

Résumé:

Prof. Dr.-Ing. K. Marks: „Hydraulische Mähantriebe.“

Mit dem Vordringen der Hydraulik im Ackerschlepperbau mehrten sich die Vorschläge, auch das Mähwerk hydraulisch anzutreiben. Im Institut für Landmaschinen der Technischen Universität Berlin wurden mehrere hydraulische Schwingantriebe entwickelt; die mit ihnen auf dem Prüfstand und auf der Wiese gemachten Erfahrungen bildeten im wesentlichen die Unterlagen für die vorliegende Arbeit. Der Verfasser untersuchte Schwingantriebe mit besonderer Pumpe und an die Schlepperhydraulik angeschlossene Mähantriebe. Ein weiteres Kapitel ist dem bei Schwingantrieben erforderlichen Ölstrom- und Massenausgleich gewidmet, und zum Schluß werden die Erfahrungen der bisherigen Mähversuche mit hydraulischen Schwingantrieben zusammengestellt.

Prof. Dr. Ing. K. Marks: "Hydraulic Transmissions for Mowers."

The increased application of hydraulic transmissions to agricultural tractors has caused a corresponding increase in the number of suggestions that mowers and mowing units should also be provided with hydraulic transmissions. The Agricultural Engineering Institute of the Technical University in Berlin has developed several types of hydraulic impulse transmissions. These have been thoroughly tested both on test beds and under actual field conditions. The results of these formed the essential basis of this article. The writer examined hydraulic transmissions using an independent pump in addition to other types of hydraulic transmissions in which the drive to the mower was directly coupled to the tractor's hydraulic system. A further chapter is devoted to a consideration of problems in the equalisation and counter-balancing of masses and oil streams necessary in hydraulic transmissions. The article closes with a summary of the results of tests made up to the time of writing with various types of hydraulic transmissions.

Prof. Dr. Ing. K. Marks: «Commande des barres de coupe.»

L'utilisation de plus en plus large de la commande hydraulique dans le domaine des tracteurs agricoles incite à proposer des systèmes hydrauliques également pour l'entraînement de la barre de coupe. L'Institut du Machinisme Agricole de l'Université Technique de Berlin a étudié plusieurs types de commande hydraulique de mouvements alternatifs. Les expériences acquises lors des essais sur le banc d'essai et dans les prairies sont l'objet de l'article présent. L'auteur a examiné des commandes alternatives, dérivant soit d'une pompe auxiliaire, soit du système hydraulique du tracteur actionnant la barre de coupe. La deuxième partie de l'exposé est consacrée à l'étude de l'équilibrage du flux d'huile et de la masse indispensable à la commande de mouvements alternatifs. L'auteur cite en conclusion les expériences acquises jusqu'ici lors des essais de coupe à l'aide de commandes hydrauliques.

Ing. Dr. K. Marks, catedrático: «Impulsión hidráulica de segadoras.»

Generalizándose cada vez más el empleo de la hidráulica en los tractores agrícolas, aumentan también los proyectos para su aplicación en las cosechadoras. Se han desarrollado varios mecanismos hidráulicos de esta clase en el Instituto de Maquinaria Agrícola de la Universidad Técnica de Berlín. Los resultados conseguidos con estos mecanismos en el banco de pruebas y en los mismos prados, sirven de base principal a este trabajo. El autor ha hecho pruebas con bombas separadas y con impulsos de los dispositivos de segar, conectados con el sistema hidráulico del tractor. Otro capítulo trata de la compensación de los circuitos de aceite, necesarios para los impulsos centrífugos y de la de las masas, recogiendo al final las enseñanzas de los ensayos hechos hasta ahora con impulsos centrífugos hidráulicos en máquinas segadoras.

Dr. C.-D. Klügel:

Transport und Auflösung von Zweiphasengemischströmungen

Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen

Aufgabe dieser Arbeit¹⁾ war es, grundlegende Erkenntnisse über die Strömung eines gasförmigen und flüssigen Mediums in einer Leitung zu sammeln, oder soweit nötig, neu zu gewinnen, und zwar nur in einem für die Pflanzenschutztechnik interessierenden Bereich. Die Ergebnisse mögen dem Konstrukteur von Sprühgeräten eine rechnerische Handhabe geben. Die Bemühungen, das Zweiphasenfließ-System im Sprühgerätebau zu verwenden, sind nicht neu. Trotzdem waren aber die meisten Entwicklungen unbefriedigend und wurden wieder aus dem Handel gezogen, weil unkontrollierbare Vorgänge im Strömungsbild des Gemisches die Betriebssicherheit der Aggregate in Frage stellten.

Es ergeben sich somit folgende Aufgaben:

1. Der für das Sprühen in Betracht kommende Strömungsbereich ist durch meßbare Größen zu umreißen.
2. Es muß der Druckabfall bei der Strömung eines definierten Gemisches über eine bestimmte Strecke zu berechnen sein. Das ist erforderlich, um die nötigen Rückschlüsse auf den Energiebedarf der Phasenförderaggregate ziehen zu können.
3. Es wird zu untersuchen sein, ob und in welchem Umfang Schlauchkrümmungen auf das Strömungsgefüge Einfluß nehmen.

4. Auch die Strömungsverhältnisse an der Sprühdüse müssen kontrolliert werden, weil zu erwarten ist, daß die geometrische Abmessung der Querschnittsverengung das Gesamtfließsystem maßgeblich beeinflußt.

Die Versuchseinrichtung

Im folgenden wird der technische Aufbau der verwendeten Versuchseinrichtung beschrieben, wie sie in Abbildung 1a, b, c, dargestellt ist. Die benötigte Luft wurde von einem Druckkessel (2) geliefert, der an einem Kompressor (1) angeschlossen war. Die Druckleitung führte von da zum Reduzierventil (3). Schlauchleitungen mit einem Durchmesser von 8 mm (4) verbanden es mit dem Brühbehälter (6) vom Inhalt 25 Liter. Im Kessel hielt ein geführter Schwimmer (7), an dem seitlich das Injektormischrohr (8) verstellbar angebracht war, den Abstand der Luftdüsen (8a) zur ständig sinkenden Flüssigkeitsoberfläche bei Betrieb der Anlage konstant. Am Injektorhals wurde der Schlauch (9) befestigt, der über ein Kupplungsstück (6a) am oberen Kesseldeckel nach außen führte und nun als Sprühschlauch (10) bezeichnet werden soll. Um ihn in genau definierte Windungen legen zu können, wurden zylindrische Formstücke (17) hergestellt. Die Vorgänge in der Leitung konnten durch das aus Jenaer Glas hergestellte, etwa 50 cm lange Sprührohr (11), beobachtet werden. An seiner Drossel (22) mit definierter Abmessung wurde das Gemisch versprüht.

