	Konstante
m	Masse
Mu	Flüssigkeitsleistung pro Umfangseinheit
n	Drehzahl
p	Druck
Q	Durchflußmenge
r, R	Radius
Rü	Rückdruck
U	Umfangsgeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit
W	Ideale Axialgeschwindigkeit nach Gleichung (33)
x	$= d/d_{max}$

- α Größe, definiert durch Gleichung (28) bzw. Strahlwinkel
 β Durchflußzahl bzw. Parameter
 γ Spezifisches Gewicht bzw. Steigung der Leitvorrichtung
des Zerstäuberorgans
 ζ Größe definiert durch Gleichung (22)
 η Dynamische Zähigkeit
 ρ Dichte
 σ Oberflächenspannung

Als Indices bedeuten :

- a axial
D Düse
F Flüssigkeit
i innen
L Luft
t tangential

1,2,...n An der Stelle 1,2n

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. Dazu werden im wesentlichen folgende Schritte gegangen:

- 1.) Aus Ähnlichkeitüberlegungen wird zur Beurteilung eines Tropfengemisches zunächst ein Tropfen mit einem größten Durchmesser d_{\max} errechnet.
- 2.) Nach der statistischen Wahrscheinlichkeit der Tropfenverteilung kann mit dem ermittelten Durchmesser d_{\max} und einem für gewisse Zerstäubertypen empirisch zu ermittelnden Parameter die Tropfenverteilung in einem Gemisch bestimmt werden.

- 3.) Zur Charakterisierung eines Tropfengemisches wird ein mittlerer Durchmesser d_m definiert und mit den vorge-nannten Kennzahlen aus einer einfachen Gleichung hergeleitet.
- 4.) Die Beeinflussung des Strahlwinkels durch den Drall :
Der Drall in Abhängigkeit von den konstruktiven Einzel-
heiten der Versprüheinrichtung, und der Strahlwinkel als
Beurteilungsmaß für die Tropfenverteilung in einem Gemisch.

Die Arbeit gliedert sich in fünf Hauptgebiete :

- a) Betrachtung der Strömungsvorgänge im Rohr
- b) Theoretische Betrachtungen zur Zerstäubung
- c) Diskussion der theoretischen Überlegungen
- d) Vergleich der theoretischen Erkenntnisse mit Versuchsergebnissen.

2. STRÖMUNGSVORGÄNGE IM STRAHLROHR

2.1. Vollstrahl

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. Dieser Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen war Gegenstand zahlreicher theoretischer und experimenteller Arbeiten [1,2,3, 4,5,6,] . Zur Erreichung einer möglichst großen Wurfweite sollte der Wasserstrahl lange geschlossen zusammen bleiben, um über große Entfernung Wasser an die Brandstelle zu bringen.

2.2. Sprühstrahl

Beim Sprühstrahl wird eine Aufteilung des Wasserstrahles zur Verbesserung der Löschwirkung bewußt unter Inkaufnahme einer geringeren Wurfweite angestrebt. Auch über diese Art der Zer-

stäubung gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen[7, 8, 10 bis 24] . Die erarbeiteten Resultate und die daraus abgeleiteten Ansichten sind jedoch widerspruchsvoll. Es dürfte für die Schwierigkeit dieses Problems sprechen, daß bis heute nicht einmal das den Zerstäubungsvorgang beschreibende Differentialgleichungssystem bekannt wurde. Die theoretische Lösung dieses Problems muß noch gefunden werden. Der Zerstäubungsvorgang spielt sich in so kurzer Zeit ab, daß er nur durch die Hochfrequenzkinematografie erfaßt werden kann. Praktische Versuche stehen deshalb ebenfalls vor großen Schwierigkeiten.

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-Richtungen 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.

Betrachtet man den Lauf eines einzelnen Wasserteilchens nach dem Verlassen der Leitvorrichtungen im Schaltorgan, so beschreibt dieses eine Bahn ähnlich der Steigung einer Schraubenlinie. Auf eine zur Strahlrohrachse parallelen Wand projiziert ergibt dies einen sinusförmigen Kurvenverlauf mit der Amplitude des inneren Rohrhalbmessers für die an der Wand entlang gleitenden Teilchen. Infolge der Geschwindigkeitssteigerung in Achsrichtung verändert sich die Frequenz bei gleichbleibender Amplitude.

3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR BERECHNUNG DES ZERSTÄUBUNGS- VORGANGES

Für die theoretische Berechnung der Strömungsverhältnisse in einer Dralldrüse 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 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.

Edeling [7] hat für die für die Zerstäubung aufzubringende Energie erstmals folgenden Ansatz aufgestellt :

$$A = \frac{\sigma \cdot 6}{d} \cdot \left[\frac{\text{m.kp}}{\text{Liter}} \right] \quad (2)$$

Die Oberflächenspannung σ soll in kp/m und der Tropfendurchmesser d in mm eingesetzt werden. Setzt man diese Arbeit in Beziehung zu der vorhandenen Energie E des Wassers :

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} = G \cdot H, \quad (3)$$

(m und G sind die Masse bzw. das Gewicht der Flüssigkeit, H ist die Druckhöhe), so beträgt diese bei einem angenommenen Durchmesser $d = 0,35$ mm, der sich bei früheren Untersuchungen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik als löschgünstig ergeben hat, einer Oberflächenspannung $\sigma = 7,25 \cdot 10^{-3}$ kp/m und einem Druck vor der Düse von 50 m WS nur 0,24 % der Gesamtenergie.

Bei der theoretischen Behandlung des Stömungsvorganges in dem Strahlrohr gilt neben der Bernoulli-Gleichung (1) der Drallsatz für die drehungsfreie Kreisbewegung :

$$\frac{\partial v_t}{\partial r} + \frac{v_t}{r} = 0. \quad (4)$$

mit v_t als Geschwindigkeit in tangentialer Richtung und r als Radius. Aus Gleichung (4) folgt, daß

$$v_t \cdot r = \text{const} \quad (5)$$

sein muß. Der Drall bleibt in dem gesamten Strahlrohr unter der Annahme der Reibungsfreiheit konstant. Ist R_1 der Abstand der exzentrischen Einströmung von der Mittelachse und v_{t1} die zugehörige Tangentialgeschwindigkeit, so kann man unter Einhaltung der Bedingung (5) schreiben :

$$v_{t1} \cdot R_1 = v_t \cdot r. \quad (5a)$$

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. Nach Sänger [9] kann evtl. ein leichter Druck vorhanden sein, der aus der Ejektorwirkung herrührt. Söhngen und Grigull [23] berichten, daß der Hohlraum u.U. auch mit Flüssigkeit ausgefüllt sein kann, die jedoch wenig oder gar nicht am Durchfluß teilnimmt und wie ein starrer Körper rotiert. Aus dieser Bedingung folgt, daß sich bei Drallzerstäubung Hohlstrahlen ausbilden.

Weiterhin gilt die Kontinuitätsbedingung :

$$Q = F \cdot v_a = \int_{r_i}^R v_a \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (6)$$

Hierin ist Q die Durchflußmenge, F die Fläche im Strahlrohr mit v_a als der zugehörigen Axialgeschwindigkeit, R der Radius der Düse und r_i der Radius des in der Düse rotationssymmetrisch freien Wasserraumes. Die durchströmende Wassermenge kann weiterhin aus der Bernoulli-Gleichung (1) abgeleitet werden :

$$Q = \beta \cdot F_D \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (7)$$

mit $H = \Delta p / \rho$, dem Wasserdruck vor der Düse, in m WS (F_D ist die Fläche des Dusenquerschnittes, Δp der Druck in kp/m^2 und ρ die Dichte des Wassers). Die Durchfluzahl β berücksichtigt die Differenz zwischen der tatsächlichen Durchflußmenge und der theoretisch möglichen Menge, die bei verlustloser Energieumsetzung und ohne Strahlkontraktion durchströmen würde. In ihr ist auch der wasserfreie Teil in der Mitte der Dusenflache berücksichtigt.

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

$$\rho \cdot F_D \cdot v_a^2 = \text{const} \quad , \quad (8)$$

wenn die betrachteten Ebenen senkrecht zur Mittelachse des Förderstromes liegen. Mit ihm läst sich die Reaktionskraft der ausströmenden Flüssigkeit (allgemein als Rückdruck bezeichnet) leicht berechnen :

$$R_u = \rho \cdot \pi \cdot (R^2 - r_i^2) v_a^2 \quad (9)$$

Der flüssigkeitsfreie Querschnitt in der Achsenmitte der Düse läßt sich mit folgender Lösung des Integrals in Gleichung (6) :

$$Q = \int_{r_i}^R v_a \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = v_a \cdot \pi (R^2 - r_i^2) \quad (6a)$$

und der Gleichung (9) berechnen, Wird die Geschwindigkeit v_a eliminiert, so erhält man folgende Gleichung für r_i :

$$r_i^4 + \left(\frac{Rü \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2 - Q^2 \cdot \rho}{\pi \cdot RÜ} \right) r_i^2 + \left(\frac{Q^2 \cdot \rho \cdot R^2 - Rü \cdot \pi \cdot R^4}{\pi \cdot RÜ} \right) = 0 \quad (10)$$

mit der Lösung :

$$r_i^2 = \frac{Rü \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2 - Q^2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot RÜ} \pm \frac{Q^2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot RÜ} \quad (11)$$

Dieses Gleichungssystem 4. Grades besitzt 4 Lösungsmöglichkeiten. Die 1. und 2. Lösung sind trivial :

$$r_{i, 1, 2} = \pm R \quad (12)$$

Dies bedeutet, daß kein Wasser mehr aus der Düse austritt. Es verbleiben damit als 3. und 4. Möglichkeit :

$$r_{i, 3, 4} = \frac{Rü \cdot \pi \cdot R^2 - Q^2 \cdot \rho}{\pi \cdot RÜ} = R^2 - \frac{Q^2 \cdot \rho}{\pi \cdot RÜ} \quad (13)$$

Nur der positive Wert der Lösung kommt als innerer Durchmesser für den austretenden Wasserstrahl in Frage.

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

3.1. Zusammenhang zwischen Rückdruck und Zerstäubung. Größter in einem Gemisch auftretender Tropfen

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.

Bei der Zerstäubung von Flüssigkeiten, auch im Feuerlöschdienst, wird die Güte des Sprühstrahles nach der Größe der vorhandenen Tropfen beurteilt. Im allgemeinen wird eine Aufteilung in möglichst viele kleine Tropfen angestrebt. Die Bedingungen für den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles sind erstmals von Haenlein [8] erforscht worden. Er konnte nachweisen, daß die Zerstäubung sowohl von der Strahlgeschwindigkeit als auch von Ähnlichkeitsbedingungen abhängig ist.

Über die Größe der entstehenden Tropfen wurde noch nichts ausgesagt. Dies ist jedoch von besonderer Bedeutung. Eine rechnerisch analytische Klärung dieser Frage 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.

Triebnigg berechnete für Druckzerstäuber den Tropfendurchmesser mit Hilfe einiger Annahmen über die Oberflächenarbeit und die Luftreibung am Strahlrand. Die Relativgeschwindigkeit v zwischen Strahl und Luft sowie die Luftdichte ρ_L erscheinen als wesentliche Einflußgrößen :

$$d_{Tr} = k \cdot \frac{\sigma}{\rho_L \cdot v} \quad (14)$$

Da bei dieser Formel die Zähigkeit der Flüssigkeit und der Luft

sowie die Vorgänge in der Grenzschicht unberücksichtigt bleiben, ist eine allgemeine Gültigkeit dieser Gleichung nicht zu erwarten. Sänger [9] stellte eine ähnliche Funktion auf, bei der die Konstante einen kleineren Wert hat.

Für rotierende Scheiben erarbeitete Bär [11] folgende Beziehung:

$$d_{\max} = \frac{c}{n} \cdot \left(\frac{\sigma}{r \cdot \rho_F} \right)^{0.5} \quad (15)$$

Friedmann et.al. [12] fanden, daß die Zähigkeit der zerstäubten Flüssigkeit in den genannten Formeln nicht ausreichend berücksichtigt wurde und verbesserten die Gleichung zu folgender Beziehung :

$$\frac{d}{r} = 0.4 \left(\frac{\eta}{\text{Mu}} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{\text{Mu}}{\rho_F \cdot n \cdot r^2} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\sigma \cdot \rho_F \cdot U}{\text{Mu}^2} \right)^{0.1} \quad (16)$$

In einer neueren Arbeit befaßt sich Troesch [10] eingehend mit diesen Problemen. Aufgrund 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
2. und 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. Troesch hat die Einflusgroen für den größten Tropfendurchmesser in einer Potenzfunktion zusammengefaßt, die in der endgültigen Form lautet :

$$\left(\frac{\sigma}{\rho_F \cdot v^2 \cdot d_{\max}} \right) \cdot \left(1 - a_1 \frac{\eta_F^2}{\sigma \cdot \rho_F \cdot d_{\max}} \right)^{1/12} \cdot \left(1 - a_2 \frac{\rho_L}{\rho_F} \right) = k \quad (17)$$

Die Konstanten k , a_1 und a_2 sowie die Stoffwerte müssen zu Beginn der Tropfenauflosung bekannt sein. Nach den Angaben von

Troesch sind diese nur für einige Zerstäubertypen mit Sicherheit zu ermitteln, z. B. für rotierende Druckzerstäuber; für Dralldüsen ist das nicht zutreffend. Außerdem wird aufgrund von Erfahrungen des Verfassers die Konstruktion der Versprüh-einrichtung in dieser Gleichung zu wenig berücksichtigt [13]. Bei den Mehrzweckstrahlrohren der Feuerwehren wird die Tropfen-größe wesentlich durch die Versprüheinrichtung bestimmt, weniger durch die physikalischen Eigenschaften der " Flüssigkeiten " [14], da einzig und allein Wasser verspritzt wird.

Gebhardt [15] hat diese Tatsache ebenfalls erkannt und versucht, 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. Da bei der Zerstäubung die Trägheitskräfte der Wassertropfen als auch die Oberflächenkräfte eine bedeutende Rolle spielen, ist es nahe-liegend, das Weber'sche Ähnlichkeitsgesetz zur Berechnung eines charakteristischen Tropfens heranzuziehen. Die Weberzahl ist das Verhältnis von Trägheits- zu Oberflächenkräften :

$$We \sim \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Oberflächenkräfte}} = \frac{\rho \cdot d^2 \cdot v^2}{\sigma \cdot d} \quad (18)$$

Um den Drall in der Flüssigkeitsströmung erfassen zu können, führte Gebhardt als charakteristische Größe den inneren Radius r_i des Hohlstrahles in der Mündung durch die Beziehung

$$b = \frac{r_i^2}{R^2} \quad (19)$$

ein und erhielt damit die Weberzahl unter Berücksichtigung von $v^2 = \Delta p / \rho$ in der Form :

$$We = \frac{R \cdot \Delta p \cdot \sqrt{b}}{\sigma} \quad (20)$$

Die Weberzahl wird umso größer, je stärker unter sonst gleichen Bedingungen der Drall ist.

Die physikalischen Werte der Flüssigkeit beeinflussen die Zer-stäubung ebenfalls. Um sie berücksichtigen zu können, wurde von Gebhardt ein reduzierter Durchmesser

$$d_{\text{red}} = \frac{d_{\text{max}}}{R \cdot \zeta} \quad (21)$$

eingeführt. In dieser Gleichung bedeutet ζ die von Weber aufgestellte Gesetzmäßigkeit

$$\zeta = \left(\frac{\eta^2 \cdot 10^6}{\sigma \cdot \rho \cdot 2 \cdot R} \right)^n \quad (22)$$

Für Drallzerstäuber hat sich nach Gebhardt der Exponent zu $n = 1/9$ ergeben. Aus umfangreichen Untersuchungsergebnissen wurde für die Abhängigkeit des reduzierten Durchmessers d_{red} von der Weberzahl folgende Beziehung abgeleitet :

$$d_{\text{red}} = \frac{3,72}{0,33 \cdot \text{We}} \quad (23)$$

Setzt man Gleichungen (20), (22) und (23) in (21) ein, so erhält man zur Berechnung des größten Tropfendurchmessers die Beziehung :

$$d_{\text{max}} = \frac{3,72 \cdot R^{0,56} \cdot A^{0,11}}{0,33 \cdot \left(\frac{\sqrt{b} \cdot \Delta p}{\sigma} \right)} \quad (24)$$

mit

$$A = \frac{10^6 \cdot \eta^2}{2 \cdot \sigma \cdot \rho} \quad (25)$$

In dieser Gleichung stecken nicht nur die physikalischen Eigenschaften der zu zerstäubenden Flüssigkeiten, sondern durch den Ausdruck (19) $b = r_i^2 / R^2$ auch die Konstruktion der Versprüheinrichtung. Je stärker der Drall in der Strömung ist, umso größer wird der innere Durchmesser r_i . Andererseits wird dadurch der maximale Tropfendurchmesser d_{max} umso kleiner.

Durch diese Überlegungen ist es gelungen, aus dem Wasserdurchfluß Q und dem Rückdruck $R_{\text{ü}}$ an der Düse ohne sonstige Versuchswerte den größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfen zu bestimm-

men, wenn die physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit und der Durchmesser R der Düsenmündung bekannt sind.

3.2. Tropfenverteilung in einem Gemisch

Troesch hat mit seiner Arbeit [10] die Möglichkeit geschaffen, aus dem größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfen die Verteilung aller weiteren hinsichtlich ihrer Durchmessergröße zu bestimmen. Seine Untersuchungen haben ergeben, daß gewisse Zerstäubertypen einer theoretisch empirischen Behandlung zugänglich sind.

Die Ausflußgeschwindigkeit v der Flüssigkeit legt bei sonst gleichen Bedingungen den größten Tropfen bei einer Versprühung fest. Die Verteilung der übrigen Tropfen wird durch die Ausströmgeschwindigkeit nicht erheblich beeinflusst. Im Endzustand wird sich beim Auszählen vieler einzelner Tropfen ein Gemisch bilden, bei dem sich einige extrem große und einige extrem kleine Tropfen einstellen. Zwischen diesen Durchmessern als äußerster Begrenzungsbereich gibt es viele Möglichkeiten der Verteilung.

Troesch hat die Verteilung der Tropfen 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 losgelösten 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 :

$$\frac{dn/n_0}{dx} = \frac{e^{-B/x}/x^3}{\int_0^1 e^{-B/x} \cdot dx/x^3} \quad (26)$$

Die Integration ergibt die dazugehörige Funktion der Summenkurve, wie folgt :

$$\frac{n}{n_0} = \frac{e^{-\alpha} (1+\alpha)}{e^{-\beta} (1+\beta)} \quad (27)$$

mit

$$\alpha = \frac{\beta}{x} \quad \text{und} \quad x = \frac{d}{d_{\max}} \quad (28)$$

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 (siehe nachfolgende Abschnitte).

3.3. Mittlerer Tropfendurchmesser

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 [16] 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 das aus dem Tropfen einheitlicher Größe bestehende Ersatzgemisch dasselbe Verhältnis von Volumen und Oberfläche aufweisen soll wie das zu definierende Gemisch.

$$d_m = \frac{\sum i_n d_n^3}{\sum i_n d_n^2} = \frac{\int_0^{d_{\max}} d^3 dn}{\int_0^{d_{\max}} d^2 dn} = d_{\max} \frac{\int_0^1 x^3 dn}{\int_0^1 x^2 dn} \quad (29)$$

Diese Definition erscheint für die Sprühstrahlen in der Feuerlöschtechnik günstig, weil einerseits die zugeführte Wassermenge und andererseits die Tropfenoberfläche berücksichtigt werden. Herterich [16] hat diesen Ansatz erstmals für das Löschwesen eingeführt.

Setzt man für dn den Wert aus Gleichung (26) in Gleichung (29) ein und integriert, so ergibt sich der mittlere Tropfendurch-

messer zu :

$$d_m = d_{\max} \cdot \beta \cdot \left(\frac{-e^{-\beta}}{\beta \cdot \text{Ei}(-\beta)} - 1 \right) \quad (30)$$

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 aufgrund 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.

3.4. Strahlwinkel in Abhängigkeit vom Drall

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 aufgestellt werden.

Söhnngen und Grigull [23] sowie Sänger [9] haben Gleichungen entwickelt, mit denen sich die Strahlwinkel berechnen lassen. Die theoretischen Überlegungen wurden für Brennstoffdüsen angestellt, allerdings unter der Voraussetzung, daß die in die Dralldüse eintretende Flüssigkeit senkrecht zur Düsenachse einströmt. Diese Voraussetzung ist bei den Mehrzweckstrahlrohren der Feuerwehren nicht gegeben, so daß andere Wege zur Lösung beschritten

werden müssen.

Die Überlegungen von Sänger [9] gingen vom Kraftgleichgewicht an den Flüssigkeitsteilchen aus. Um zu lösbaren Gleichungen zu kommen, mußten Vereinfachungen und verschiedene Substitutionen vorgenommen werden, die schließlich nur zu einer impliziten Bestimmungsgleichung führten. Dieser Weg bringe bei Mehrzweckstrahlrohren kein befriedigendes Ergebnis.