Mit Hilfe eines Strömungsmessers (5) konnte die Luftdurchflußmenge bestimmt werden²⁾.

¹⁾ Die vorliegende Untersuchung wurde im Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen durchgeführt. Die Versuche mußten zum großen Teil im Laboratorium des Institutes für Strömungsphysik der Max-Planck-Gesellschaft in Göttingen wegen der dort vorhandenen technischen Einrichtungen ausgeführt werden. Dem Direktor dieses Institutes, Herrn Professor Dr. Betz sage ich zugleich im Namen des Verfassers für das wertvolle Entgegenkommen herzlichen Dank.

Prof. Dr.-Ing. K. Gallwitz

²⁾ Genaue Beschreibung der Meßtechnik siehe [11]

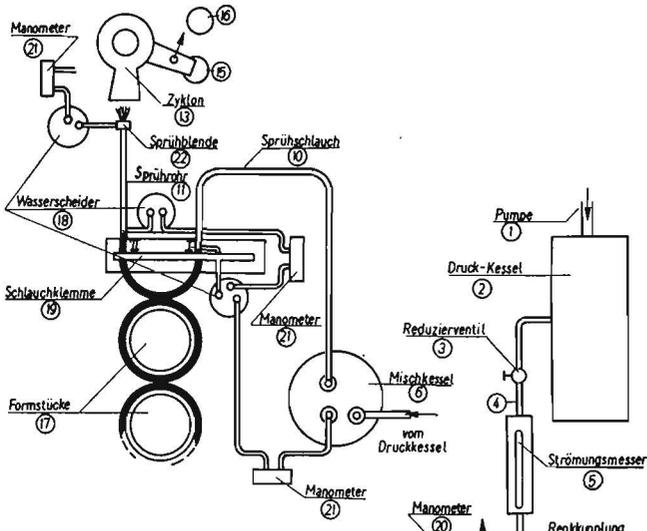


Abb. 1 a

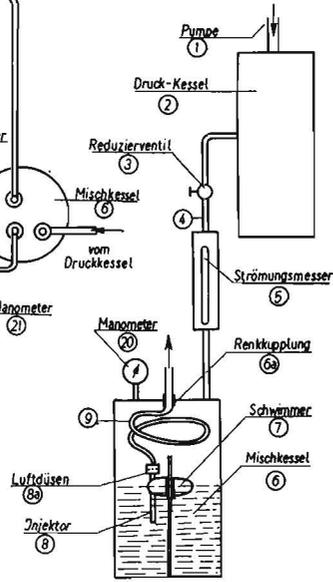


Abb. 1 b

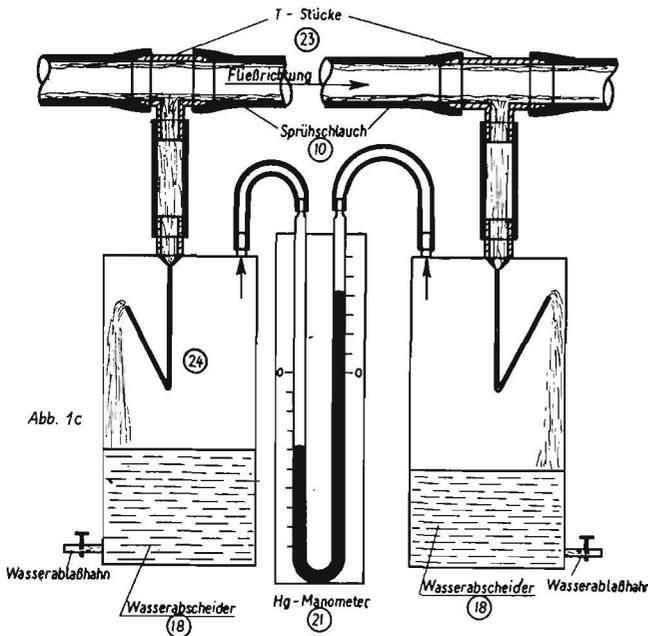


Abb. 1: Versuchseinrichtung

Die ausgespülte Wassermenge wurde in einem Zyklon (13) aufgefangen und konnte in Meßgläsern (15, 16) ausgelitert werden²⁾.

Durch zwischengeschaltete Schlauchklemmen (19) ließen sich die Versuche schlagartig unterbrechen und die im Leitungsteil eingeschlossene Luft-Wasser-Menge quantitativ erfassen [11, 14]. Diese Maßnahme spielte besonders bei der Bestimmung der mittleren Filmdicke eine wesentliche Rolle.

Zur Ermittlung der statischen Drücke wurden zwischen die Schlauchstrecken T-Stücke (23) geschaltet. Die Manometeranschlußleitungen führten über Wasserabscheider (18). Die zum Teil nicht unerheblichen Druckschwankungen wurden durch Querschnittsverengungen im Meßsystem (24) ausgeglichen (Abb. 1c).

Die flüssige Phase bestand bei allen Versuchen aus Leitungswasser, weil es stofflich der im Pflanzenschutz verwendeten

Brühe am nächsten kommt. Die gefundenen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigen aber meist auch Zähigkeit, Oberflächenspannung und spezifisches Gewicht. Sie gelten deshalb nicht nur für Wasser allein, sondern im gewissen Umfang auch für die in der Schädlingsbekämpfung gebräuchlichen Brühen. Die Temperatur von Luft und Wasser in der Anströmung wurde bei 15° C konstant gehalten.

Fließarten

Über das umfangreiche Gebiet der Zweiphasenströmung in Schlauchleitungen ist nur verhältnismäßig wenig veröffentlicht worden [1-3, 5, 6, 8-10, 12-19, 22, 25-27]. Immer wieder wird auf die Schwierigkeiten bei der Erforschung der hier vorliegenden Gesetzmäßigkeiten hingewiesen. Verständlicherweise waren die ersten Untersuchungen auf diesem Gebiete darauf gerichtet, visuelle Beobachtungen bei der Gemischströmung festzuhalten, und so weit wie möglich in ein System zu bringen. So untersuchte Alves [2] eine Wasserströmung, die er zunehmend mit Luft versetzte und erkannte dabei eine sichtbare Umstellung in den Strömungsformen. Er beschrieb sie wie folgt (Abb. 2):

1. Bubble-flow. Luftblasen bewegen sich längs der Schlauchoberseite, und zwar mit etwa derselben Geschwindigkeit wie das Wasser.
2. Plug-flow. Hier tritt ein wechselseitiger Transport von Luft- und Wasserblasen auf.
3. Stratified-flow. Die Flüssigkeit strömt am Boden der Rohrleitung; über ihrer glatten Oberfläche bewegt sich das Gas.
4. Wavy-flow. Er ist dem stratified-flow ähnlich; nur wird die relative Wasserhöhe im Schlauch kleiner. An der freien Oberfläche der Medien kommt es zur Ausbildung von Wellen.
5. Slug-flow. Die Wellenkämme erreichen jetzt die obere Schlauchwandung; es kommt zum schubweisen Transport des Wassers, weil die Flüssigkeit der Luft nahezu vertikale Anströmlächen bietet.
6. Annular-flow = Filmfluß. Bei dieser Fließart legt sich die Flüssigkeit als Mantel an der gesamten Schlauchwandung an. Das Wasser wird durch die an der Trennungsfäche der Medien wirksamen Schubspannungskräfte in Richtung des Gasflusses vorwärts bewegt.
7. Spray-flow = Sprühfluß. Nunmehr ist die Flüssigkeit in Tropfen aufgelöst und passiert in einem mehr oder minder homogenen Gemisch die Schlauchleitung.

Man war nun natürlich bestrebt, auch die Faktoren zu ermitteln, welche die genannten Fließzustände beeinflussen oder hervorrufen. Alves entwickelte ein Diagramm (Abb. 3), in dem er die Grenzen der Fließarten in Abhängigkeit von den Phasen-Durchfluß-Gewichten auftrug. Diese Darstellung gilt zwar nicht exakt, weil fließende Übergänge die genannten Grenzen nicht sicher fixieren lassen, doch konnten erstmalig die Fließzustände einer Zweiphasenströmung durch meßbare Größen angenähert festgelegt werden. Als Nachteil der ge-

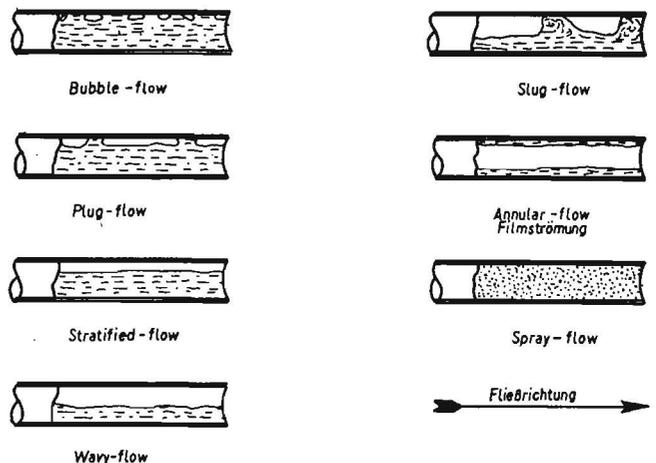


Abb. 2: Fließartensystem nach Alves

nannten Darstellung muß empfunden werden, daß es nur für Gemischströmungen in Leitungen vom Durchmesser 28 mm gilt. So verschoben sich dann auch bei den Untersuchungen des Verfassers für 8-mm-Schläuche die Fließartenübergänge im Achsenkreuz.

Den Versuch, eine vom Rohrdurchmesser unabhängige Betrachtung der Fließarten zu erreichen, wurde von Johnson [10] unternommen. Er definierte die Übergänge der Fließarten mit Hilfe der Phasengeschwindigkeiten. Bei seinen Untersuchungen mit einem Rohr vom Durchmesser 28 mm fand er Strömungsformgrenzen, wie sie in Abbildung 4 wiedergegeben sind. Bei der empirischen Nachprüfung des Johnsonschen Diagramms mit Rohrdurchmessern von 8 mm, ordneten sich die Meßpunkte des Verfassers recht gut in das genannte Schema ein. Leider konnte keine Grenze zwischen Film- und Sprühfluß gefunden werden.

Bei der Strömung eines Zweiphasengemisches sind nach der Alves'schen Definition 7 Fließarten möglich. Es ist nun zu untersuchen, welche davon für die Sprühtechnik interessieren.

Beim Sprühen im hier gebrauchten Sinne muß das Volumen der entspannten Luftausbringung stets ein Vielfaches von dem der Brühe betragen [7]. Damit lösen sich vorerst die folgenden Strömungsbereiche als brauchbar heraus:

1. Wavy-flow;
2. Slug-flow;
3. Filmfluß;
4. Sprühfluß.

Nun wird sich aber der wavy-flow wahrscheinlich als ungünstig für die Verwendung beim Sprühen erweisen, weil, wie man später noch sehen wird, die Brühe am Boden der Schlauchleitung fließend, kaum gleichmäßig von der Düse ausgebracht werden kann. Abgesehen davon, dürfte der Luftanteil bei dieser Fließart noch zu gering sein. Der slug-flow scheidet von vornherein aus, weil diese pulsierende Strömung ja die Ursache für die beschriebenen Mißerfolge bei Zweiphasensprühgeräten war.

Beim spray-flow ist nun ein ständiger Energieaufwand notwendig, um die völlig unnötige Auflösung der Flüssigkeit über die gesamte Schlauchlänge aufrecht zu erhalten. Da man aber an einem möglichst reibungsarmen und energiesparenden Transport des Gemisches interessiert ist, wird letztlich der Filmfluß als günstigstes Hilfsmittel für den Transport von Brühe-Luft-Gemischen bei Sprüngeräten zu betrachten sein. Dieser Filmfluß wird nun auch im folgenden auf seine Brauchbarkeit für den beschriebenen Zweck untersucht.

Berechnung des Druckabfalles einer Zweiphasenströmung über eine bestimmte Leitungslänge

Nach dem Aufbau der Themastellung ist nach einem rechnerischen Lösungsweg zur Bestimmung des Druckabfalls eines Zweiphasengemisches innerhalb einer bestimmten Leitungstrecke zu suchen. Es müßte vorteilhaft sein, wenn dabei gleichzeitig die grundlegenden Zusammenhänge dieser Strömung geklärt werden könnten. Diese Fragen behandelt eine Arbeit von Lockhart und Martinelli [14]. In der Originalarbeit [11] wird diese Theorie im einzelnen erörtert und nachgewiesen, daß sie die vorliegenden Zusammenhänge nur angenähert erfaßt. Auch eine Reihe anderer Autoren [9, 14] zweifelt die Sicherheit der Lockhart-Martinellischen Methode an, weil Rechen- und Versuchsergebnisse nicht unerheblich voneinander abweichen. Damit soll jedoch keineswegs der Wert der umfangreichen Arbeiten geschmälert werden, zumal sie die ersten auf diesem Gebiete sind, mit denen rechnerisch Zweiphasenströmungen erfaßt werden konnten.