Bei den weiteren Betrachtungen soll deshalb von der Grundidee von Söhngen und Grigull[23] ausgegangen werden, daß der Strahlwinkel α aus der Umfangsgeschwindigkeit U des am Düsenrand austretenden Wassers und der Axialgeschwindigkeit v_a gebildet werden kann:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{v_a} \quad (31)$$

Beide vorgenannten Verfasser konnten zunächst mit Hilfe der Bernoullischen Gleichung (1) und des Drallsatzes (5) nachweisen, daß die äußere Strahlkontur eine Hyperbel mit den Halbachsen v_a , R/U und R (Dusenhalbmesser) ist (Bild 1).

$$\frac{y^2}{R^2} - \frac{x^2}{v_a^2 \cdot R^2 / U^2} = 1 \quad (32)$$

Der gesamte Sprühstrahl bildet um die Düsenachse ein rotations-symmetrisches Hyperboloid.

Zur Bestimmung des Strahlwinkels α nach Gleichung (31) bzw. Bild 1 werden einige Annahmen getroffen. Eine ideale Axialgeschwindigkeit W ergibt sich aus dem Durchflußvolumen Q bei völliger Erfüllung des Dusenquerschnittes:

$$W = \frac{Q}{\pi \cdot R^2} \quad (33)$$

Die effektive Austrittsgeschwindigkeit

$$v_a = \frac{Q}{\pi \cdot (R^2 - r_i^2)} \quad (34)$$

steht mit der idealen Axialgeschwindigkeit in folgender Beziehung:

$$v_a = \frac{W}{(1-b)} \quad (35)$$

mit b nach Gleichung (19) zu $b = r_i^2 / R^2$. Setzt man Gleichung (35) in Gleichung (31) ein, so erhält man für die Neigung der Asymptoten gegen die Strahlachse folgenden Ausdruck :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{W} \cdot (1-b) \quad (36)$$

Beim Verlassen der Düse sollen die inneren Flüssigkeitsteilchen ebenfalls auf den Halbmesser der Düsenbohrung rücken. Sie erhalten mit Gleichung (5) deshalb den Drall

$$U \cdot R = U_1 \cdot R_1 \quad (37)$$

Mit U als der Umfangsgeschwindigkeit an der Eintrittsstelle in der Düse und dem Abstand R_1 als exzentrische Einströmung. Bei Gültigkeit des Drallsatzes kann man die Umfangsgeschwindigkeit U auf dem Halbmesser R durch folgende Überlegung ausdrücken :

$$U = \frac{Q \cdot R_1}{F_1 \cdot R} \cdot \cos \gamma \quad (38)$$

F_1 ist der Gesamtquerschnitt der Drallbohrungen und der Winkel γ die Steigerung der Schraubenlinie der Wasserströmung.

Setzt man Gleichung (33) und Gleichung (38) in Gleichung (36) ein, so erhält man folgende Beziehung für den Strahlwinkel :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R \cdot R_1 \cdot \pi \cdot \cos \gamma}{F_1} (1-b) \quad (39)$$

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 :

$$r_i^2 = R^2 - \frac{R \cdot F_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi \cdot R_1 \cdot \cos \gamma} \quad (40)$$

Man hat damit eine weitere Möglichkeit geschaffen, den Tropfen mit dem größten Durchmesser d_{\max} in einem Gemisch nach Gleichung (24) 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 (13) erforderlich waren. Die Werte für R , R_1 , F_1 und γ sind bauartmäßig festgelegt.

Damit ist auch dem Konstrukteur die Möglichkeit gegeben, durch konstruktive Veränderungen an Düsentteilen die gewünschten Eigenschaften der Zerstäubung zu erreichen. Die Steigung γ der Leitvorrichtungen, die Exzentrizität der Flüssigkeitseinströmung R_1 und der Gesamtquerschnitt der Drallbohrungen F_1 sind bei vorgegebener Düsenbohrung R die Einflußfaktoren.

4. DISKUSSION DER THEORETISCHEN ÜBERLEGUNGEN

Die bisherigen theoretischen Überlegungen sollen nunmehr an Hand von Diagrammen näher erläutert und diskutiert werden.

4.1 Einfluß von Rückdruck und Wasserdurchfluß sowie der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit auf die Zerstäubung

Mit Gleichung (13) kann nach Messung des Rückdruckes $Rü$ und des Wasserdurchflusses Q an einem Mehrzweckstrahlrohr der rotations-symmetrisch wasserfreie Querschnitt in der Achsmittle errechnet werden, der durch den Radius r_i gekennzeichnet wird. Zum Beispiel kann für ein Mehrzweckstrahlrohr mit einer Düsenweite von 8 mm ($R = 4$ mm) r_i aus dem linken Diagramm des Nomogramms in Bild 2 entnommen werden. Die Dichte in Gleichung (13) ändert sich bei den in Feuerwehreinsätzen üblichen Wassertemperaturen von 0 bis 30°C nur geringfügig und beeinflusst den Wert r_i in den genannten Temperaturbereichen deshalb nicht. Die Kurvenscharen lassen jedoch erkennen, daß r_i sehr stark von einer genauen Ermittlung des Rückdruckes und des Wasserflusses abhängt. Schon geringe Abweichungen in den Meßwerten verändern r_i stark. $Rü$ und Q müssen deshalb exakt bestimmt werden.

Die Hilfsgröße b der Gleichung (19) errechnet sich allein aus dem inneren Radius r_i und dem Radius R der Mündung. Sie kann in einem doppeltlogarithmisch geteilten Diagramm als Gerade dargestellt werden (Diagramm rechts in Bild 2).

Mit Gleichung (24) läßt sich mit den Meßwerten für $Rü$ und Q der größte in einem Gemisch auftretende Tropfen mit einem Durchmesser d_{max} ermitteln und graphisch darstellen, wie dies für das angeführte Beispiel in dem oberen Diagramm in Bild 2 geschehen ist. Der Druck am Strahlrohr, die physikalischen Eigenschaften des Wassers und die Hilfsgröße b , durch die der dem Wasser aufgezwungene Drall berücksichtigt werden, beeinflussen d_m in weiten Grenzen. Im Diagramm wurde \sqrt{b} auf der Abszisse aufgetragen und der Druck Δp als Parameter gewählt. Die voll ausgezogenen Kurven gelten für Wasser von 10°C. Im Gegensatz zur Dichte ändert sich die Oberflächenspannung des Wassers zur umgebenden Luft und insbesondere die Zähigkeit des Wassers bei Temperaturänderungen

in so weiten Grenzen, daß dadurch auch der größte Tropfen im Sprühstrahl merklich beeinflusst wird. Die beiden gestrichelt eingezeichneten Kurven lassen die Abhängigkeit von der Wassertemperatur bei einem konstanten Druck $\Delta p = 50$ m WS erkennen; sie gelten für 0° bzw. 20°C . Bei sinkender Wassertemperatur steigen die Werte für die Oberflächenspannung und die Zähigkeit, wodurch d_{\max} nach Gleichung (24) ebenfalls größer wird. Wärmeres Wasser zerstäubt dagegen feiner. Von allen physikalischen Eigenschaften des Wassers übt die Zähigkeit den größten Einfluß auf die Tropfengröße aus.

Das Nomogramm in Bild 2 kann für die Auswertung von Mehrzweckstrahlrohren mit Mundstückweiten von 8mm benutzt werden. Es lassen sich für Rohre mit beliebigen Mundstückweiten analoge Nomogramme aufstellen.

In Bild 2 wird an einem Beispiel die Ermittlung von d_{\max} veranschaulicht (gestrichelte Linien). Bei einem gemessenen Rückdruck von $Rü = 4,64$ kp und einem Wasserfluß von $Q = 90$ l/min ergibt sich ein Radius r_i für den rotationssymmetrisch wasserfreien Querschnitt im Wasserstrahl von $r_i = 0,5$ mm. Verfolgt man die waagerechte Linie, so kann aus dem nebenstehenden Diagramm die Hilfsgröße $\sqrt{b} = 0,125$ abgelesen werden. Der maximale Tropfendurchmesser wird durch Ziehen einer Senkrechten in das 3. Diagramm erhalten. Der Schnittpunkt mit der entsprechenden Druckkurve liefert den auf der Ordinate abzulesenden Durchmesser d_{\max} . Für das angenommene Beispiel erhält man für $\Delta p = 50$ m WS bei einer Wassertemperatur von 10°C einen Durchmesser $d_{\max} = 1,16$ mm.

Liegt die Wassertemperatur bei 20°C , so verringert sich der maximale Tropfendurchmesser zu $d_{\max} = 1,12$ mm; bei einer Wassertemperatur von 0°C steigt er dagegen auf $d_{\max} = 1,24$ mm.

4.2. Parameter β in Abhängigkeit von der Tropfenverteilung in einem Gemisch

Die Verteilung der Tropfen innerhalb eines Spektrums errechnet sich mit Gleichung (27). Der größte in dem Gemisch vorkommende Tropfen mit dem Durchmesser d_{\max} und der empirisch zu ermittelnde Parameter β müssen bekannt sein, um die Verteilung bestimmen

zu können. β nimmt für bestimmte Zerstäubergruppen einen konstanten Wert an. Dieser liegt, wie nachfolgend noch näher ausgeführt wird, für die Mehrzweckstrahlrohre zwischen 0,25 und 0,35. Setzt man zunächst willkürlich verschiedene Werte von β in Gleichung (27) ein, so ergeben sich die Tropfenzahlsummenkurven in Bild 3. Bei einem gewählten Verhältnis von d/d_{\max} wird durch die Kurve angegeben, wieviel Prozent der Tropfen in dem Gemisch einen geringeren Durchmesser als der angenommene Durchmesser aufweisen. Je kleiner der Parameter β gewählt wird, um so größer wird der Anteil der Tropfen in den unteren Bereichen. Besonders deutlich wird die Zuordnung der Tropfen in dem Gemisch zu den einzelnen Durchmesserbereichen, wenn statt der Summenkurven die Tropfenzahl-Häufigkeitskurven nach Gleichung (26) über d/d_{\max} aufgetragen werden. Dies ist in Bild 4 geschehen. Bei großen β -Wert verteilen sich die Tropfen mehr über den gesamten Bereich und eine ausgeprägte Spitze in der Kurve als Kennzeichen für eine große Tropfenanhäufung in diesen Tropfengrößenbereichen bildet sich nicht so stark aus. In die Formeln (26) bzw. (27) gehen keine physikalischen Daten der zerstäubten Flüssigkeiten ein. Sie sind damit von ihnen unabhängig und die Verteilung errechnet sich nur nach der angenommenen Wahrscheinlichkeit.

4.3 Beeinflussung des mittleren Tropfendurchmessers durch den Parameter β .

Das Verhältnis des mittleren Durchmessers d_m nach Gleichung (30) und dem größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfen ist in Bild 5 in Abhängigkeit von dem Parameter β aufgetragen. d_m/d_{\max} wird nur von β beeinflusst, nicht von den physikalischen Eigenschaften des Wassers oder der Zerstäubungskonstruktion. Diese sind, wie besprochen, in dem maximalen Tropfendurchmesser d_{\max} enthalten. Mit wachsendem β nimmt das Verhältnis von d_m/d_{\max} zu. Dies entspricht auch den natürlichen Gegebenheiten, weil mit steigendem β eine Verteilung der Tropfen in dem Gemisch zu den Teilchen mit größerem Durchmesser stattfindet.

Ein konkretes Beispiel soll abschließend die Abhängigkeit des mittleren Tropfendurchmessers von dem größten gemessenen Tropfen und dem Parameter β verdeutlichen. Hält man zunächst $\beta = 0,3$ konstant, so ergeben sich mit $d_{\max} = 1,5, 2,0$ bzw. $2,5$ mm drei Kurven (Bild 6), deren Maximum stets bei $n/n_0 = 41\%$ liegt. Die Verteilung der Tropfen in den Gemischen verschiebt sich mit wachsendem maximalen Durchmesser mehr zu den größeren Tropfen hin. Demzufolge wächst auch der mittlere Tropfendurchmesser d_m des Gemisches, und zwar von $d_m = 0,76$ mm für den größten Tropfendurchmesser $d_{\max} = 1,5$ mm über $d_m = 1,02$ mm für $d_{\max} = 2,0$ mm nach $d_m = 1,27$ mm für $d_{\max} = 2,5$ mm. Ist man über die richtige Wahl von β im Zweifel, und will die extremen Grenzen eines Gemisches ermitteln, so wählt man noch $\beta = 0,25$ für $d_{\max} = 1,5$ mm und $\beta = 0,35$ für $d_{\max} = 2,5$ mm, wenn der erwähnte Durchmesserbereich berücksichtigt werden soll. Beide Kurven sind in Bild 6 eingetragen. Die mittleren Durchmesser ermitteln sich für die beiden erwähnten Beispiele zu $d_m = 0,68$ mm bzw. $d_m = 1,45$ mm. Damit liegen Unterschiede beim mittleren Durchmesser von mehr als 100 % vor.

In der Praxis weist d_m keine so großen Schwankungen auf. Der maximale Durchmesser d_{\max} wird sich nur in einem kleinen Bereich verändern, so daß man ihn in erster Näherung als Festwert annehmen darf. Nimmt man im vorgenannten Beispiel d_{\max} zu $1,5$ mm an und variiert nur noch β von $0,25$ bis $0,35$, so erhält man für $\beta = 0,25$ ein $d_m = 0,68$ mm und für $\beta = 0,35$ ein $d_m = 0,87$. Diese Abweichung ist nicht mehr sehr groß. Gleichzeitig erkennt man durch diese Betrachtung, daß der maximale Durchmesser d_{\max} den mittleren Durchmesser d_m wesentlich beeinflusst.

Betrachtet man allein die Kurven in Bild 6, so sind zwar erhebliche Unterschiede in der Tropfenverteilung feststellbar. Die Verschiebung erfolgt aber vorwiegend im Bereich unterhalb von 1 mm. Man ersieht daraus, daß der überwiegende Teil der Tropfen die von Radusch und Krüger [17, 18, 19, 20] errechneten günstigsten Tropfengrößen für die Brandlöschung von $0,1$ bis 1 mm Durchmesser aufweisen. Diese Überlegungen stehen weiterhin im Einklang mit den Untersuchungsergebnissen von Hinrichs [13, 14, 21, 22], der

durch photographische Aufnahmen von Sprühstrahlen aus Mehrzweckstrahlrohren und Auszählen der einzelnen Tropfen feststellte, daß mehr als 90 % aller Tropfen im Gemisch einen kleineren Durchmesser als 1 mm aufweisen.

Kennt man in einem Gemisch den Tropfen mit dem größten Durchmesser d_{max} , so kann für jedes β der Anteil der Tropfen mit einem Durchmesser größer als 1 mm aus dem Diagramm in Bild 3 abgelesen werden. Man bildet das Verhältnis d/d_{max} (mit $d = 1$ mm) und er-
sieht auf der Ordinate den Anteil der Tropfen mit Durchmessern kleiner als 1 mm. Der verbleibende Rest ist der Anteil der Tropfen mit Durchmessern größer als 1 mm. Für einige Beispiele mit ver-
schiedenen Parametern und bei frei gewähltem Durchmesser d_{max} sieht das folgendermaßen aus:

d_{max} [mm] \ Parameter β	0,25	0,3	0,35
1,5	3 %	4,1 %	5,0 %
2,0	6,5 %	9,0 %	11,0 %
2,5	10,8 %	14,2 %	17,7 %

In Bild 7 sind diese Ergebnisse zur besseren Übersicht graphisch dargestellt. Erwartungsgemäß steigen die Anteile der Tropfen mit einem Durchmesser größer als 1 mm am stärksten an, wenn d_{max} anwächst. Der Parameter β übt ebenfalls einen Einfluß aus, der sich jedoch nicht so stark wie der von d_{max} auswirkt.

4.4 Zusammenhang zwischen Strahlwinkel und Zerstäubung

Mit Gleichung (39) kann der Strahlwinkel α eines Sprühstrahles berechnet werden. Der Strahlwinkel ist für die Verteilung des Wassers auf einer waagerechten Fläche von Bedeutung. Bei großen α

wird eine breite Fläche bedeckt, jedoch im allgemeinen nur eine relativ geringe Wurfweite erzielt, während bei kleinem Strahlwinkel eine geringe Breite, dafür aber eine große Wurfweite erreicht wird. Je enger die Tropfen im Sprühstrahl zusammen bleiben, um so besser können sie den äußeren Windeinflüssen widerstehen und ein Strömungsfeld in der freien Atmosphäre aufbauen. Der Strahlwinkel beeinflusst deshalb die Wurfweite eines Sprühstrahles wesentlich. Einen Zusammenhang zwischen diesen Faktoren zu finden, bedarf zahlreicher Versuche und geht über den Umfang dieser Untersuchungen hinaus.

Bild 8 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Strahlwinkel α und der Steigung γ der Leitvorrichtungen im Schaltorgan eines Strahlrohres, wobei für die Düsenmündung $2R = 8$ mm und die Exzentrizität der Einströmung in dem Strahlrohr $R_1 = 8$ mm mit einem Gesamtquerschnitt $F_1 = 120$ mm² gesetzt wurde. Als Parameter dient die Hilfsgröße $b = r_1^2/R^2$. Diese Werte entsprechen in etwa einigen z.Zt. gebräuchlichen Rohrkonstruktionen. Die Hilfsgröße b beeinflusst den Zusammenhang zwischen den beiden Winkeln nicht wesentlich. Der Strahlwinkel α wird dagegen durch die konstruktiv festgelegten Maße (R , R_1 , F_1 und Winkel γ) vorwiegend bestimmt. Für die Neukonstruktion eines Strahlrohres sind diese Werte deshalb bedeutungsvoll.

Durch eine Auflösung der Gleichung (39) nach dem Halbmesser r_1 des flüssigkeitsfreien Raumes in Achsmitte der Düse (Gleichung 40) erhält man eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des maximalen Tropfendurchmessers d_{\max} in einem Gemisch. Außer dem Strahlwinkel sind nur einige durch die Konstruktion festgelegte Werte in der Gleichung (40) enthalten. Nur ein einziger Meßwert kann damit eine Aussage über die Tropfenverteilung und Tropfengrößen in einem Gemisch bringen. Im Gegensatz dazu waren es in der Gleichung (13) noch 2 Meßwerte. In Bild 9 ist in dem linken Diagramm der Zusammenhang zwischen der Steigung γ der Leitvorrichtung und dem inneren Radius r_1 mit dem Strahlwinkel α als Parameter dargestellt. Nebenstehend wurde nochmals die Hilfsgröße \sqrt{b} und die

Ermittlung von d_{\max} entsprechend Bild 2 gezeichnet, um auch hier den gesamten Überblick zu bringen. Zur Aufstellung des Diagrammes dienten in Gleichung (40) wieder folgende Werte: $R = 4$ mm, $R_1 = 8$ mm, $F_1 = 120$ mm². Für den Strahlwinkel $\alpha = 30^\circ$ wurden z.B. $R_1 = 7$ bzw. 9 mm und $F_1 = 135$ bzw. 105 mm² gesetzt, was einer Abweichung von jeweils 12,5 % entspricht, um den Einfluß dieser Größen aufzeigen zu können.

Unter den vorgegebenen Bedingungen ist nur ein maximaler Strahlwinkel $\alpha = 40,1^\circ$ möglich. Der innere Halbmesser r_i wird sowohl durch α als auch durch γ stark beeinflusst. Die konstruktiven Maße R , R_1 und F_1 üben ebenfalls einen großen Einfluß auf den Drall und damit auf r_i aus, wie die beiden gestrichelt eingezeichneten Kurven a und b veranschaulichen. Für a gelten die Maße $R_1 = 7$ mm und $F_1 = 135$ mm², für die Kurve b: $R_1 = 9$ mm und $F_1 = 105$ mm². Wenn die Toleranzen bei R_1 und F_1 gegensätzlich liegen, also einmal im Plus- und einmal im Minusbereich der Toleranz, so treten die größten Abweichungen auf. Schwankt die Toleranz bei beiden Meßgrößen nur nach einer Seite, so werden die Fehler teilweise wieder ausgeglichen.

In Bild 9 ist wiederum ein Beispiel zur Ermittlung von d_{\max} eingezeichnet. Beträgt die Steigung der Leitvorrichtungen $\gamma = 30^\circ$, und wird ein Strahlwinkel $2\alpha = 70^\circ$ gemessen, so ergibt dies einen rotationssymmetrisch wasserfreien Raum in der Düse mit dem Radius $r_i = 0,7$ mm. Durch Ziehen einer waagerechten Linie erhält man die Hilfsgröße $\sqrt{b} = 0,175$. Die in diesem Punkt gezogene Senkrechte liefert dann im Schnittpunkt mit der entsprechenden Druckkurve den auf der Ordinate angegebenen Durchmesser d_{\max} des größten in dem Sprühstrahl vorkommenden Tropfens. Er beträgt für unser Beispiel $d_{\max} = 1,1$ mm.

5. 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 Kücken selbst oder in dem das Kücken 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 [22] näher beschrieben. Bild 10 zeigt eine solche Tropfenaufnahme. Für die Auszählung wurden jeweils mehrere zeitlich und im Sprühstrahl selbst verschieden gelegene Aufnahmen genommen und im allgemeinen mindestens 1000 Tropfen vermessen. Als Beispiel für eine solche Auszählung sei nachstehende Aufstellung aufgeführt:

Tropfenbereich mm	Anzahl der Tropfen	$i_n \cdot d_n^3$ mm ³	$i_n \cdot d_n^2$ mm ²
0 - 0,25	117	0,9	4,7
0,25 - 0,5	317	16,7	44,4
0,5 - 0,75	442	108,0	172,4
0,75 - 1,0	257	172,0	196,6
1 - 1,25	66	94,4	83,8
1,25 - 1,5	34	88,4	64,3
1,5 - 1,75	17	73,1	45,1
1,75 - 2,0	5	33,0	17,6
2,0 - 2,25	7	67,2	31,7
2,25 - 2,5	1	11,8	5,6
2,5 - 2,75	1	18,1	6,9
2,75 - 3	1	23,8	8,3
3	3	129,0	36,8
	1268 (1263)	836,4 (665,5)	718,2 (666,2)

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, wie auch im vorliegenden Beispiel in einer Zelle bei größer werdendem Tropfendurchmesser mehr Tropfen gemessen wurden als in der vorhergehenden (Zelle 2,0 bis 2,25 mm 7 Tropfen gegenüber 5 Tropfen in der Zelle 1,75 bis 2,0 mm). 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.

Diese soeben erwähnte Verfälschung des Tropfenbildes tritt besonders bei niedrigen Drücken auf. Das angeführte Beispiel wurde bei einem Wasserdruck am Strahlrohr von 40 m WS gewonnen. Zur besseren Beurteilung des ausgewerteten Tropfenbildes wurden deshalb Korrekturen vorgenommen und die offensichtlich durch äußere Einflüsse entstandenen, im Sprühbild mit fotografierten Tropfen gestrichen. Im

vorgenannten Beispiel bedeutet dies die Streichung der Tropfen mit Durchmesser größer als 2,5 mm. Das sind nur 5 Tropfen, die jedoch den mittleren Durchmesser nach Gleichung (29) so stark beeinflussen, daß eine Reduzierung von $d_m = 1,16$ mm auf $d_m = 1,00$ mm stattfindet.

Unter Berücksichtigung dieser Korrektur wurden die ausgezählten Tropfenbilder ausgewertet. Als Beispiel sollen die Ergebnisse der Messungen an einem der vier Strahlrohre wiedergegeben werden. Die prozentuale Tropfenverteilung in den einzelnen Durchmesserbereichen ist durch die Summenkurven in den Bildern 11 und 12 dargestellt. Die Meßpunkte fallen eng mit der eingezeichneten Tropfenzahlsummenkurve nach Gleichung (27) mit dem Parameter $\beta = 0,25$ zusammen. Für die vier vermessenen Rohre wurden bei den insgesamt 24 aufgestellten Tropfenverteilungen folgende Parameter β ermittelt:

$\beta = 0,25$ bei 16 Tropfengemischen
 $\beta = 0,3$ bei 6 Tropfengemischen
 $\beta = 0,35$ bei 2 Tropfengemischen

Die beiden Tropfengemische mit $\beta = 0,35$ wurden bei einem Mehrzweckstrahlrohr gemessen, das keine besonders gute und vor allem zeitlich keine gleichmäßige Versprühung aufwies. Der Winkel des Sprühstrahls veränderte sich unter gleichzeitig starker Geräuschbildung zwischen zwei festen Werten. Die Ursache dieses Verhaltens konnte nicht ermittelt werden. Der ganze Vorgang deutete darauf hin, daß innerhalb des Strahlrohres ein Abreißen einer Strömung mit nachfolgendem Wiederaufbau stattfand.

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 (26) 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 kleineren als mit größerem Durchmesser.

In den Bildern 13 bis 15 ist die effektive Verteilung der Tropfen in den Gemischen für die verschiedenen Druckstufen wiedergegeben. In jedem Bild gilt jeweils der gleiche Durchmesser d_{max} für die beiden empirisch ermittelten Kurven, während für alle Gemische der Parameter $\beta = 0,25$ konstant gesetzt ist, wie er aus Bild 11 und 12 gewonnen wurde. Man stellt im wesentlichen eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und der theoretisch nach Gleichung (26) ermittelten Kurve fest. In allen drei Bildern fällt jedoch auf, daß jeweils einer 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. Als maximalen Durchmesser kann man aus den Zelleneinteilungen jeweils nur den Grenzwert einsetzen. Es ist aber durchaus möglich, daß dieser gar nicht erreicht wird, weil die wenigen oder u.U. der einzige Tropfen in der letzten Zelle im untersten Durchmesserbereich liegt, obwohl dann in der Auswertung der äußerste Durchmesser dieses Bereiches eingesetzt wird. Dadurch kann eine gewisse Verschiebung in der Tropfenverteilung stattfinden. Dies kann eine Erklärung für die jeweiligen Verschiebungen in der Zusammensetzung des Tropfengemisches sein. Eine noch feinere Klassifizierung in der Tropfenauslese war aus meßtechnischen Gründen nicht möglich und hätte größere Toleranzen in der Genauigkeit der Ausmessung zur Folge gehabt.

Der mittlere Durchmesser der Tropfengemische wurde nach Gleichung (29) unter Berücksichtigung der angeführten Korrektur bestimmt. Für die Tropfengemische der Bilder 11 und 12 bzw. 13 bis 15 ergeben 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 1mm, 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 der Kurve in Bild 5 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 Tropfenzahlsummenkurven gewonnene Parameter β richtig ermittelt wurde.

Zur Bestimmung eines maximalen Durchmessers in einem Tropfengemisch nach den Gleichungen (13) (19) und (24) bzw. nach dem Nomogramm in Bild 2 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. Ermittelt man im Nomogramm der Abb.2 zu diesem d_{max} -Wert das entsprechende Q und den dazugehörigen Rückdruck $Rü$, so erkennt man, daß geringe Toleranzen in der Bestimmung dieser beiden Meßwerte erhebliche Verschiebungen von d_{max} zur Folge haben.

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 nach dem Nomogramm in Bild 2 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. Obwohl diese theoretischen Überlegungen zu einer einfachen maximalen Durchmesser-Bestimmung führen, haben sie für die Beurteilung der Strahlrohre jedoch noch keine praktische Bedeutung, weil die Toleranzen bei den zu bestimmenden Meßwerten noch zu große Abweichungen bei d_{max} ergeben.

Mit der Gleichung (40) hat man eine weitere Möglichkeit, den Radius r_1 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. In dem Nomogramm in Bild 9 sind die Zusammenhänge der theoretischen Betrachtungen graphisch dargestellt.

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 [25] 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 ist, 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. Dadurch wird die hyperbolische Form der äußeren Strahlkontur weitgehend verwischt, so daß diese etwa das Aussehen wie in Bild 16 annimmt. Der in Gleichung (40) 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. Die Ermittlung des Strahlwinkels ist somit ungenau. Aus dem Nomogramm in Bild 9 ersieht man aber, daß Abweichungen in der Messung von einigen Grad en erhebliche Veränderungen beim Radius r_1 ergeben und sich damit auch auf den maximalen Durchmesser d_{\max} auswirken. 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 wird durch die Bildserie 17 bis 28 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. In Bild 29 sind die aus den in der Bildserie rechts stehenden Großaufnahmen des Sprühstrahles gemessenen Strahlwinkel eingetragen. Der Strahlwinkel 2α sinkt 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. Man ersieht aus dem Abfall der

Kurve keine lineare Abhängigkeit, was auch zu erwarten war. Bei kurzen Zwischenrohren ist eine Beruhigung am deutlichsten feststellbar. Der nach Gleichung (39) 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 Zwischenrohres 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.

6. 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 flüssig-

keitsfreier, 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 wird 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.

7. ANHANG

MESSVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG VON WURFBILDERN FÜR MEHRZWECKSTRAHLROHRE.

EINLEITUNG

Die in dem vergangenen Jahrzehnt auf den Markt gekommenen Mehrzweck-Strahlrohre 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 ausgeschlossen werden.

Über entsprechende Untersuchungen an Mehrzweckstrahlrohren der Größe C berichtet Hinrichs [25, 26]. 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.

WURFBILD

Der Versuchsaufbau wurde, wie in dem Bericht [25] 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. Durch diese lange Zeitdauer wurden Differenzen in der Zeitmessung, leichte Druckschwankungen von der Pumpenseite her und unvermeidbare Abweichungen bei der Bestimmung der Wassermengen in den Auffanggefäßen weitgehend ausgeschaltet. Die Halle mit den vorbeschriebenen Maßen erwies sich als geräumig genug, um Beeinflussungen der Sprühstrahlen z.B. durch den Aufbau eines Luftwirbelfeldes innerhalb der

Halle während der genannten Meßzeiten auszuschalten. Kleinere Hallen können die Vermessung der BM-Strahlrohre u.U. durch die sich aufbauenden Luftwirbelfelder beeinflussen. Bekanntlich zieht ein Sprühstrahl Luft in sich hinein. Diese wird stromabwärts nach dem Abfall der Tropfen zum Boden wieder freigegeben. Da die Halle ein geschlossener Raum ist, kommt die Luft in Zirkulation, wie dies in Bild 30 schematisch dargestellt ist. Bei kleineren Hallen wird diese Luftzirkulation durch kleinere Einbauten oder Unregelmäßigkeiten gestört. Es kommt dadurch zu einseitig höheren Drücken und der Sprühstrahl beginnt hin- und her zu wedeln. Eine gute Vermessung ist in kleineren Hallen deshalb nicht möglich.

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 Wasser-Verteilung im Sprühstrahl zu erhalten.

Die Aufzeichnung der Wurfbilder erfolgt nach DIN 14365, Blatt 2, bzw. wie in [25, 26] 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. Bei verschiedenen Strahlrohren lag sie etwa bei 15° , bei anderen dagegen bei etwas größerem Anstellwinkel. Der Einheitlichkeit halber wird eine Vermessung aller M-Strahlrohre bei 15° vorgeschlagen.

Von den mehr als 20 vermessenen Rohren sind in den Bildern 31 bis 33 die Wurfbilder einiger M-Strahlrohre als typische Beispiele der zur Zeit auf dem Markt befindlichen M-Strahlrohre wiedergegeben. Aufgrund der in den vergangenen Jahren vermessenen und zugelassenen CM-Strahlrohre hat sich durch deren Erfahrungen eine weitgehende Vereinheitlichung in der Versprüheinrichtung und in der Ausbildung der Sprühstrahlen auch bei den BM- und DM-Strahlrohren eingestellt. Alle Strahlrohre zeigen mehr oder weniger einen schlanken, d.h. relativ weit werfenden Sprühstrahl mit mittlerer Wurfbreite.

QUERSCHNITTSBILD.

Zur Ergänzung und besseren Beurteilung des Strahles wird ein Querschnittsbild aufgenommen. Zu diesem Zwecke 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. Dies erreicht man durch kreuzweises Zwischenlegen von Holzplatten von 50 mm Breite (Bild 34 und 35). Damit ergeben sich auf 1 m Länge genau 6 Dosenreihen. Diese Anordnung hat den Vorteil, daß die Dosen gleichzeitig gegen Verschieben gesichert sind. Man erhält durch diese enge Anordnung ein ausreichend genaues Bild über die Wasserverteilung im Sprühstrahl. Der Abstand der Strahlrohrmündung von der Oberkante der Dosen betrug 4 m. Bei dieser Entfernung ergibt sich ungefähr die maximale Ausbreitung des Sprühstrahls. Bei geringerer Entfernung ist dagegen der Sprühstrahl im Durchmesser enger. Diese Maximalbreite variiert bei den verschiedenen Strahlrohren. Doch ist die Entfernung von 4 m ein Durchschnittsmaß für die verschiedenen vermessenen Konstruktionen und gilt für alle Strahlrohrgrößen.

Da das Fassungsvermögen der Dosen begrenzt ist, muß bei allen BM-Strahlrohren infolge des gegenüber den CM-Strahlrohren wesentlich höheren Wasseranfalles im Sprühstrahlquerschnitt die Meßdauer eingeschränkt werden, um ein genaues Bild der Wasserverteilung im Sprühstrahl zu erhalten. Bei den CM-Strahlrohren konnten die Dosen bei einer Meßzeit von 1 min das anfallende Wasser noch aufnehmen, ohne Verfälschungen (Herausspritzen der einfallenden Tropfen und Überlaufen der Dosen) entstehen zu lassen. Bei den jetzt untersuchten Rohren wurden daher Zeiten von 20 und 30 s genommen. Diese Verkürzung der Meßdauer scheint gerechtfertigt, da das Querschnittsbild keine Aussage über die Wasserlieferung, sondern lediglich über die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung und damit über die Güte der Versprühung geben soll. Das wird auch bei kurzen Spritzzeiten vollkommen erreicht.

Durch das Aufstellen der Dosen auf den Boden und senkrechter Anordnung der Strahlrohre treffen die Tropfen praktisch auf eine senk-

recht zum Sprühstrahl angeordnete Wand. Damit ist die Möglichkeit gegeben, daß der Sprühstrahl durch sich aufbauende Luftwirbelfelder in Bewegung gerät und das Querschnittsbild verfälscht. Bei diesen Versuchen haben sich bei kurzen Spritzzeiten bei BM-Strahlrohren und bei Spritzzeiten von einigen Minuten bei den DM-Strahlrohren keine Schwankungen eingestellt. Bei ausreichender Größe einer Versuchshalle kann die Luft seitwärts abstreichen und ist die kinetische Energie, bzw. die Trägheit der Tropfen groß genug, um auf den Boden bzw. in die Gefäße durchzufallen.

Aus der Vielzahl der untersuchten Strahlrohre sollen für die gemessenen Querschnittsbilder die Bilder 36 bis 38 als charakteristische Beispiele dienen. Man hat es heute praktisch nur noch mit zwei Arten von Querschnittsverteilungen zu tun. Einmal fällt die Wasserverteilung kontinuierlich zum Rand ab (Bild 36 und 38), oder aber es liegt ein leichter Hohlstrahl vor, wie dies aus Bild 37 ersichtlich ist. Im letzten Fall ist in der Mitte des Sprühstrahles ein geringer Wasseranfall als in dem ihn umgebenden Ringzonen. Bei allen M-Strahlrohren wurde ansonsten eine gleichmäßige Wasserverteilung festgestellt. Konstruktionen mit vollkommen unregelmäßiger Verteilung, wie sie früher vielfach anzutreffen waren, sind nicht mehr oder nur noch in Ausnahmefällen anzutreffen.

Die Versuche haben bestätigt, daß das bei CM-Strahlrohr 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.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Juhasz de, K.J.:
Trans. Amerik. Soc. mechn. Engr.,
1931, Bd. 53, S. 65/77.
- [2] Haenlein, A.:
Forsch. Gebiete Ingenieurwesen
2, 139/49 (1931).
- [3] Weber, G.:
Z. angew. Math. Mechan. 11, 136, 54
(1931).
- [4] Holfelder, O.:
Forsch. Gebiete Ingenieurwesen,
3, 229/40 (1931).
- [5] Ohnesorge v., W.:
Z. angew. Math. Mechan.,
16, 355/58 (1936).
- [6] Lord Rayleigh:
Proc. London Math. Society, 10, H.4,
(1879) Philos. Mag. 34, 145 (1892).
- [7] Edeling, K.:
Untersuchungen zur Zerstäubungstrocknung.
Karlsruhe Techn. Hochschule, Dr.-Ing.
Dissertation 1944.
- [8] Haenlein, A.:
Über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles.
Forsch. Ing. Wesen 2 (1931), H.4,
S. 139-149.

- [9] Sänger, E. :
Theorie der Gemischaufbereitung in
stationären Feuerungen.
Brennstoffchemie, 1951, S. 1-2 und 33-50.
- [10] Troesch, H.A. :
Die Zerstäubung von Flüssigkeiten.
Chemie-Ing. Techn., 26 (1954), S.311/320.
- [11] Bär, P. :
Über die physikalischen Grundlagen
der Zerstäubungstrocknung.
Karlsruhe Technische Hochschule, Diss. 1935.
- [12] Friedmann, S.J., Gluckert, F.A. and Marschall, W.R.:
Centrifugal Disk. Atomisation.
Chem.Eng.Proc., 48 (1952), S.181.
- [13] Hinrichs, B.R. :
Die Tropfengröße unter dem Einfluß von
Zusätzen zum Löschwasser bei der Versprühung.
VFDB-Z., 12 (1961), S.19.
- [14] Hinrichs, B.R. :
Wasserzerstäubung in Mehrzweckstrahlrohren
bei Drücken bis zu 250 m WS.
VFDB-Z, 12 (1963), S. 14/17.
- [15] Gebhardt, H. :
Die Tropfengrößen bei Drallzerstäubung
BWK, 10 (1958), S.361/366.
- [16] Herterich, O. :
Wasser als Löschmittel.
Heidelberg : Dr. A. Hüthig-Verlag GmbH. 1960.

- [17] Radusch, R. :
Betrachtungen über die günstigste Tropfen-
größe durch zerstäubtes Wasser und über die
Reichweite eines Wasserstrahles.
VFDB-Z., 2 (1953), S.47.
- [18] Radusch, R. :
Der Wasserstaubstrahl und seine Löschkraft.
Brandschutz, 8 (1954), S. 103.
- [19] Radusch, R. :
Über die Verdampfungsgeschwindigkeit von
Wassertropfen.
Chemie-Ing.- Technik, 28 (1956), S. 275.
- [20] Krüger, A. und Radusch, R. :
Wasserzerstäubung im Strahlrohr. Forsch.
Ber.Nr. 329 des wirtschafts- und Verkehrs-
ministeriums Nordrhein-Westfalen, West-
deutscher Verlag Köln und Opladen, 1956.
- [21] Hinrichs, B.R. :
Die Ermittlung der Tropfengrößen von Sprüh-
düsen und der Einfluß von Zusätzen zum
Löschwasser bei der Versprühung.
Chem. Rundschau, 14 (1961), S. 417.
- [22] Hinrichs, B.R. :
Ermittlung des Tropfenspektrums von Sprüh-
düsen auf fotografischem Wege.
Sonderheft VFDB. Zeitschrift, 9 (1960), Nr.3,S.61.
- [23] Söhngen, E. und Grigull, U. :
Der Strahlwinkel von Brennstoff-Dralldüsen
bei kontinuierlicher Einspritzung.
Forsch.Ing.-Wesen, 17 (1951), S.77-82.

- [24] Juhasz de, K.J. :
Spray Literature Abstracts.
Vol 2 (1964).
- [25] Hinrichs, B.R. :
Vergleichende Untersuchungen an Sprüh-
strahlrohren.
VFDB-Zeitschrift, 7 (1958), Nr.2, S. 29.
- [26] Hinrichs, B.R. :
Untersuchung an Sprühstrahlrohren.
VFDB-Zeitschrift, 8 (1959), Nr. 2, S.32.