Der Verfasser stellte sich nun die Aufgabe, mit Hilfe der verschiedenen bisher gesammelten Erkenntnisse und neueren Überlegungen eine Berechnungsgrundlage für die Zweiphasenströmung zu schaffen, die abweichend vom Lockhart-Martinellischen Ansatz die Verhältnisse von den Grundlagen her entwickelt.

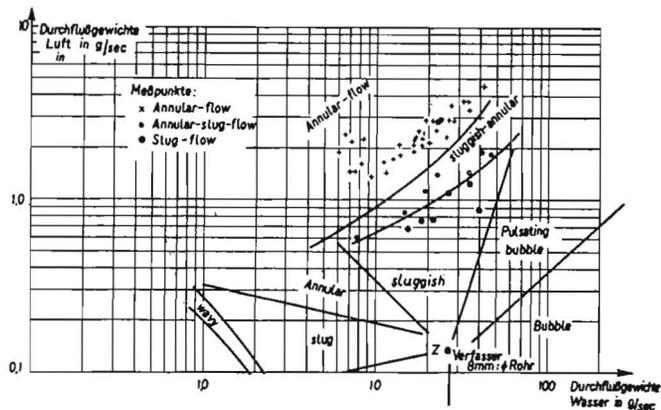


Abb. 3: Fließartenübergänge (Schema Alves) Durchmesser des verwendeten Rohres: 8 mm (Meßpunkte: Verfasser)

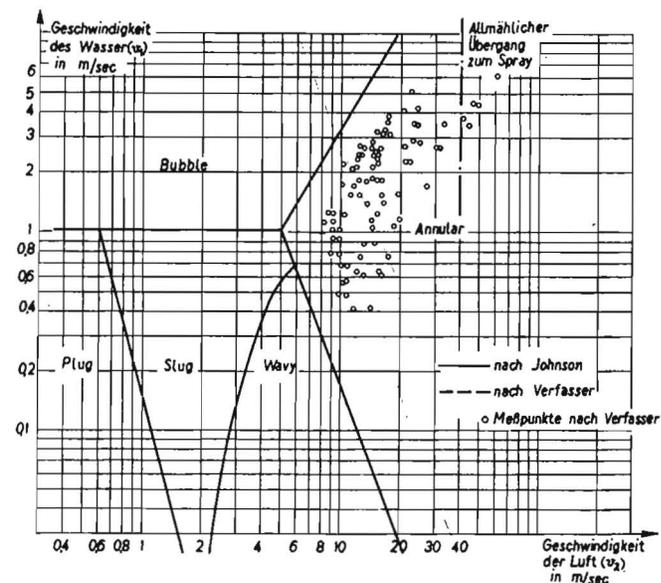


Abb. 4: Fließartenübergänge nach Johnson (Meßpunkte: Verfasser)

Es darf vorausgesetzt werden, daß bei der Strömung eines Zweiphasengemisches der statische Druck über den gesamten Querschnitt des Schlauches gleich ist. Danach müssen auch die Druckabfälle der beiden Phasen über eine bestimmte Leitungslänge gleich sein.

Es ist also

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_1 = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_2 = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{2p} \quad (1)$$

Es bedeuten:

- Δp = Druckunterschied zwischen zwei Meßstellen (kg/m^2)
- Δl = Längenunterschied zwischen zwei Meßstellen (m)

Indizes:

- 1 = flüssige Phase
- 2 = gasförmige Phase
- 2p = Gemischströmung

Will man nun den Druckabfall einer Phase berechnen, dann gilt als Voraussetzung, daß die Strömung einer der beiden Medien untersucht werden kann, ohne daß sie aus dem Zweiphasensystem gelöst zu werden braucht.

Falls dies gelänge, könnten die bei der Einphasenströmung geltenden Gesetzmäßigkeiten direkt auf die Berechnung von Zweiphasenströmung übertragen werden. Die gewünschten Voraussetzungen sind für die Gasströmung beim zu untersuchenden Filmfluß gegeben. Sie ist nämlich vergleichbar mit einer Luftströmung in rauhen Rohren. Betrachtet man dazu die Trennungsfläche Wasser-Luft als effektive Rohrwand, dann bewegt sich die Luftströmung in einem mit Filmbereichsgeschwindigkeit (v_1) bewegtem System (Abb. 5). Es läßt sich zur Bestimmung des Druckabfalls einer Gasströmung die allgemeine Reibungsgleichung heranziehen

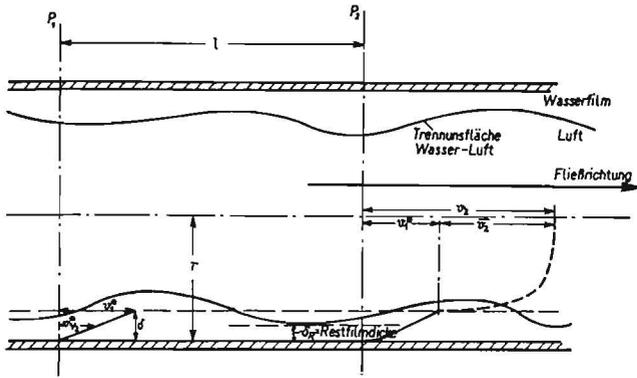


Abb. 5: Schematische Darstellung einer Filmströmung

Fall I:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_2 = \frac{\lambda \cdot \rho_{2g} \bar{v}_2^2}{2 \cdot d_2} \quad (2)$$

In dieser Gleichung bedeuten:

$(\Delta l / \Delta p)_2 = (\Delta p / \Delta l)_{2p}$ = Druckabfall der Luft und damit zugleich der Zweiphasenströmung über eine bestimmte Leitungsstrecke (kg/m^2)

ρ_{2g} = Dichte der gespannten Luft ($\text{kg sec}^2/\text{m}^4$)

λ = Rohrreibungszahl

d_2 = Mittlerer Durchmesser der Luftströmung (m)

\bar{v}_2 = Mittlere relative Luftgeschwindigkeit (m/sec)

Nach Abbildung 5 ist der Durchmesser der mittleren Luftströmung folgendermaßen definiert

$$d_2 = d_s - 2\delta = 2(r - \delta) \quad (3)$$

Es bedeutet:

δ = Mittlerer Abstand der welligen Filmoberfläche von der Rohrwand = mittlere Filmdicke (m bzw. mm)

d_s = Schlauchdurchmesser (m bzw. mm)

Die mittlere Filmdicke kann an jeder Stelle einer Zweiphasenströmung mit Hilfe der Abklemmmethode ermittelt werden [11, 14]. Der Schlauchdurchmesser (d_s) ist ohne Schwierigkeiten zu messen. Damit ist die Größe des mittleren Durchmessers der Luftströmung (d_2) rechnerisch und empirisch für jede Zweiphasenströmung zu erhalten. Die Relativgeschwindigkeit der Luft zur Filmoberfläche läßt sich folgendermaßen definieren

$$\bar{v}_2 = v_2 - v_1^* \quad (4)$$

Hierin bedeutet v_2 die absolute Geschwindigkeit der Luft, wie auch aus Abbildung 5 zu ersehen ist. Zur Bestimmung von v_1^* muß das Geschwindigkeitsprofil des Films bekannt sein. Experimentelle Bestimmungsmethoden blieben erfolglos [11]. Dagegen halfen theoretische Überlegungen weiter. Es muß nämlich die Geschwindigkeit des Wassers an der Rohrwand = 0 sein. Nun bewirken die Schubspannungskräfte an der Trennfläche der Medien, daß der Film in Richtung des Gasflusses strömt. Es muß darum ein angenähert lineares Geschwindigkeitsprofil entstehen, ähnlich dem, wenn eine Flüssigkeit zwischen einer festen und bewegten Wand geschoben wird. Von dieser Betrachtung wird nicht betroffen die Strömung in unmittelbarer Wandnähe, die aber infolge ihres geringen Ausmaßes kaum tendenzabweichenden Einfluß haben kann. Es wird nach dieser Definition die mittlere Filmgeschwindigkeit für dünne Filme gleich $v_1^*/2$. Denkt man sich den Filmmantel abgerollt, und diese Annahme ist für dünne Filme vertretbar [21], dann ist die Flüssigkeitsdurchflußmenge (Q_1) nach der Kontinuitätsgleichung

$$Q_1 = \frac{v_1^*}{2} (2 r \pi \delta) \quad (5)$$

Oder

$$v_1^* = \frac{Q_1}{r \pi \delta} \quad (6)$$

Die mittlere absolute Luftgeschwindigkeit (v_2) errechnete sich analog

$$Q_{2g} = v_2 \pi (r - \delta)^2 \quad (7)$$

Es ist dann

$$v_2 = \frac{Q_{2g}}{\pi (r - \delta)^2} \quad (8)$$

Es liegt nun ein mit v_1^* bewegtes System vor. Substituiert man v_1^* und v_2 in Gleichung 4 mit Hilfe von denen aus Gleichung 6 und 8, dann erhält man für die gesuchte Relativgeschwindigkeit der Luft

$$\bar{v}_2 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{Q_{2g}}{(r - \delta)^2} - \frac{Q_1}{r \delta} \right] \quad (9)$$

Eingesetzt in Gleichung 2 ergibt sich

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{2p} = \frac{\lambda \cdot \rho_{2g}}{4 \pi^2 (r - \delta)} \left[\frac{Q_{2g}}{(r - \delta)^2} - \frac{Q_1}{r \delta} \right]^2 \quad (10)$$

Führt man Δl nach Null, so wird $(\Delta p / \Delta l)_{2p} \rightarrow (\delta p / \delta l)_{2p}$

Es ist dann λ

$$\lambda = \frac{4 \pi^2 (\delta p / \delta l)_{2p} (r - \delta)}{\rho_{2g} [Q_{2g} / (r - \delta)^2 - Q_1 / r \delta]^2} \quad (11)$$

Über λ liegen nun genaue Messungen vor, die von Nikuradse [20] in einer Formel zusammengefaßt worden sind. Sie gilt für Strömungen in rauhen Rohren und ist anwendbar auf den Gasfluß über der welligen Filmoberfläche. Oberhalb der Konstanzgrenze, d. h. im Gebiet $\lambda \geq (200 \zeta / Re)^2$ gilt für λ_r [23]:

$$\lambda_r = \frac{1}{(2 \lg \zeta + 1,14)^2} \quad (12)$$

Es bedeuten:

ζ = Rauigkeitsfaktor

λ_r = Rohrreibungszahl für raue Rohre

Re = Reynoldssche Zahl

Gleichung 12 gilt ab $\zeta \leq 5$ im gesamten turbulenten Bereich der Strömung, d. h. bei $Re \geq 2300$.

Setzt man nun Gleichung 12 in Gleichung 11 ein, dann ergibt sich für $\lg \zeta$:

$$\lg \zeta = 0,5 \frac{Q_{2g}}{Q_1} \times [Q_{2g} / (r - \delta)^2 - Q_1 / r \delta] \cdot [4 \pi^2 (\delta p / \delta l)_{2p} (r - \delta)]^{-1/2} - 0,57 \quad (13)$$

Die gefundenen Meßergebnisse wurden in diese Gleichung eingesetzt und ζ für die einzelnen Strömungen berechnet. Diese ζ -Werte lagen außerordentlich niedrig, was auf eine starke Verwirbelung und Welligkeit der Filmoberfläche hindeutet. Trägt man die vorliegenden Werte in Abhängigkeit von der mittleren Filmdicke auf, dann werden folgende Zusammenhänge deutlich (Abb. 6):

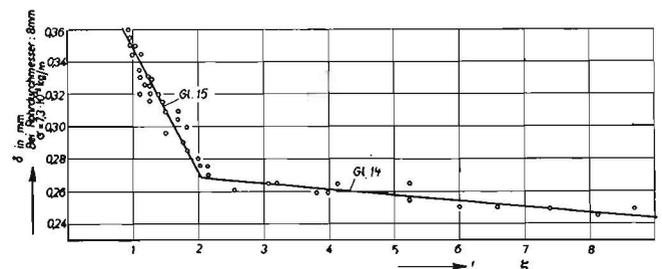


Abb. 6: Rauigkeitsmaß und mittlere Filmdicke (Meßpunkte: Verfasser)