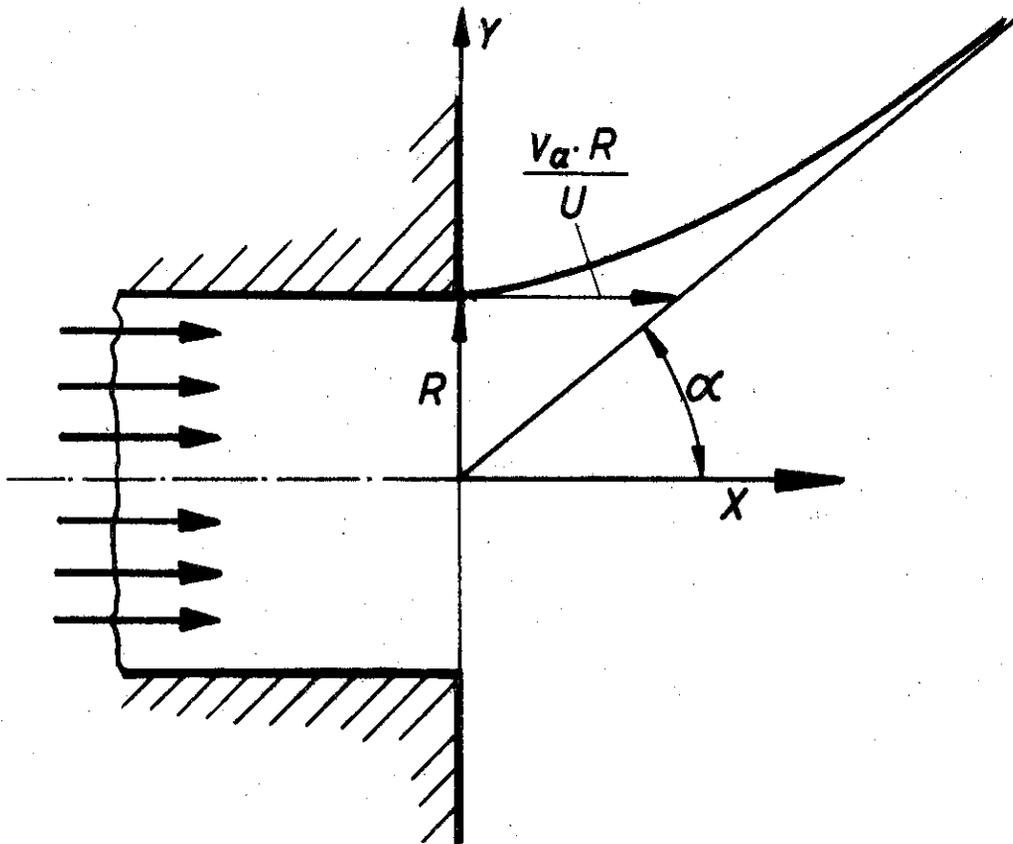
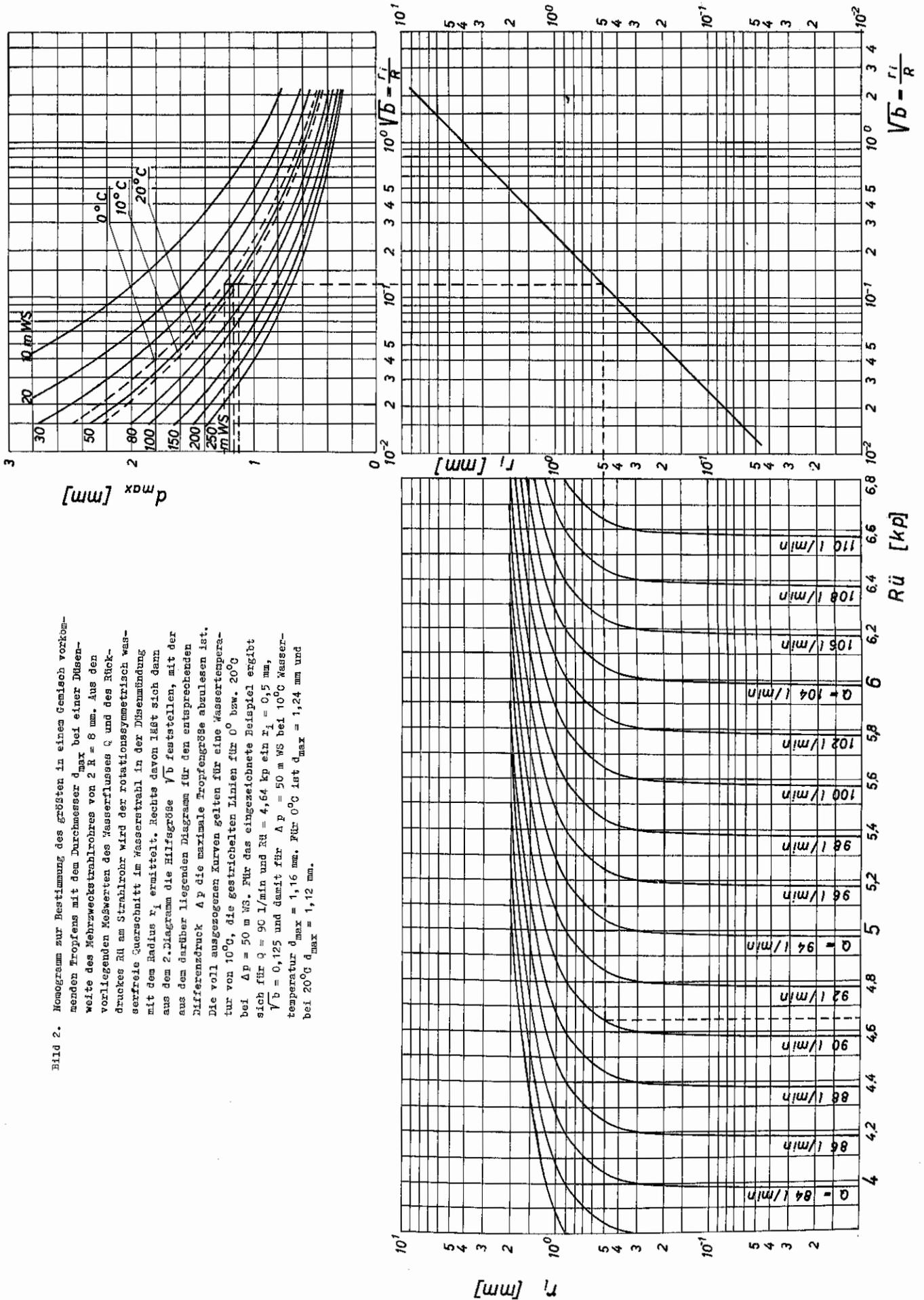


Bild 1. Die Berechnung der äußeren Strahlkontur ergibt eine Hyperbel mit den Halbachsen $v_a \cdot R/U$ und R .

Bild 2. Monogramm zur Bestimmung des größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfens mit dem Durchmesser d_{max} bei einer Düsenweite des Mehrweckstrahlrohres von $2R = 8$ mm. Aus den vorliegenden Meßwerten des Wasserflusses Q und des Rückdrucks $Rü$ am Strahlrohr wird der rotationsymmetrisch wasserfreie Querschnitt im Wasserstrahl in der Düsenmündung mit dem Radius r_i ermittelt. Rechts davon läßt sich dann aus dem 2. Diagramm die Hilfsgröße \sqrt{b} feststellen, mit der aus dem darüber liegenden Diagramm für den entsprechenden Differenzdruck Δp die maximale Tropfengröße abzulesen ist. Die voll ausgezogenen Kurven gelten für eine Wassertemperatur von 10°C , die gestrichelten Linien für 0° bzw. 20°C bei $\Delta p = 50$ m WS. Für das eingzeichnete Beispiel ergibt sich für $Q = 90$ l/min und $Rü = 4,64$ kp ein $r_i = 0,5$ mm, $\sqrt{b} = 0,125$ und damit für $\Delta p = 50$ m WS bei 10°C Wassertemperatur $d_{max} = 1,16$ mm. Für 0°C ist $d_{max} = 1,24$ mm und bei 20°C $d_{max} = 1,12$ mm.



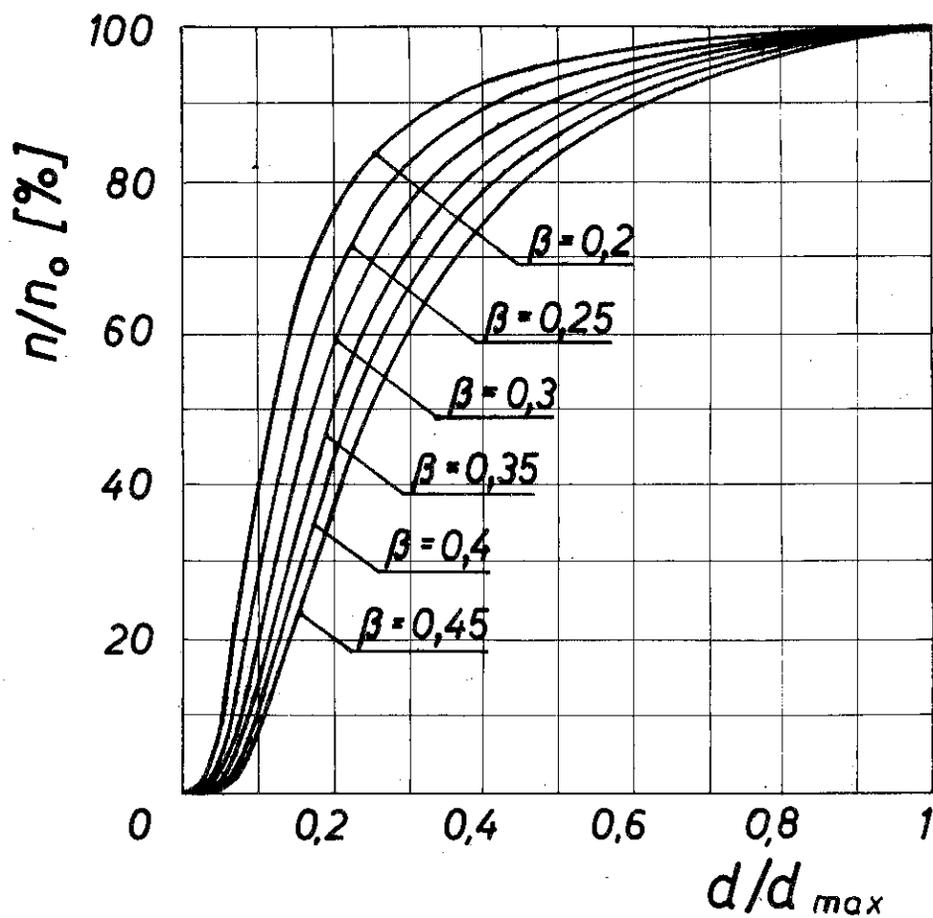


Bild 3. Tropfenzahlsummenkurven nach Gleichung (27) mit β als Parameter.

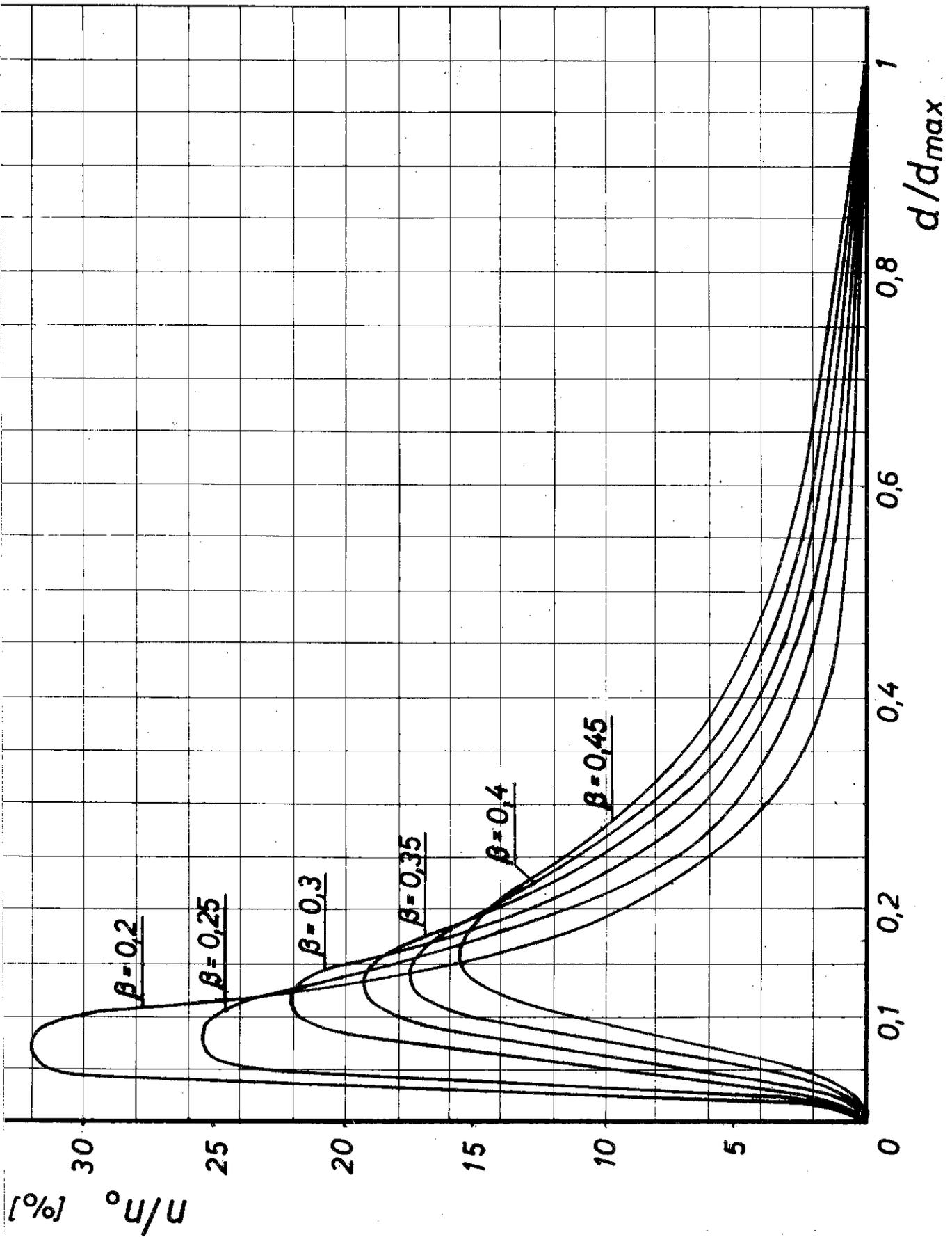


Bild 4. Verteilung der Tropfen nach Gleichung (26) in die einzelnen Durchmesserbereiche bei Veränderung des Parameters β von 0,2 bis 0,45.

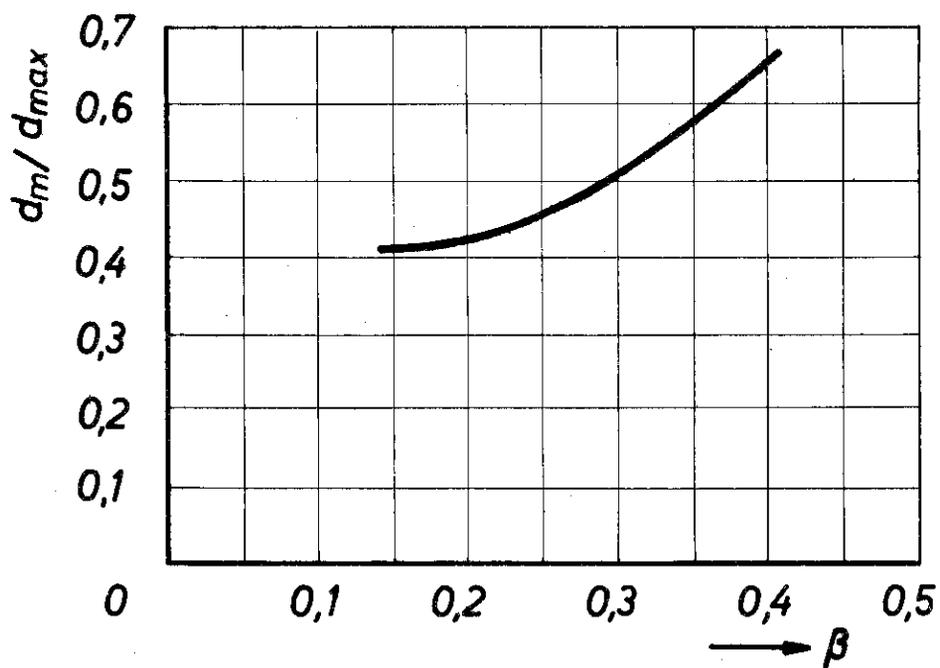


Bild 5. Verhältnis aus dem mittleren Tropfendurchmesser d_m nach Gleichung (30) und dem größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfen in Abhängigkeit von dem Parameter β .

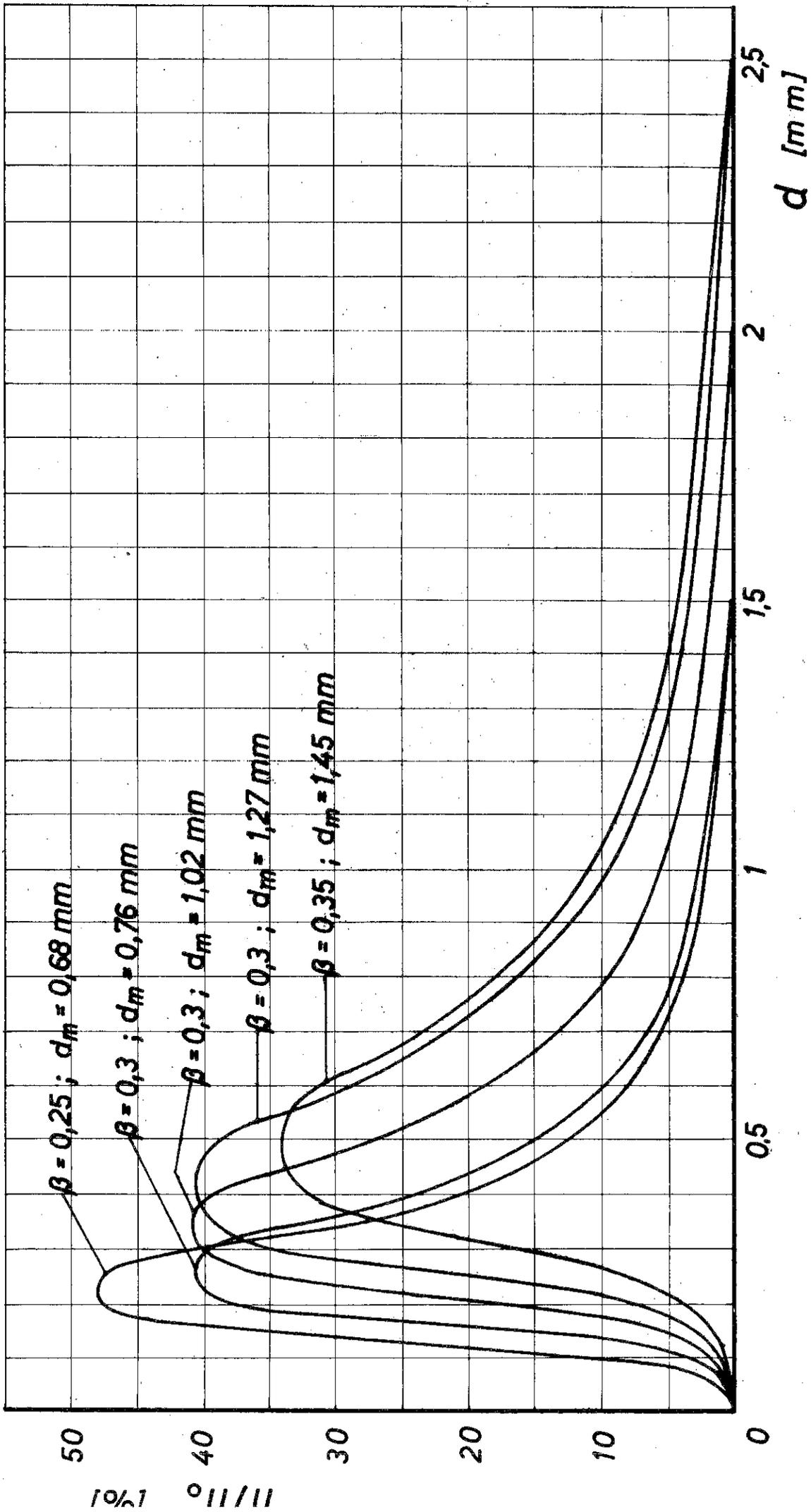


Bild 6. Beispiel für die Verteilung der Tropfen und der Größe des mittleren Tropfendurchmessers d_m nach Gleichung (30) bei verschiedenen Werten von dem maximalen Tropfendurchmesser d_{max} und dem Parameter β .

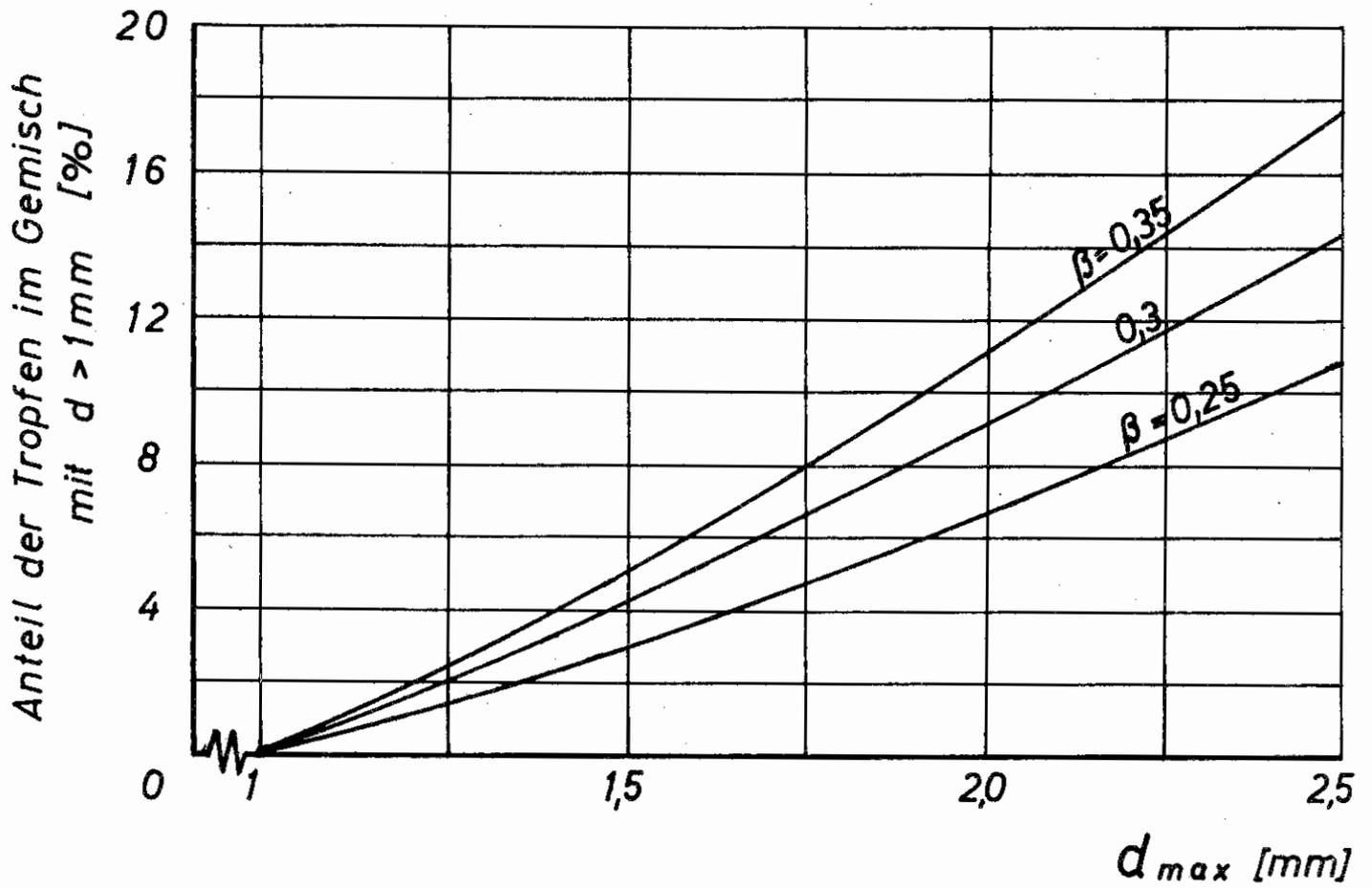


Bild 7. Anteil der Tropfen in einem Gemisch mit Durchmessern größer als 1 mm.

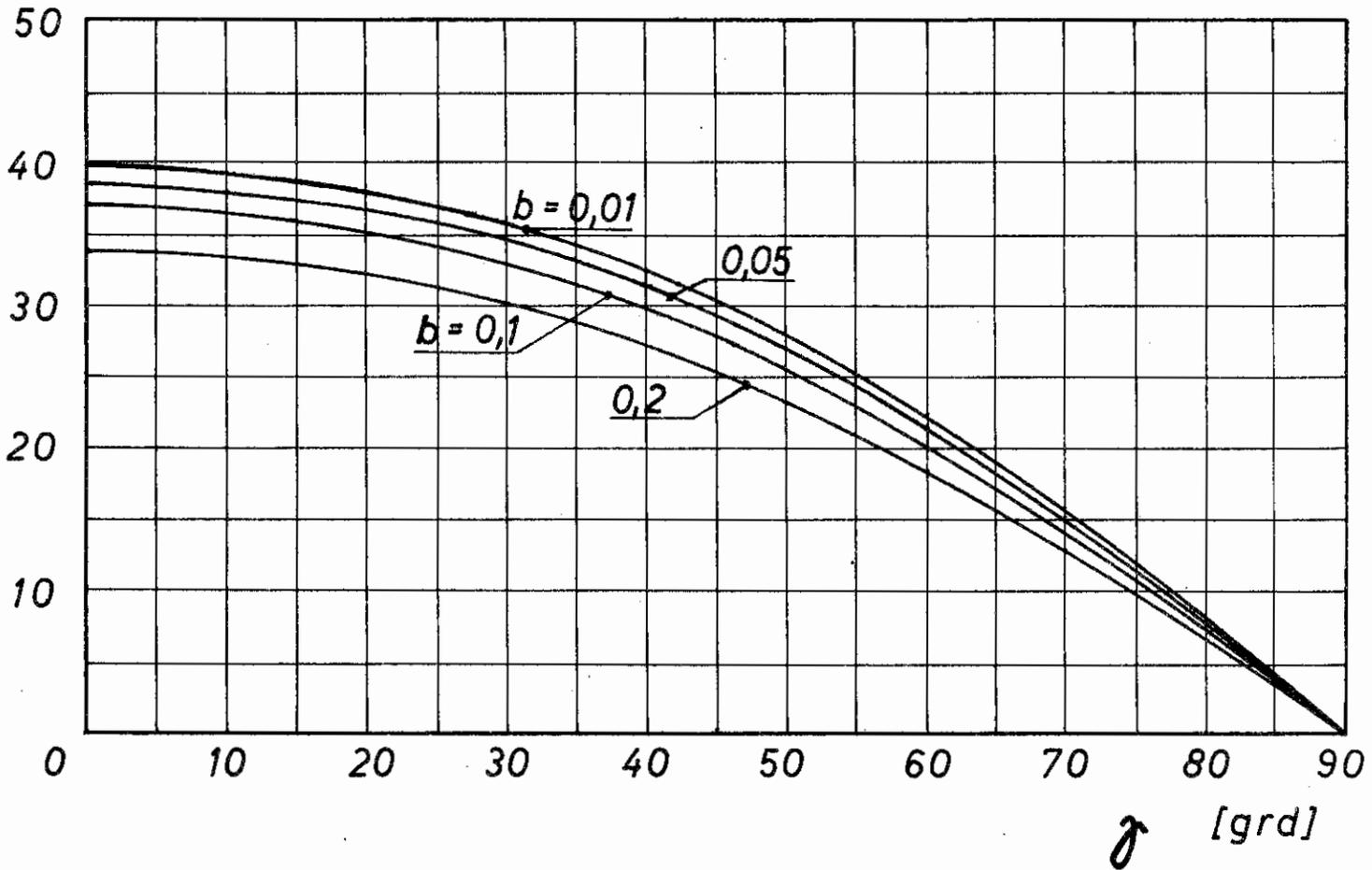
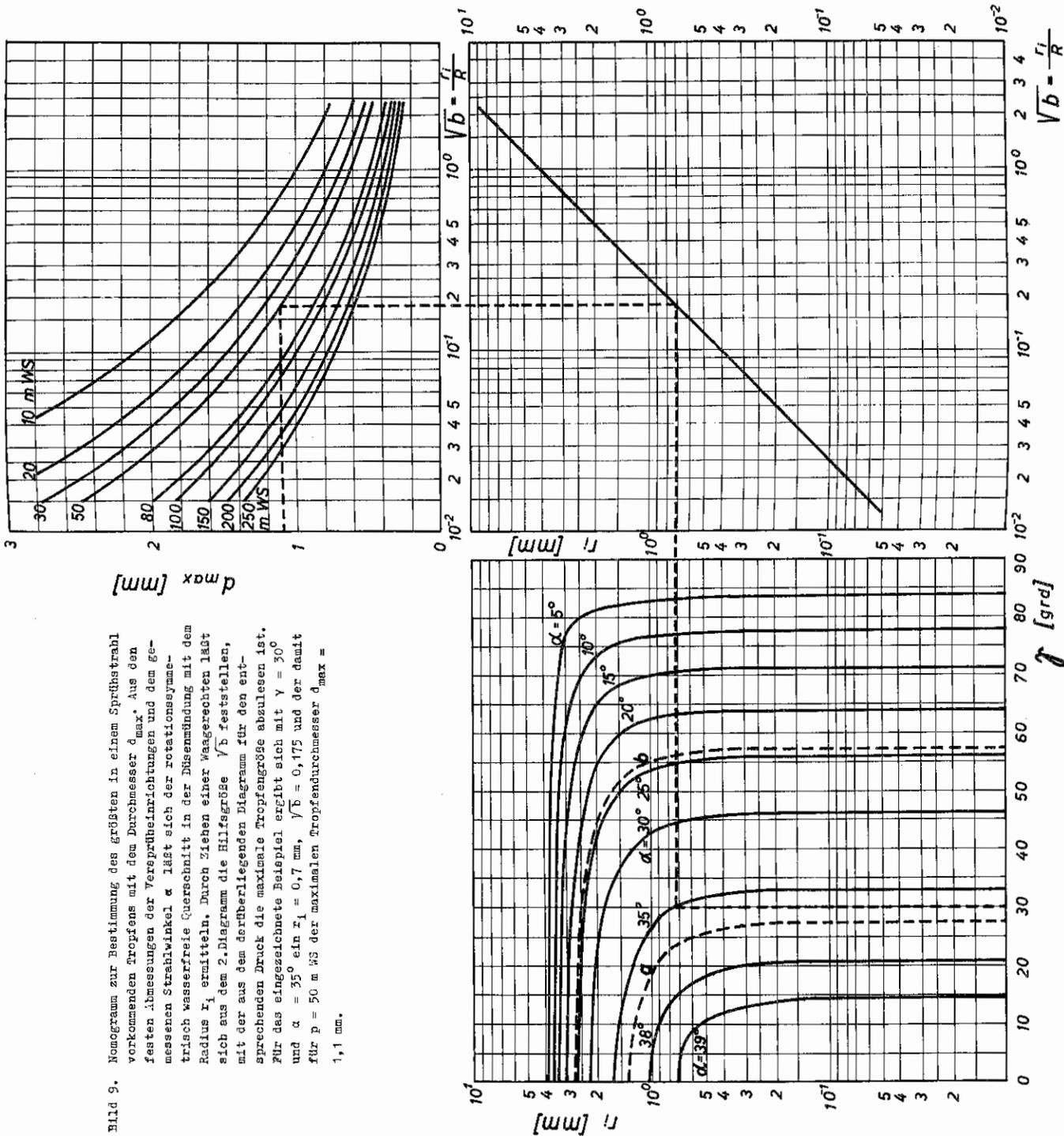


Bild 8. Zusammenhang zwischen Strahlwinkel α und Steigung γ der Leitvorrichtungen im Schaltorgan des Strahlrohres nach Gleichung (39). Für die konstruktiven Maße wurden folgende Annahmen getroffen: $R = 4$ mm; $R_1 = 8$ mm und $F_1 = 120$ mm². Als Parameter dient die Hilfsgröße $b = r_i^2/R^2$.

Bild 9. Nomogramm zur Bestimmung des größten in einem Sprühstrahl vorkommenden Tropfens mit dem Durchmesser d_{max} . Aus den festem Abmessungen der Versprührichtungen und dem gemessenen Strahlwinkel α lässt sich der rotationsymmetrisch wasserfreie Querschnitt in der Düsenmündung mit dem Radius r_1 ermitteln. Durch Ziehen einer waagerechten Längsgeraden aus dem 2. Diagramm die Hilfsgröße \sqrt{b} feststellen, mit der aus dem dazugehörigen Diagramm für den entsprechenden Druck die maximale Tropfengröße abgelesen ist. Für das eingezeichnete Beispiel ergibt sich mit $\gamma = 30^\circ$ und $\alpha = 35^\circ$ ein $r_1 = 0,7$ mm, $\sqrt{b} = 0,175$ und der damit für $p = 50$ m WS der maximalen Tropfendurchmesser $d_{max} = 1,1$ mm.



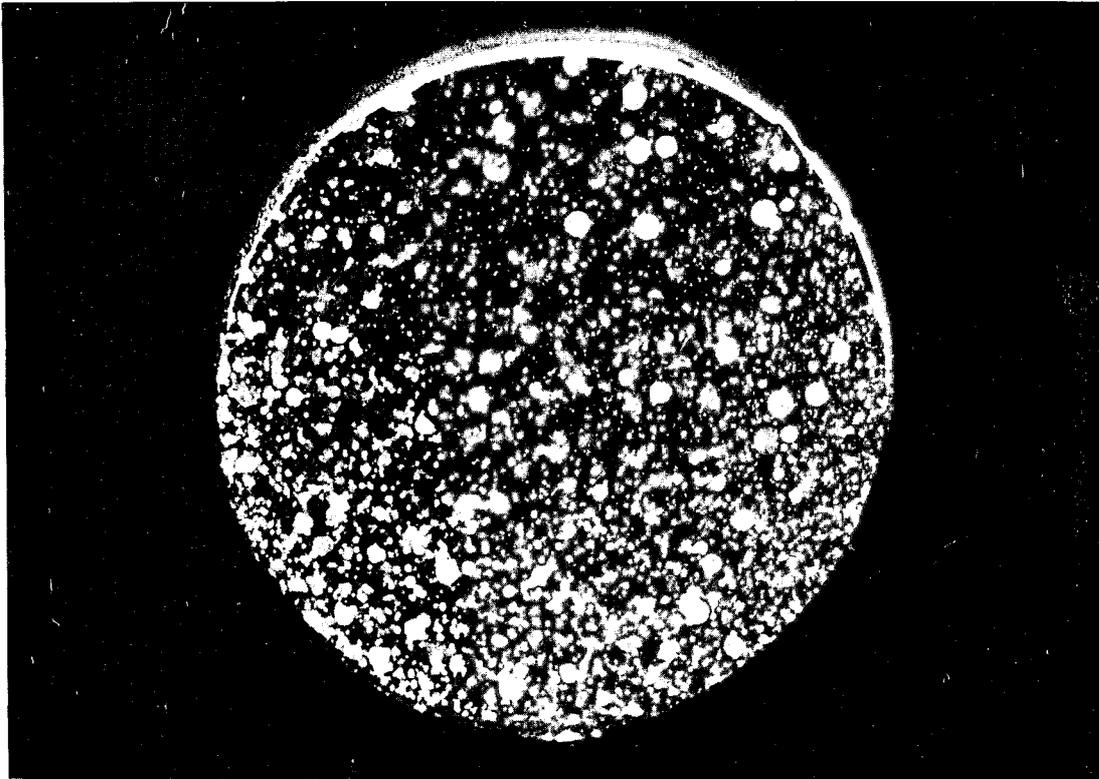


Bild 10. Fotografische Aufnahme von Wassertropfen im Sprühstrahl.

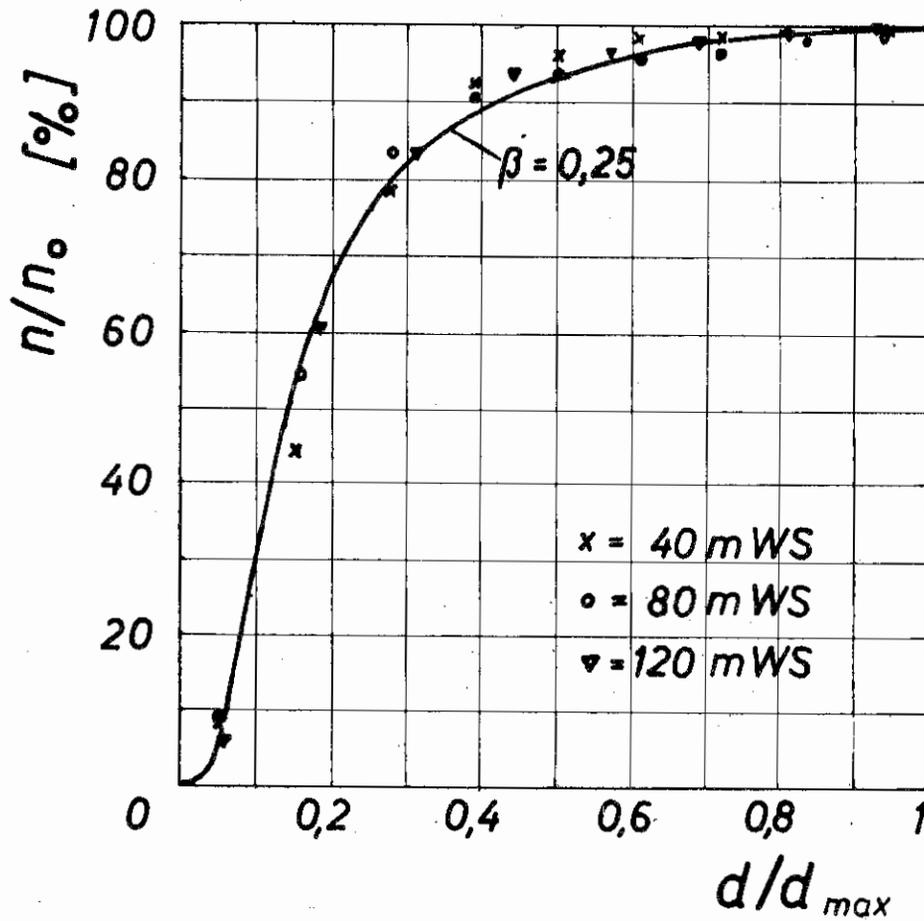


Bild 11. Tropfenverteilung im Sprühstrahl für das als Beispiel verwendete Rohr bei Wasserdrücken am Strahlrohr von 40, 80 und 120 m WS. Die Meßwerte gruppieren sich um die Tropfenzahlsummenkurve mit $\beta = 0,25$.

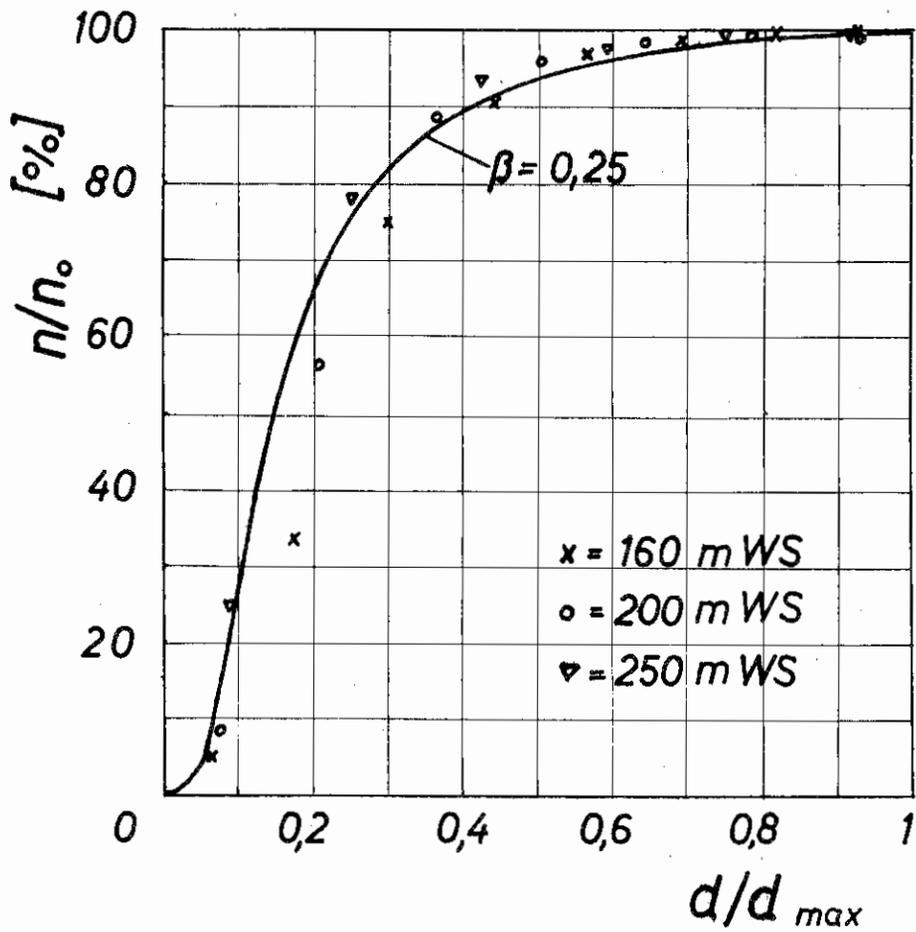


Bild 12. Tropfenverteilung im Sprühstrahl für das als Beispiel verwendete Mehrzweckstrahlrohr bei Wasserdrücken von 160, 200 und 250 m WS. Die Meßwerte gruppieren sich um die Tropfenzahlsummenkurve mit $\beta = 0,25$.