Das relative Rauigkeitsmaß nimmt bis etwa $\delta = 0,27$ mm angenähert linear zu (unterkrit. Bereich). Bei $\delta = 0,27$ mm hat die durch die Meßpunkte gelegte Wahrscheinlichkeitsgerade einen Knick und ändert ihre Steigung recht erheblich (oberkrit. Bereich). Diese sogenannten kritischen Punkte der Filmströmung wurden auch bei den Grundlage-Untersuchungen des Verfassers beobachtet [11]. Im Rahmen dieses Beitrages kann nicht darauf eingegangen werden. Stellt man die Gleichungen der beiden Wahrscheinlichkeitsgeraden auf und setzt sie in Gleichung 13 ein, dann erhält man für unter- und oberkritischen Bereich folgende beiden Druckabfallgleichungen:

$$\left(\frac{\delta p}{\delta l}\right)_{2p} = \frac{\varrho_{2g} [Q_{2g}/(r-\delta)^2 - Q_1/r \delta]^2}{4 \pi^2 (r-\delta) [2 \lg (-2,86 \cdot 10^5 \delta + 79) + 1,14]^2} \quad (14)$$

für δ im unterkrit. Bereich
(δ in Meter)

$$\left(\frac{\delta p}{\delta l}\right)_{2p} = \frac{\varrho_{2g} [Q_{2g}/(r-\delta)^2 - Q_1/r \delta]^2}{4 \pi^2 (r-\delta) [2 \lg (-0,13 \cdot 10^5 \delta + 5,55) + 1,14]^2} \quad (15)$$

für δ im oberkrit. Bereich
(δ in Meter)

Fall II:

Die mittlere Filmdicke läßt sich mittels einer sogenannten Widerstandszahl, die hier mit Δ bezeichnet werden soll, dimensionslos über die Reynoldszahl darstellen [4]. Δ wird aus der bekannten Definitionsgleichung für den Druckverlustbeiwert der Rohrströmung abgeleitet

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_1 = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{2p} = \Delta \frac{\varrho_1}{2} v_1^2 \frac{1}{\delta} \quad (16)$$

Es ist dann:

$$\Delta = 2 \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{2p} \delta^3 / \varrho_1 (Q_1/U_s)^2 \quad (17)$$

U_s = Umfang des durchströmten Rohres (m)

Die im Versuch ermittelten Werte wurden in diese Gleichung eingesetzt und Δ in Abhängigkeit von der speziellen Reynoldszahl (Re_F) in Abbildung 7 eingetragen. Diese Re_F -Zahl ist von Brauer für die Kennzeichnung der von ihm untersuchten Rieselfilmströmung verwendet worden [4] und scheint auch Druckfilmströmung gut zu definieren.

$$Re_F = \frac{v_1 \delta}{\nu_1} \quad (18)$$

ν_1 = kinematische Zähigkeit der Flüssigkeit (m^2/sec)

Durch die Meßergebnisse in Abbildung 7 lassen sich zwei Wahrscheinlichkeitsgrade legen, die sich bei etwa $Re_F = 360$ schneiden. Diese kritische Re_F -Zahl findet sich auch bei Rieselfilmströmungen und dürfte die hier gewonnenen Ergebnisse stützen. Im übrigen wird auf die ausführliche Behandlung dieser Frage in der Originalarbeit [11] verwiesen. Mit Hilfe von Gleichung 17 und dem Diagramm in Abbildung 7 kann nunmehr auch der Druckabfall einer Filmströmung über eine bestimmte Leitungslänge berechnet werden. Er ist

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{2p} = \frac{\Delta \varrho_1 (Q_1/U_s)^2}{2 \delta^3} \quad (19)$$

Da die kritischen Re_F -Zahlen für Druck- und Rieselfilmströmungen angenähert übereinstimmen [4, 11], erscheint es vertretbar, die von Brauer [4] gefundenen Beziehungen zwischen der Oberflächenspannung der strömenden Flüssigkeit und $Re_{F \text{ krit}}$ auch auf Druckfilme zu übertragen. Es gilt nach Brauer bei Rieselfilmströmungen für Wasser und Diäthylenglykol-Wassergemische

$$Re_{F \text{ krit}} = 400 (\sigma_0 / \sigma)^3 \quad (20)$$

Hierin bedeutet σ_0 (kg/m) die Oberflächenspannung der nicht entspannten Flüssigkeit und σ diejenige der entspannten. Diese Beziehungen werden vor allem in der Sprühtechnik von Interesse sein, weil die dort verwendeten Wirkstoff-Wasser-Gemische eine unterschiedliche Oberflächenspannung haben.

Schlauchkrümmungseinflüsse auf das Fließsystem

Im Folgenden ist der Einfluß der Schlauchkrümmungen auf das Fließsystem zu besprechen. Beim Einphasenstrom wird an Krümmern durch Verwirblung das parabolische Geschwindigkeitsprofil verzerrt, woraus der zunehmende Druckabfall und andere Erscheinungen resultieren, die um so mehr ins Gewicht fallen, je kleiner das Verhältnis zwischen Krümmungs- und Schlauchradius wird. Nun ist die Verwirblung im Zweiphasenstrom bereits beim graden Fluß ungemein stark, und man kann erwarten, daß Schlauchkrümmungen kaum wesentlichen Einfluß auf das Strömungsgefüge nehmen werden. Im Versuch wurde diese Hypothese vollauf bestätigt. Die Druckabfallunterschiede zwischen 20 m Leitungsteilen lagen für eng gerollte und gerade ausgelegte Schläuche im Meßgenauigkeitsbereich von etwa $\pm 3\%$. Für die Sprühtechnik dürfte diese Erkenntnis von besonderem Interesse sein, weil beim praktischen Einsatz der Geräte die Schläuche in unregelmäßigen Windungen liegen oder unterschiedlich lange Schlauchleitungsteile auf den Haspeln aufgetrommelt sind.

Die Vorgänge an der Drossel

Die Sprühdüse ist eine Querschnittsverengung im Leitungssystem. Ihre geometrischen Abmessungen müssen daher auch Bildung und Fluß des Zweiphasensystems beeinflussen. Die Richtigkeit dieser Aussage wurde auch experimentell nachgewiesen [11]. Sollen nun rechnerische Grundlagen zum Erfassen des Gesamtfließsystems erarbeitet werden, so können die strömungsbeeinflussenden Verhältnisse an der Drossel nicht unberücksichtigt bleiben.

Die Auflösung des Gemischstromes kann erfolgen: 1. durch eine Düse, 2. durch eine Blende. Es ist im Folgenden zu überlegen, welche der beiden Drosselarten den gewünschten Effekt der Strahlaufösung am besten gerecht werden kann. Die sich anschließenden Betrachtungen beschränken sich nur auf Normdüsen und Normblenden, weil sich hieran die Erscheinungen am übersichtlichsten studieren lassen. Nach

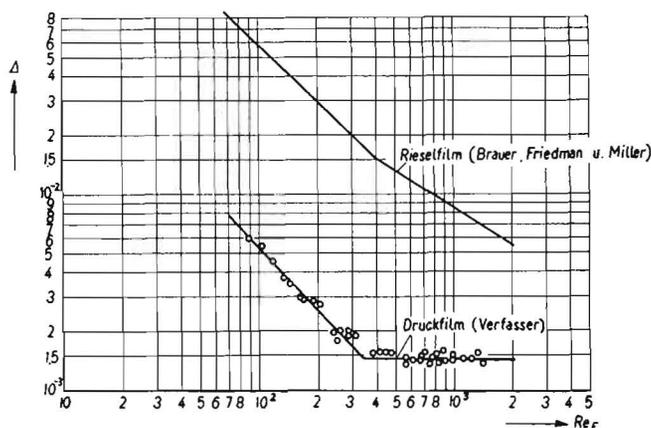


Abb. 7: Dimensionslose mittlere Filmdicke

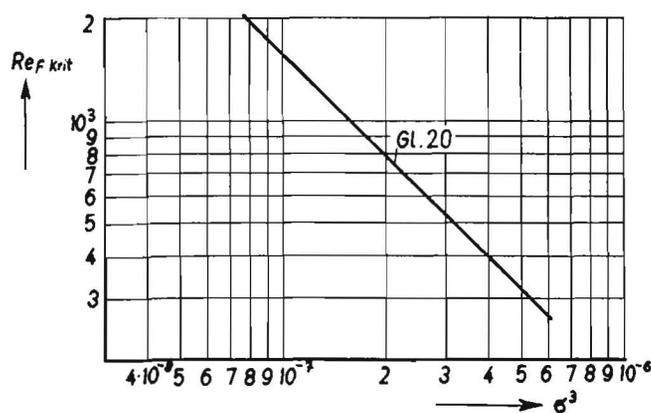


Abb. 8: $Re_{F \text{ krit}}$ und σ^3 (nach Brauer)

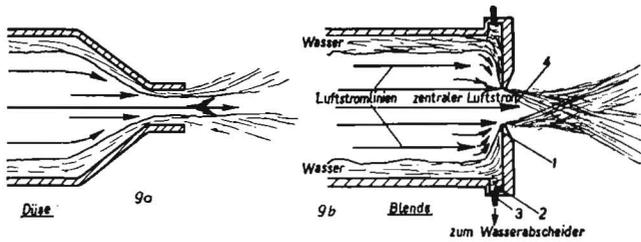


Abb. 9: Strömungsbilder (nach Verfasser)

einer Reihe von Vorversuchen wurden auf Grund visueller Beobachtungen Strömungsbilder gezeichnet, wie sie in Abbildung 9 dargestellt sind. Sie geben in etwa den Stromlinienverlauf bei den zu untersuchenden Strömungen wieder. Beim Düsendurchfluß (9a) wird der geschlossene Film bis zur Öffnungskante gefördert, dort durch die Expansion der Luft auseinandergetrieben und relativ ungleichmäßig und grob zerrissen. Diese Art der Tropfenauflösung kann daher den bestehenden Forderungen bezüglich eines feinen und gleichmäßigen Tropfenspektrums kaum genügen. Den etwaigen Stromfädenverlauf beim Blendendurchfluß gibt Abbildung 9b wieder. Hier wird das Wasser vom nachfolgenden an die Blendenöffnung geschoben und ändert dann seine Fließrichtung um etwa 90° zum Blendendurchlaß hin, ständig durch die auftreffende Luft verwirbelt und beschleunigt. An der Blendenöffnung wird es endgültig von dem vorbeiströmenden „zentralen Luftstrom“ in feine Tropfen zerrissen und nach außen mitgenommen. Die auf diese Art erzeugten Sprühschleier zeichnen sich durch eine überaus gute Uniformität der Tropfenbilder aus und sind in jedem Fall als brauchbar für den gewünschten Effekt anzusehen. Die Originalarbeit [11] beschäftigt sich noch eingehend mit den Hilfsmitteln zur Gemischauflösung und diskutiert die beobachteten Tropfenspektren.

Gemäß der oben gemachten Erfahrung wurden bei den Versuchen zur Klärung der Verhältnisse an der Drossel fortan nur noch normgerechte Blenden verwendet, deren Öffnungsverhältnisse (m) 0,0625, 0,14 und 0,25 betragen.

$$m = (d_o / d_s)^2$$

Es bedeutet:

m = Öffnungsverhältnis

d_s = Durchmesser des Schlauches (m)

d_o = Durchmesser der Drosselöffnung (m)

Die Berechnung des Zweiphasen-Drosseldurchflusses baute sich auf den bekannten Durchflußgleichungen auf [28].

Es gilt für den Durchfluß kompressibler Stoffe

$$Q_{2g} = a_2 \cdot \varepsilon \cdot F_o \sqrt{\frac{2g}{\gamma_{2g}} \Delta p_2} \quad (21)$$

Es gilt für den Durchfluß inkompressibler Stoffe

$$Q_1 = a_1 \cdot F_o \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} \Delta p_1} \quad (22)$$

In Gleichung 21 und 22 bedeuten:

Q = Volumendurchfluß der Medien an der Drosselstelle (m³/sec)

a = Durchflußzahl

ε = Expansionszahl

g = Erdbeschleunigung (m/sec²)

γ_1 = spezifisches Gewicht (kg/m³)

F_o = Querschnitt des Drosselgerätes (m²)

Δp = Wirkdruck (kg/m²)

Indizes:

1 = flüssige Phase

2 = gasförmige Phase

g = gespannt

Beim Zweiphasendurchfluß strömt das Gemisch eines kompressiblen und eines inkompressiblen Mediums durch die Drossel. Nach der Voraussetzung muß der Wirkdruck beider Phasen in der Drossel gleich sein, weil ja über dem Schlauchquerschnitt im System Druckausgleich herrschen muß. Demnach ist also

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad (23)$$

Löst man nun Gleichung 21 und 22 nach Δp_1 bzw. Δp_2 hin auf und setzt gleich, dann ergibt sich

$$\frac{Q_1}{Q_{2g}} \varepsilon \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{2g}}} = \frac{F_1 a_1}{F_2 a_2} \quad (24)$$