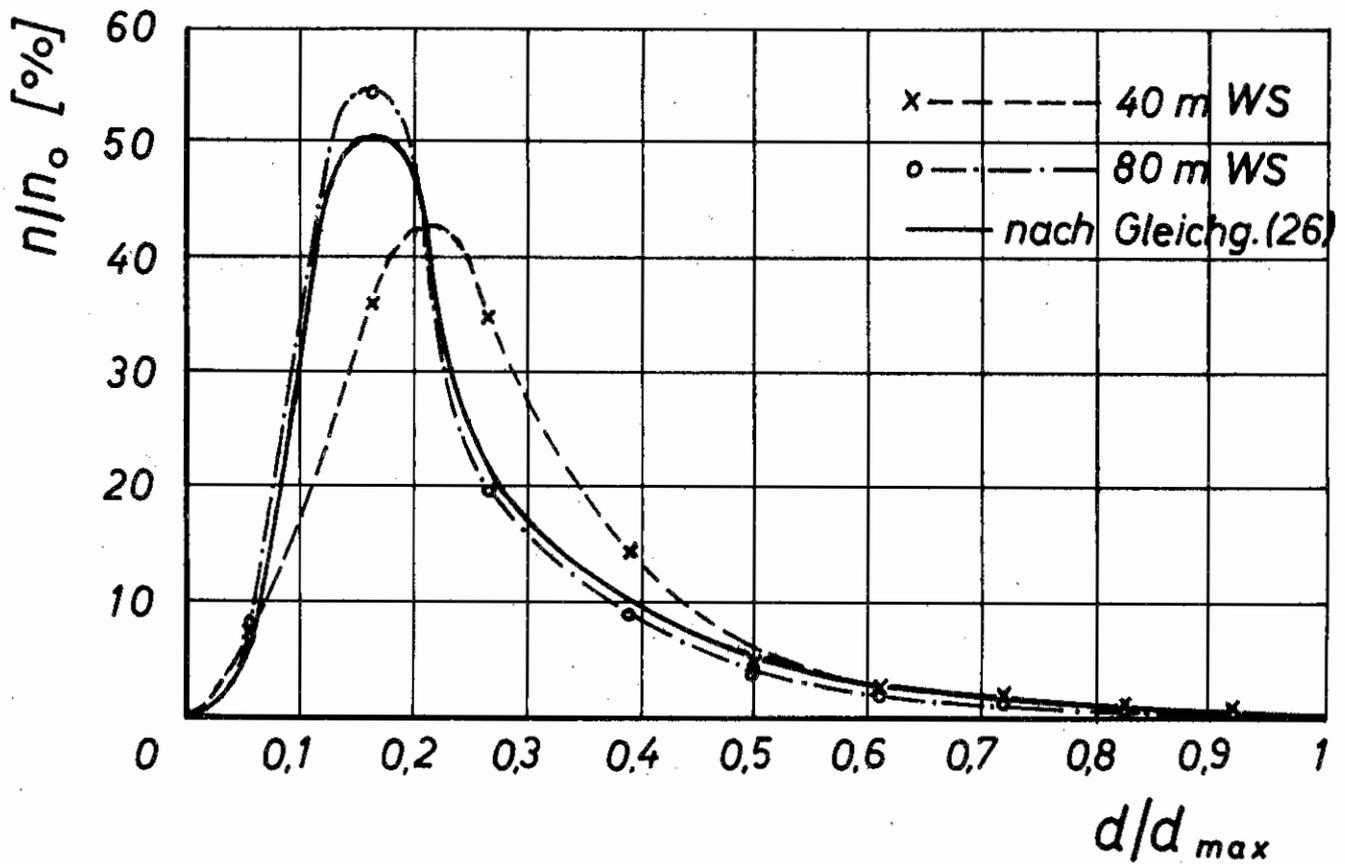


Bild 13. Verteilung der Tropfen im Sprühstrahl, einmal nach Gleichung (8) errechnet (durchgehende Linie) und zum anderen aus Messungen ermittelt (gestrichelte Linie für 40 m WS, strichpunktierte Linie für 80 m WS).

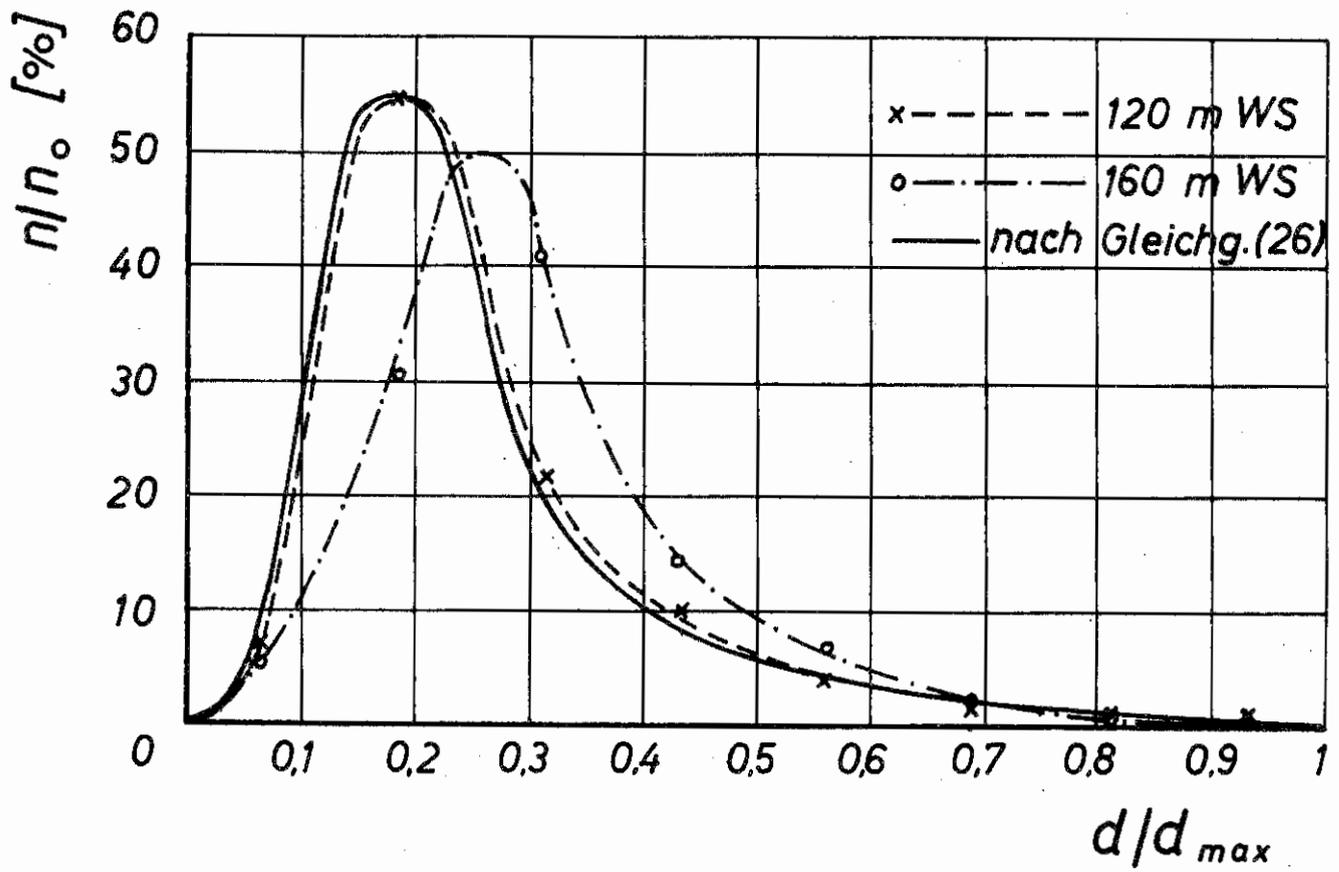


Bild 14. Verteilung der Tropfen im Sprühstrahl, einmal nach Gleichung (26) errechnet (durchgehende Linie) und zum anderen aus Messungen ermittelt (gestrichelte Linie für 120 m WS, strichpunktierte Linie für 160 m WS).

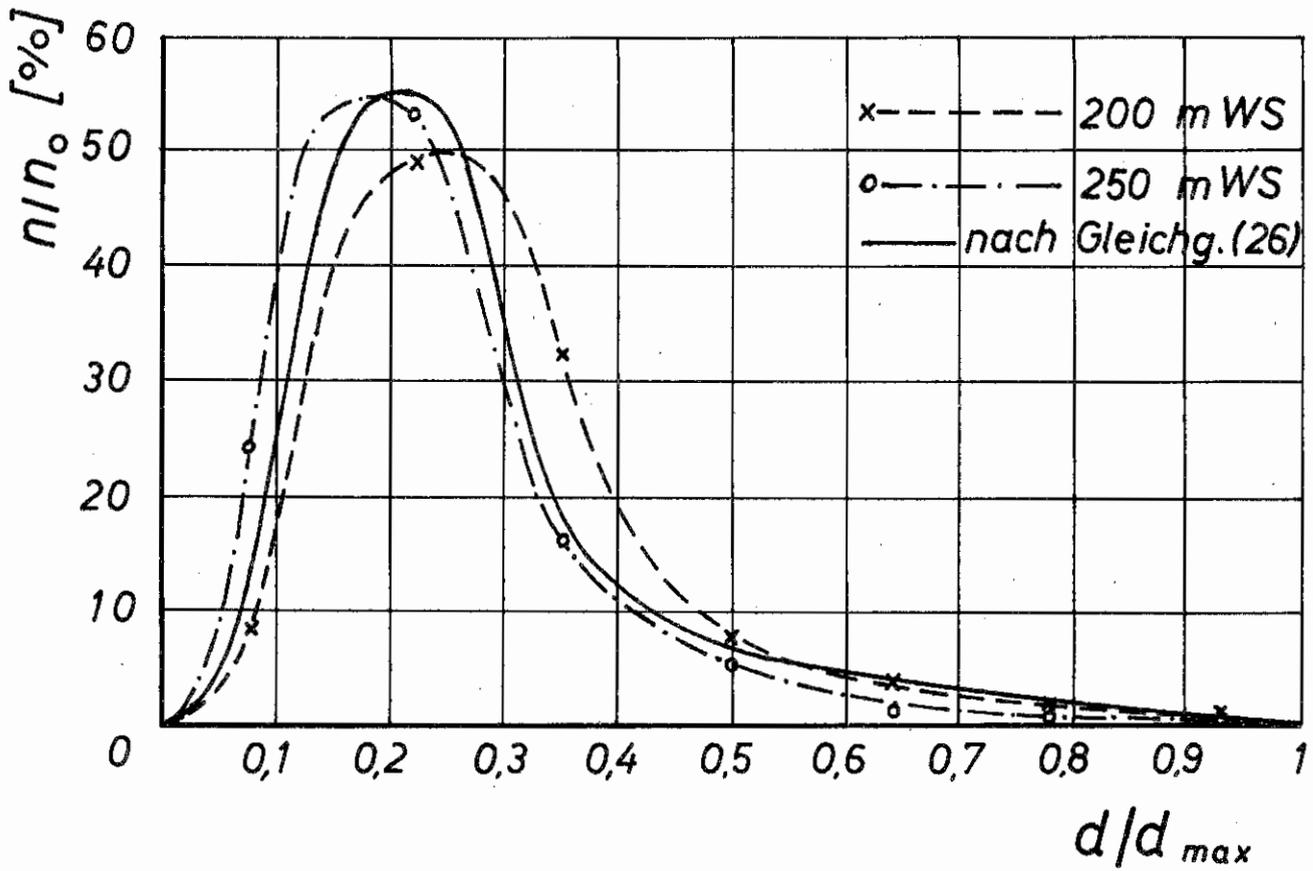


Bild 15. Verteilung der Tropfen im Sprühstrahl, einmal nach Gleichung (26) errechnet (durchgehende Linie) und zum anderen aus Messungen ermittelt (gestrichelte Linie für 200 m WS, strichpunktierte Linie für 250 m WS).

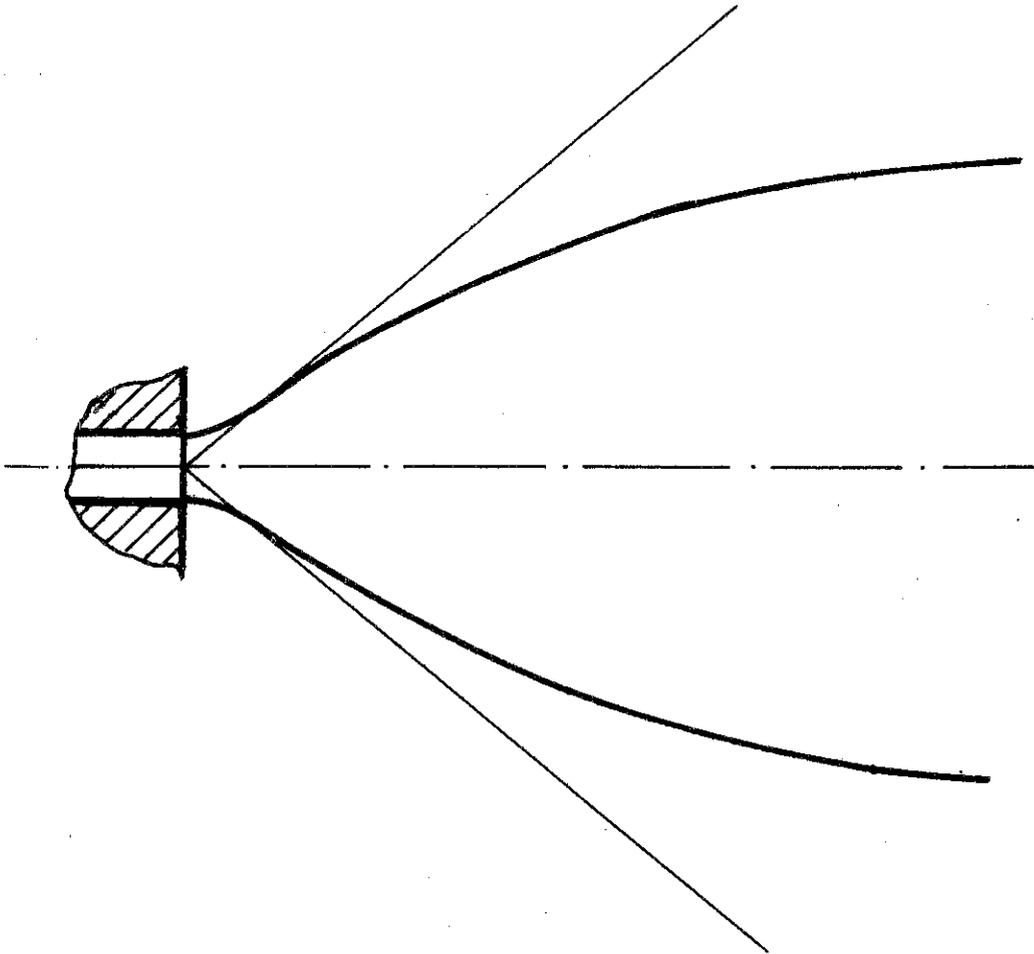
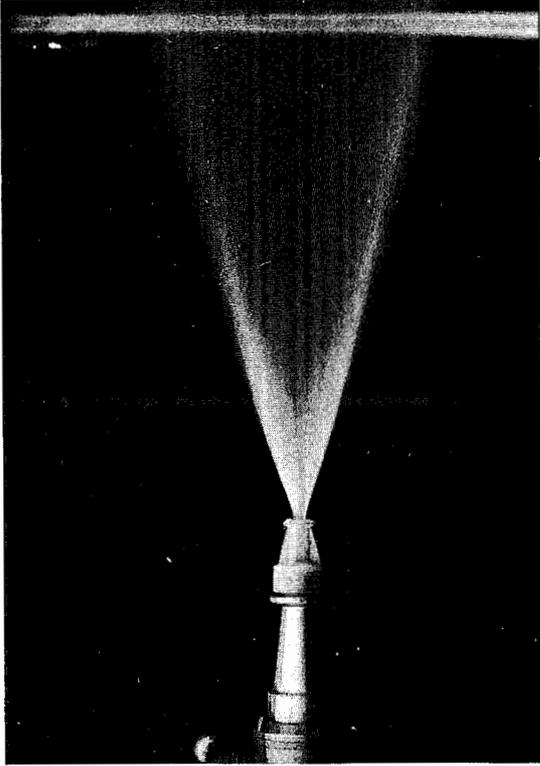
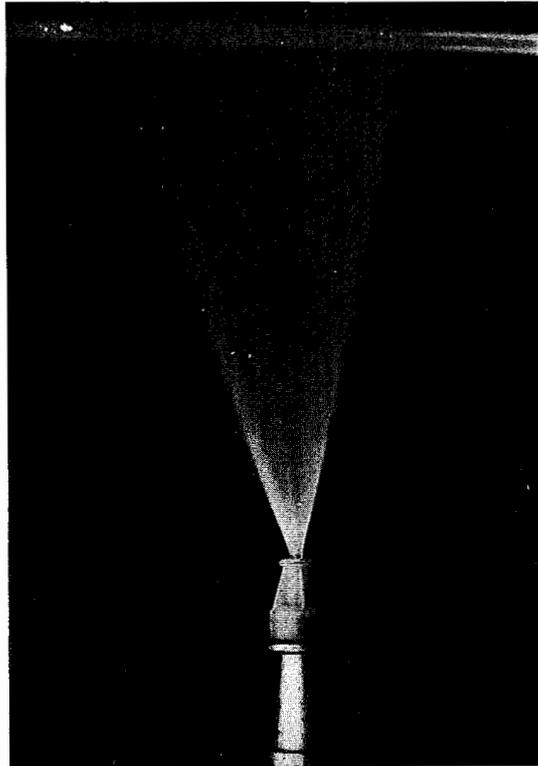


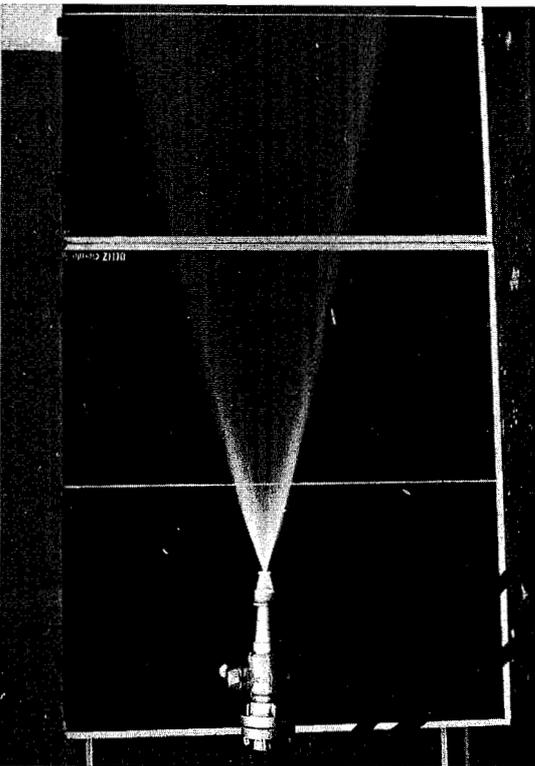
Bild 16. Äußere Kontur des sich ausbildenden Sprühstrahles bei Mehrzweckstrahlrohren mit Drallzerstäubung.



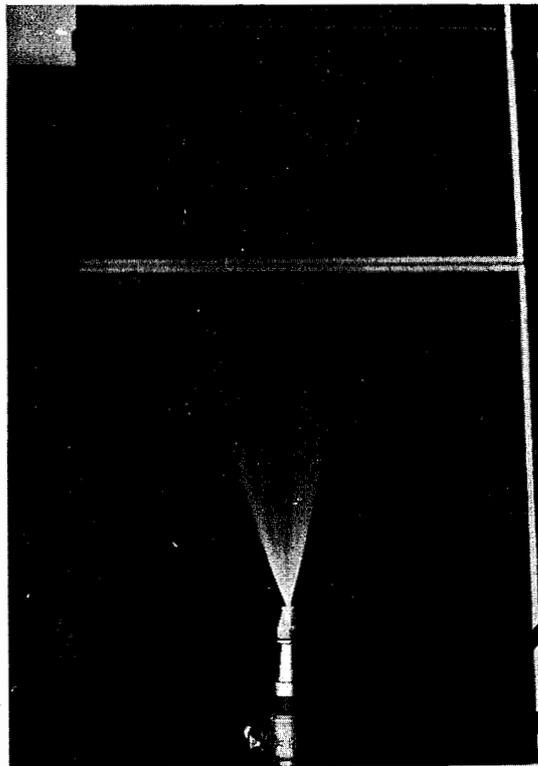
18



20

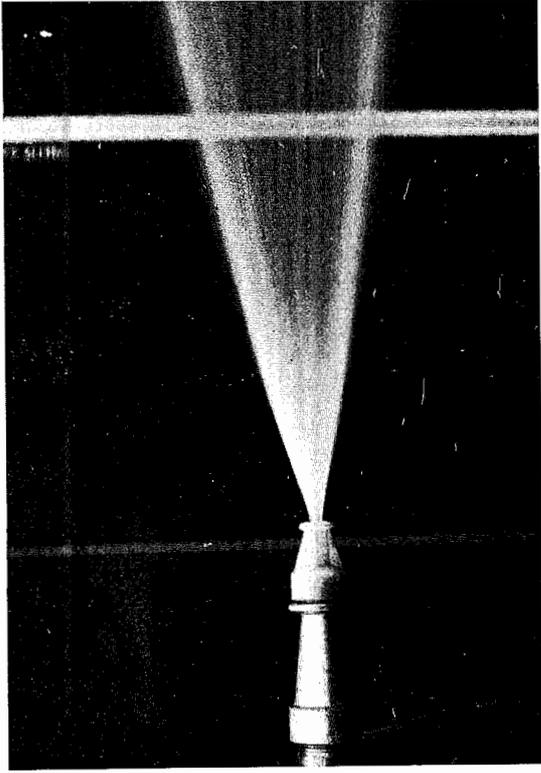


17

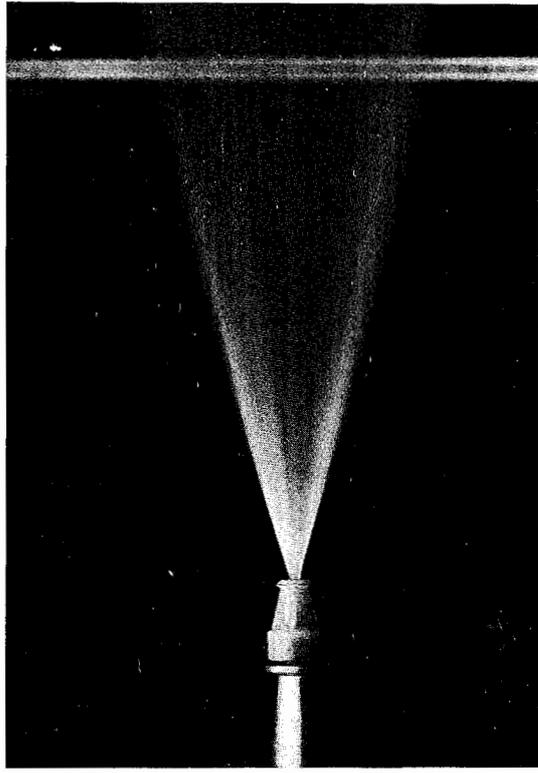


19

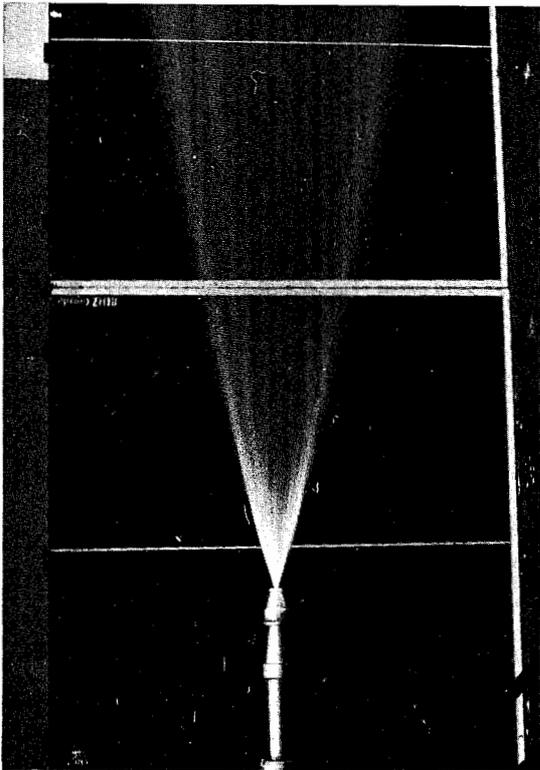
Bild 17-20. Sprühstrahlausbildung bei Veränderung der Länge des Zwischenrohres. Die rechten Aufnahmen zeigen die Ausbildung des Sprühstrahles in Großaufnahme direkt vor der Düsenmündung.



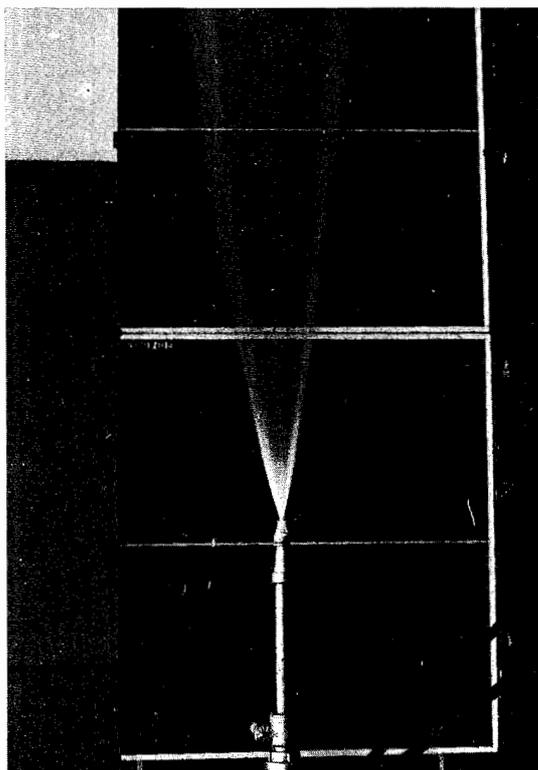
22



24

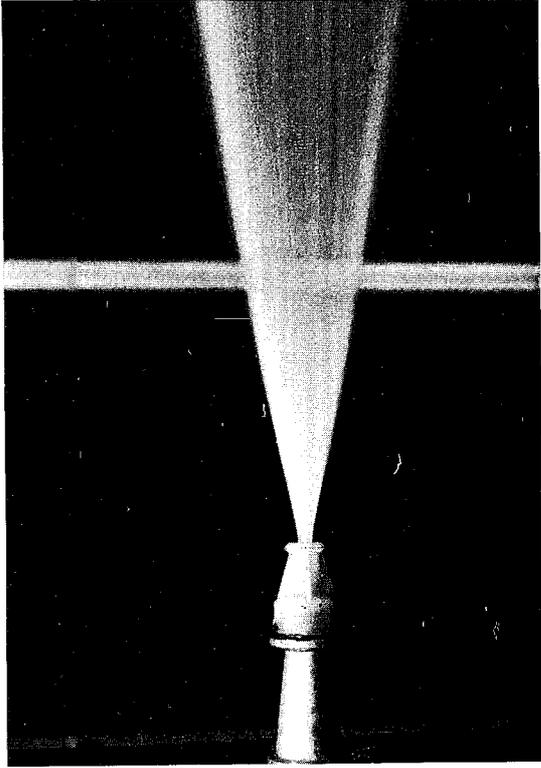


21

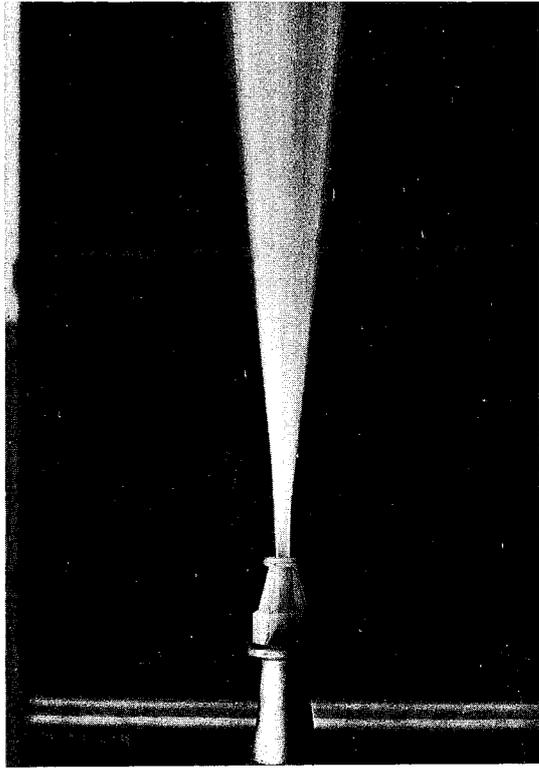


23

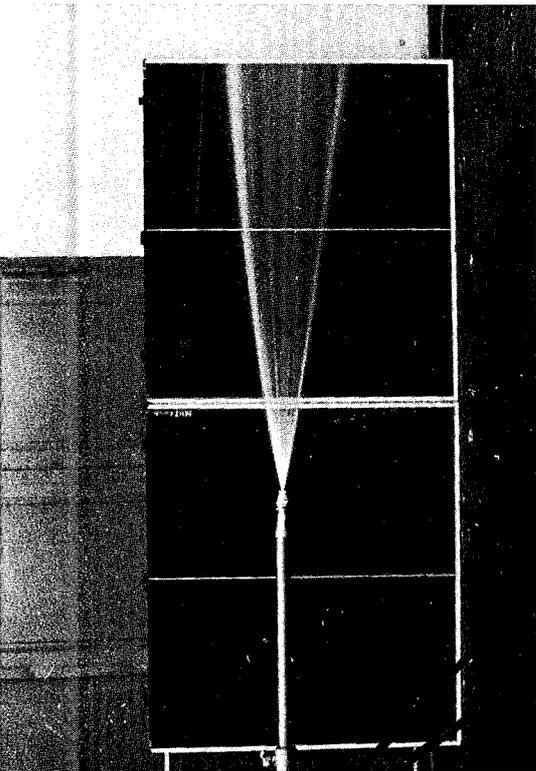
Bild 21-24. Sprühstrahlausbildung bei Veränderung der Länge des Zwischenrohres. Die rechten Aufnahmen zeigen die Ausbildung des Sprühstrahles in Großaufnahme direkt vor der Düsenmündung.



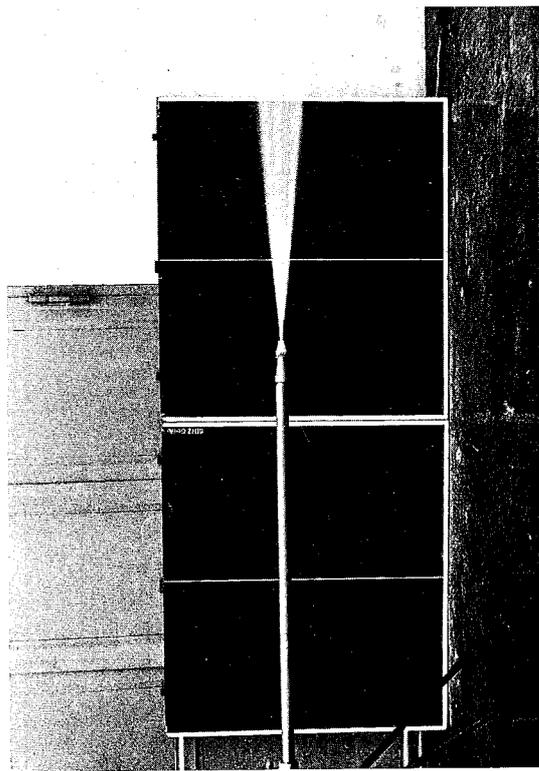
26



28



25



27

Bild 25-28. Sprühstrahlausbildung bei Veränderung der Länge des Zwischenrohres. Die rechten Aufnahmen zeigen die Ausbildung des Sprühstrahles in Großaufnahme direkt vor der Düsenmündung.

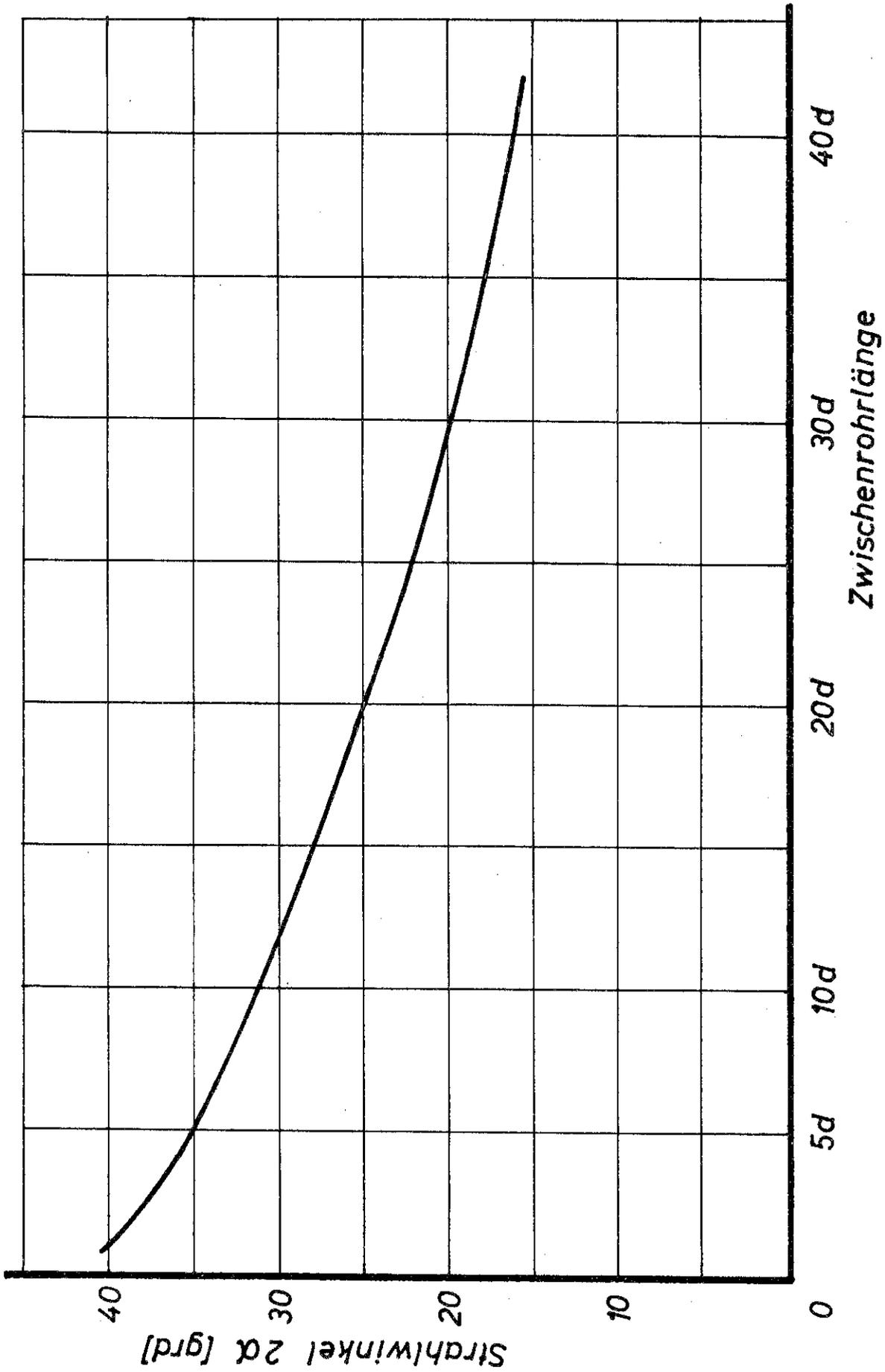


Bild 29. Der Strahlwinkel 2α bei Veränderung der Zwischenrohrlänge ($d = 35$ mm).

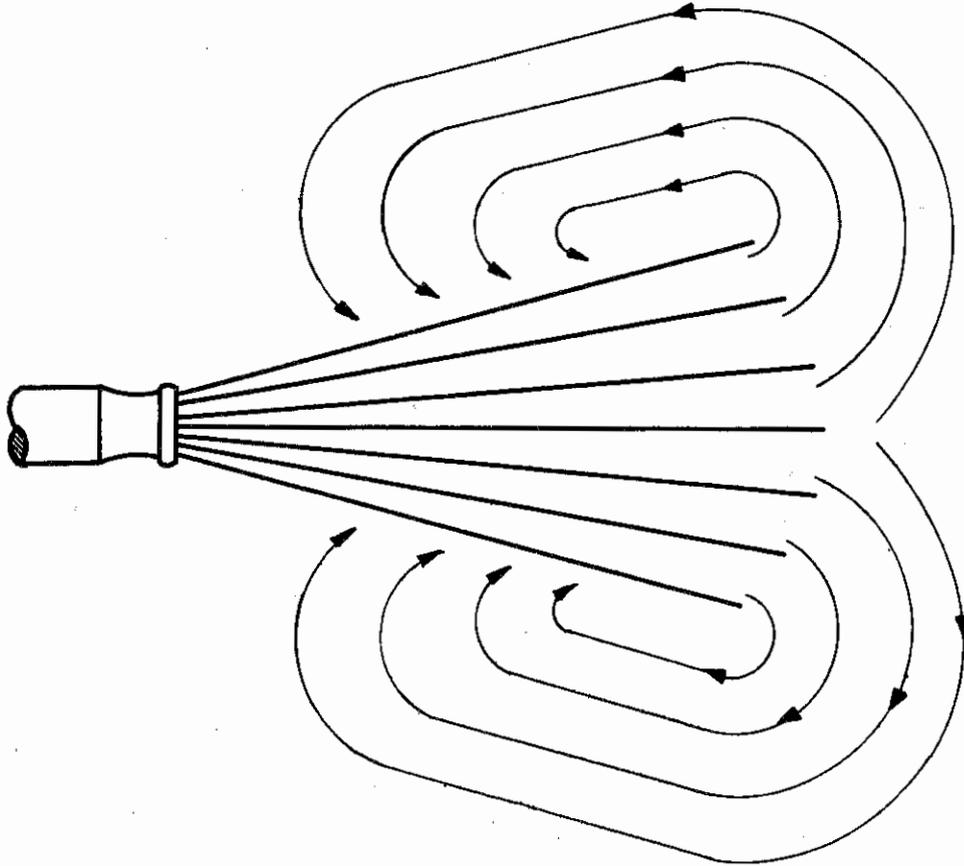


Bild 30. Luftzirkulation beim Sprühstrahl.

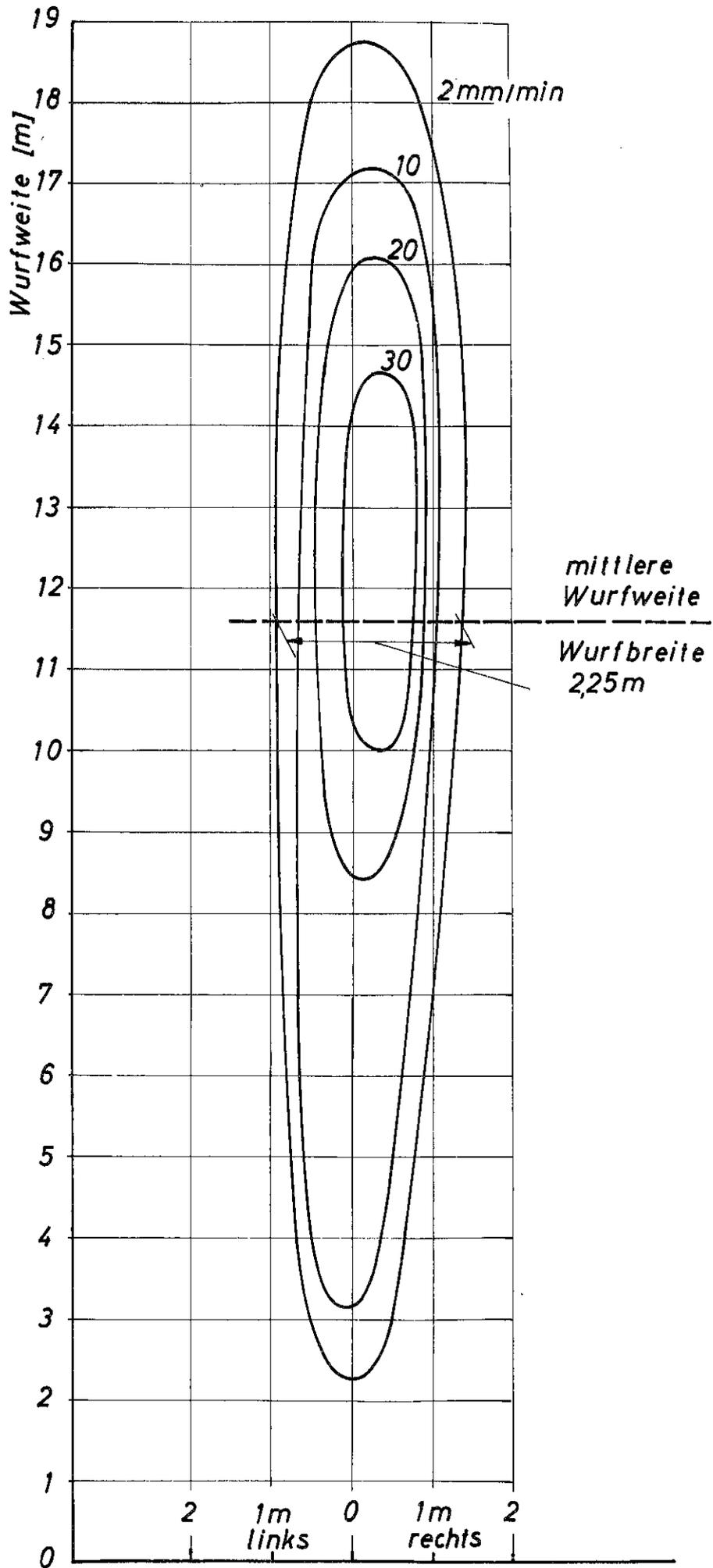


Bild 31. Wurfbild eines BM-Strahlrohres.

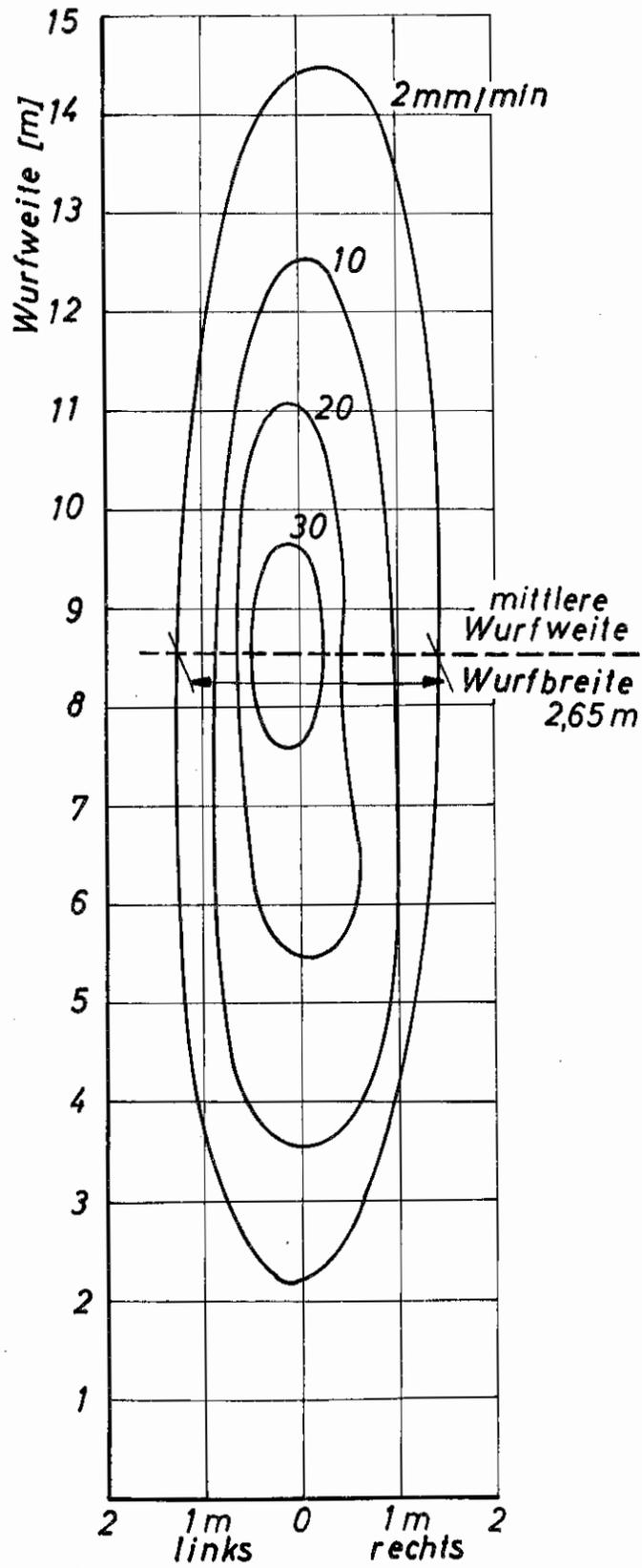


Bild 32. Wurfbild eines BM-Strahlrohres.

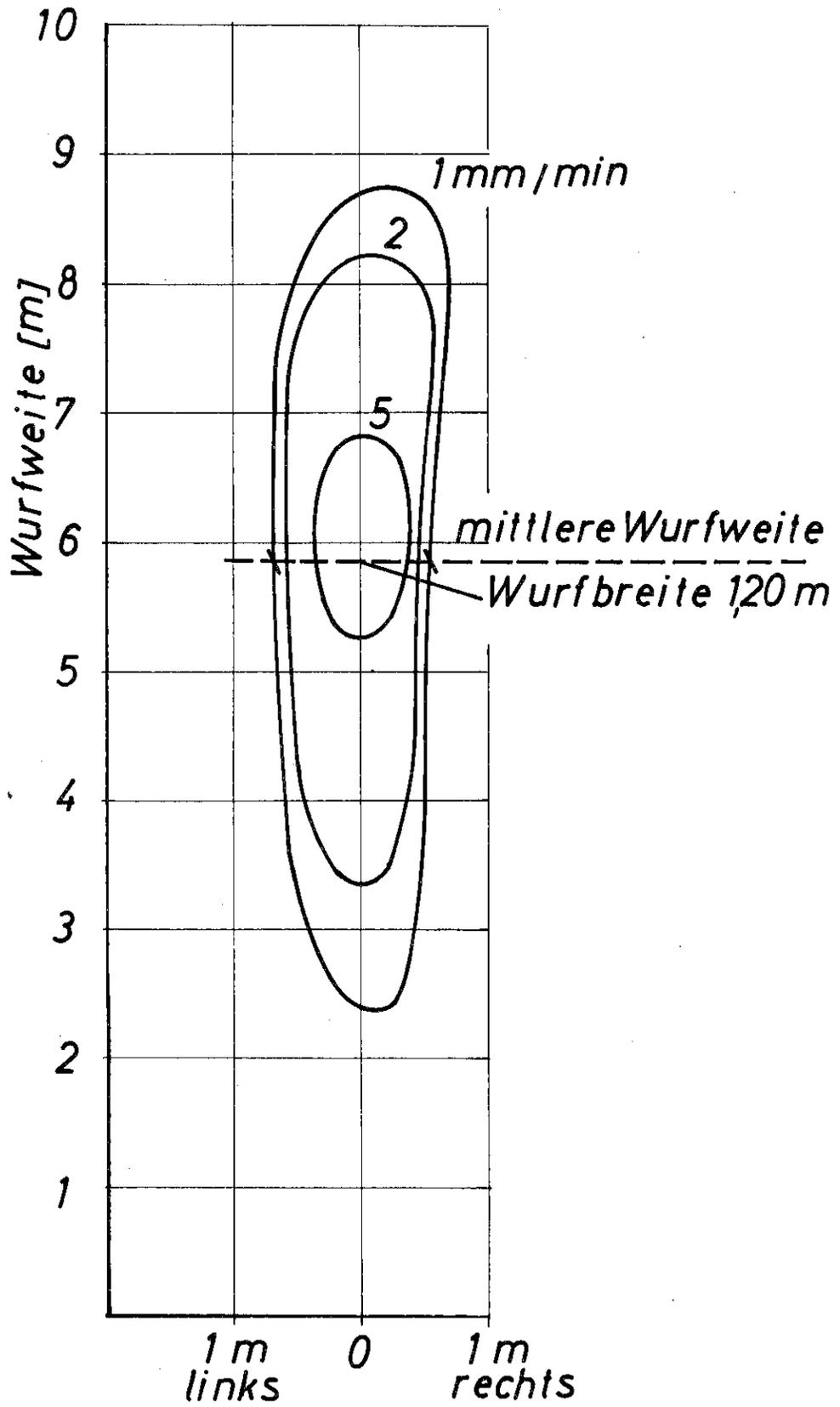


Bild 33. Wurfbild eines DM-Strahlrohres

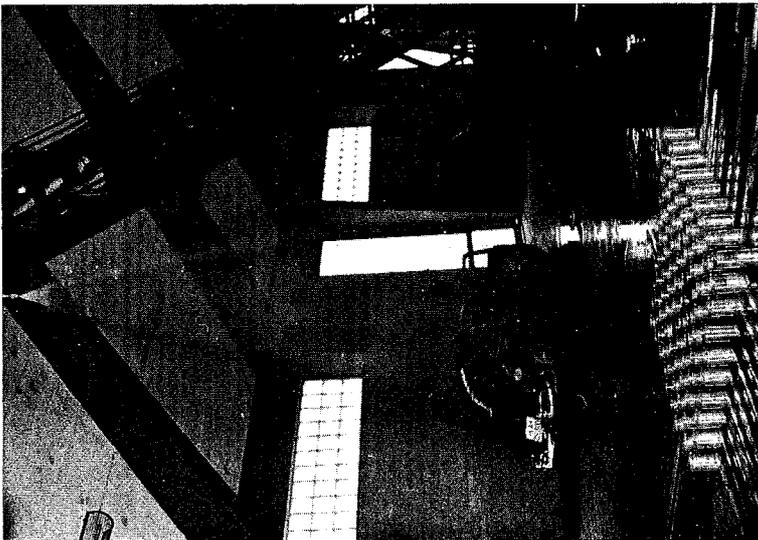
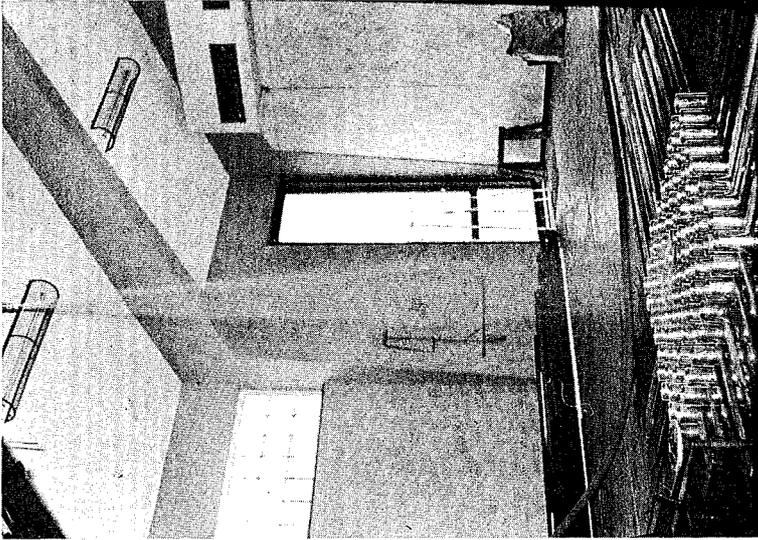


Bild 34-35. Ausbildung von Sprühstrahlen bei zwei verschiedenen Strahlrohren der Größe D und die Anordnung der Dosen am Boden zum Auffangen der abfallenden Tropfen.

Strahlrohranordnung:

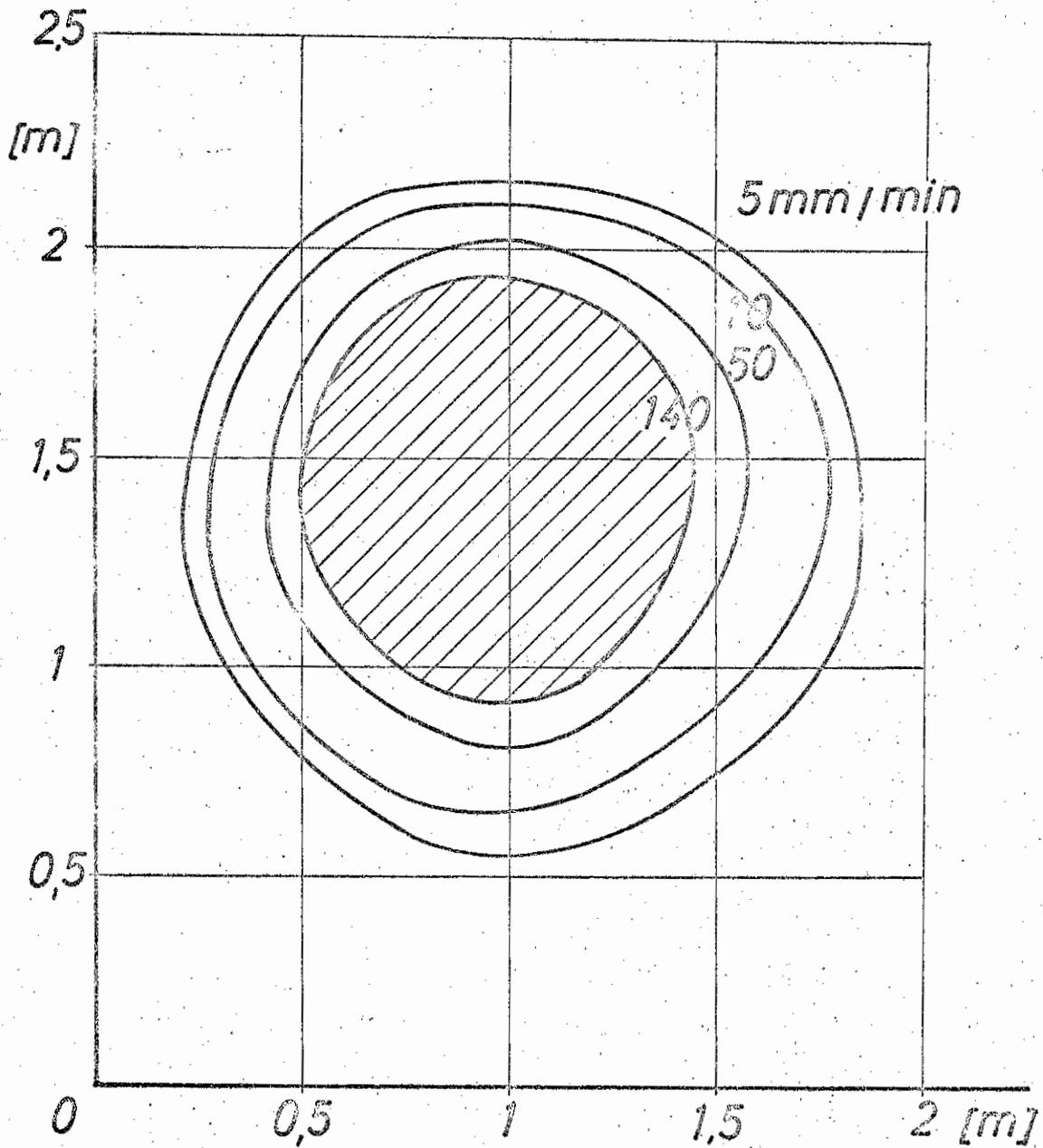


Bild 36. Querschnittsbild eines BM-Strahlrohres

Strahlrohranordnung:



5 mm / min

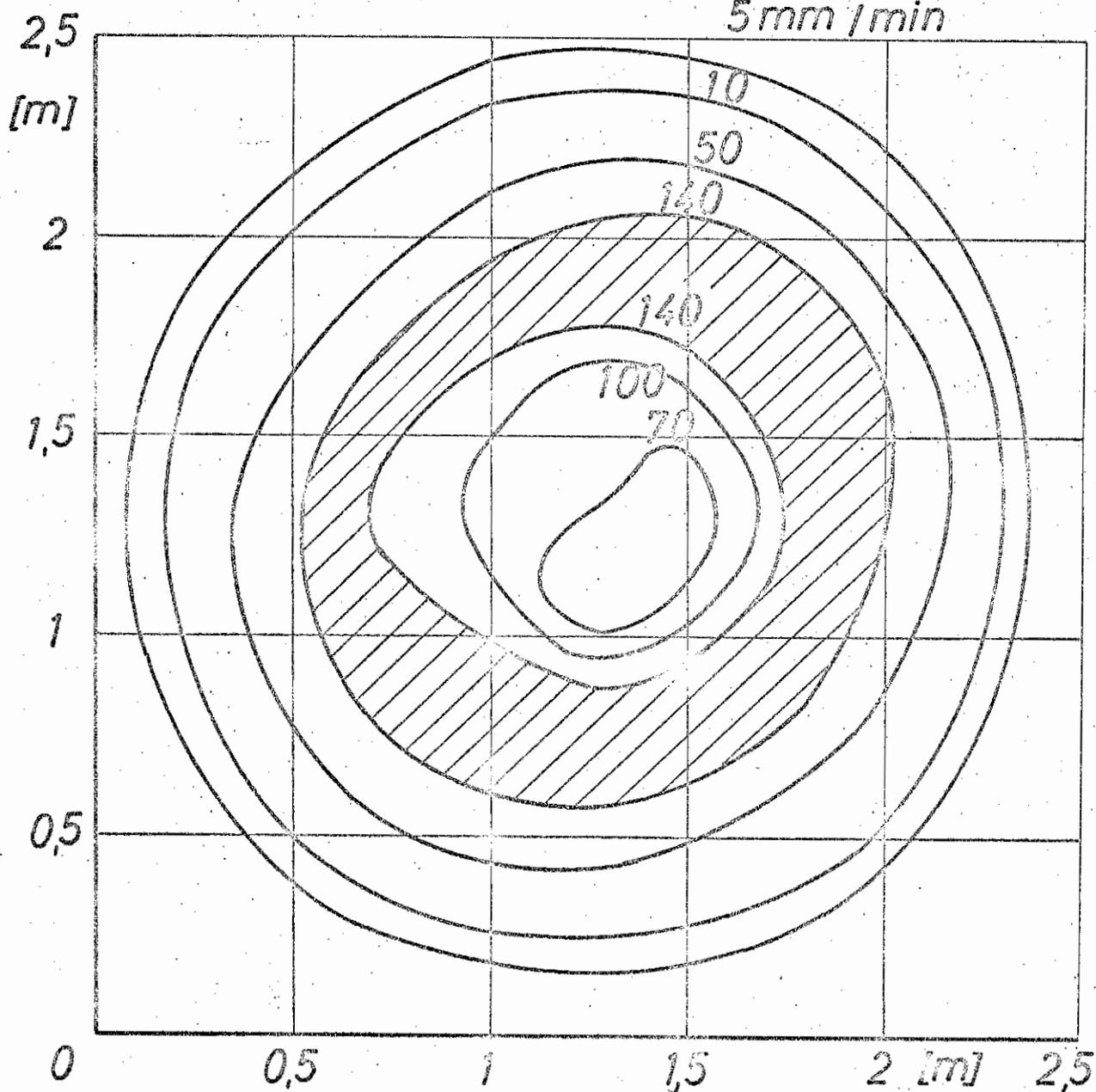


Bild 37. Querschnittsbild eines BM-Strahlrohres

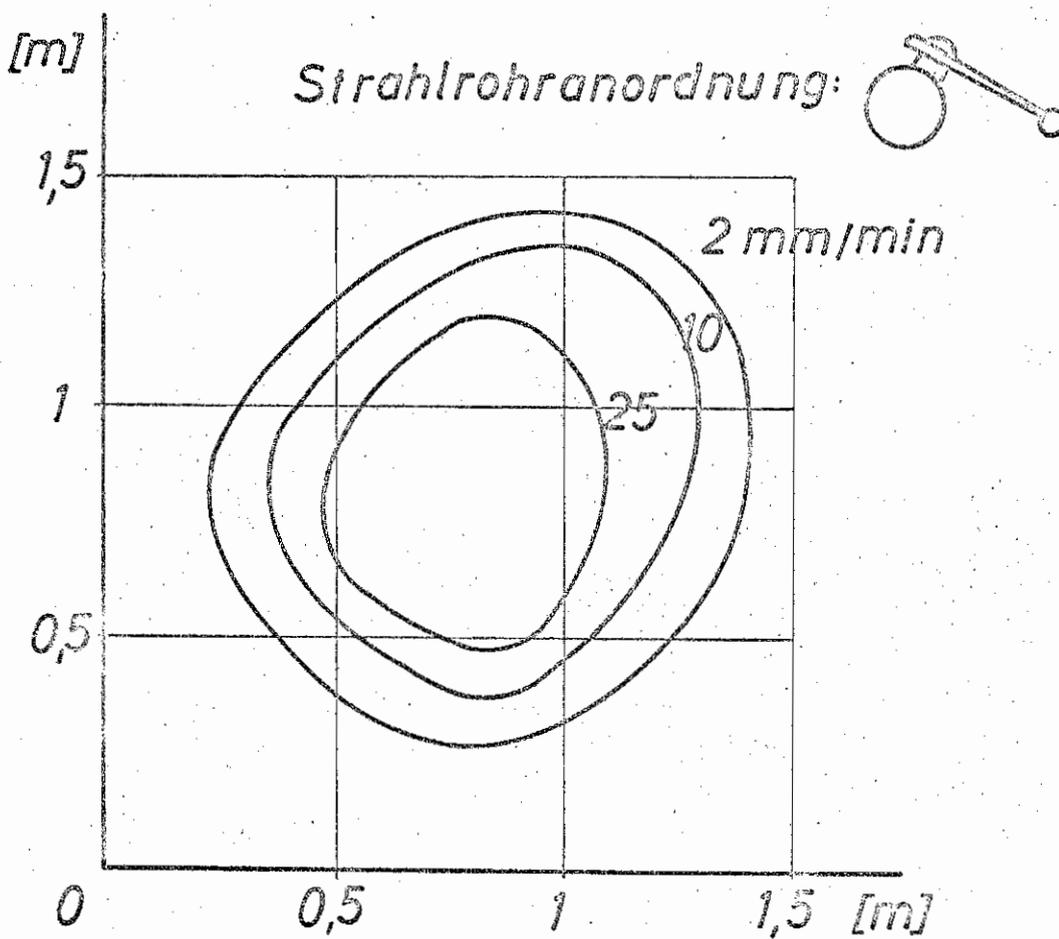


Bild 38. Querschnittsbild eines DM-Strahlrohres