Die von den beiden Phasen eingenommenen Querschnitte beim Drosseldurchgang F_1 bzw. F_2 addieren sich zu dem Querschnitt des Drosselgerätes. Es ist also

$$F_1 = F_o - F_2 \quad (25)$$

Löst man Gleichung 25 nach F_2 hin auf, und setzt in Gleichung 24 ein, dann wird:

$$\frac{Q_1}{Q_{2g}} \varepsilon \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{2g}}} = \frac{(F_o - F_2)}{F_2} (\alpha_1 / \alpha_2) \quad (26)$$

In Gleichung 26 lassen sich die Faktoren der linken Seite experimentell leicht bestimmen. Der Wert für die Expansionszahl ε ist aus Tabellen zu entnehmen [27]. Auf der rechten Seite der Gleichung steht das Verhältnis der Widerstandszahlen und die von der Luft beim Blendendurchgang eingenommenen Fläche. Während F_o , also der Querschnitt des Drosselgerätes, ohne weiteres meßbar ist, sind die Faktoren F_2 und (α_1 / α_2) nicht oder nur sehr schwer im Versuch zu bestimmen. Gleichung 26 enthält also mindestens zwei Unbekannte und ist deshalb direkt nicht lösbar. Man ist daher gezwungen einen indirekten Lösungsweg einzuschlagen, bei dem angenommen wird, daß $\alpha_1 = \alpha_2$ ist. In diesem Falle ist dann das Verhältnis α_1 / α_2 immer gleich 1. Diese Voraussetzung ist nicht exakt. Man muß aber diese Hypothese in den Rechengang einbauen, um Gleichung 26 lösen zu können. F_2 ist also nun nach Einsetzen der Meßergebnisse in Gleichung 26 zu berechnen. Es ist jedoch darauf zu achten, daß F_2 bzw. F_1 Relativwerte sind, weshalb sie

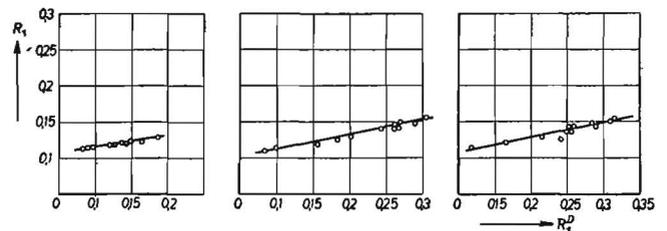


Abb. 10: Beziehungen zwischen R_1^D und R_1 , kurz vor der Blende

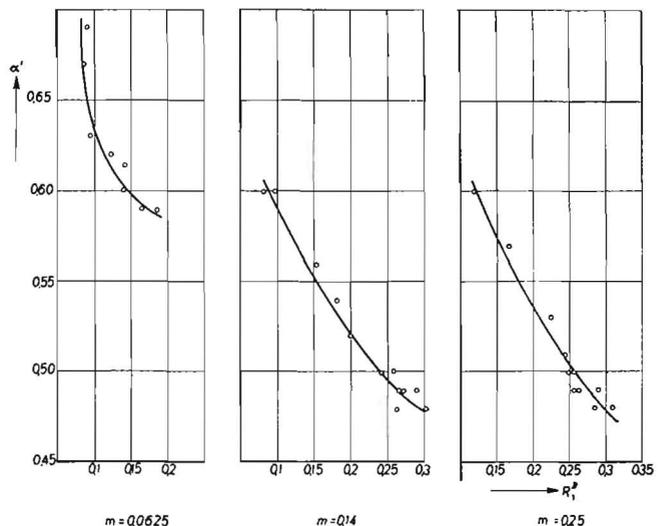


Abb. 11: Eichkurve für die relative Widerstandszahl α'

fortan auch mit F_1' und F_2' bezeichnet werden sollen. Die Berechnung dieser Werte ist darum von besonderem Vorteil, weil F_1' bzw. F_2' mit der entsprechenden Durchströmfläche des Wassers bzw. der Luft im Schlauch correlative (Abb. 10). Es bestehen also zwischen $F_1/F_3 = R_1$ im Schlauch und $F_1/F_0 = R_1^D$ beim Drosseldurchgang Beziehungen, die für die Berechnung des Gesamtsystems von besonderer Bedeutung sind.

Bei bekannten F_1 und F_2 läßt sich jetzt auch $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha'$ berechnen. Nach Gleichung 22 muß sein

$$\alpha' = \frac{Q_1}{F_1'} \sqrt{\frac{\gamma_1}{2g \cdot \Delta p}} \quad (27)$$

Zur Messung des Wirkdruckes wurden in der Blendenfassung Druckentnahmestellen angebracht, wie sie in Abbildung 9 dargestellt sind. Es kann nun erwartet werden, daß α' abhängig ist vom prozentualen Durchflußanteil der Medien (R_1^D) an der Drossel. Deshalb wurden auch die gefundenen α' -Werte in Abhängigkeit des R_1^D -Anteils im Diagramm aufgetragen, und man erhielt eine Eichkurve, wie sie in Abbildung 11 dargestellt ist. Die Meß- und Rechenwerte wichen nicht mehr als $\pm 5\%$ von der Idealen ab. Abbildung 11 enthält nur einen Teil der Gesamtkurve, entsprechend dem behandelten R_1^D -Bereich von etwa 0,08 bis 0,35. Hier wurden noch nicht die kritischen Punkte festgestellt, von denen ab die Kurve wieder abfallen beziehungsweise ansteigen muß. Das ist darum nötig, weil bei $R_1^D = 0$ und 1,0 die Zweiphasenströmung zur Einphasenströmung wird und die hier geltenden α' -Zahlen mit den α' -Werten zusammenfallen, die kleiner beziehungsweise größer sind, als die bei $R_1^D = 0,08$ und 0,35 bestimmten. Es ist abschließend darauf hinzuweisen, daß die α'/R_1^D -Eichkurven verständlicherweise für jede Drosselart verschieden sind. Sie können aber nach der hier entwickelten Methode auch für andere Blenden ermittelt werden. Die Möglichkeit einer solchen Berechnung ist wesentlich für die Erfassung des Gesamtsystems.

Folgerungen

Damit dürften die Grundlagen des gesamten Systems im einzelnen behandelt worden und der für den Pflanzenschutz interessierende Bereich aus dem Komplex der Zweiphasenströmung herausgelöst sein. Die hier dargelegten Gesetzmäßigkeiten reichen nun aus, um bei gegebenem statischen Druck an der Blende, bekanntem Schlauchdurchmesser, Drosselquerschnitt und Leitungslänge das gesamte Fließsystem rechnerisch zu entwickeln. Diese Feststellung wird in der Originalarbeit [11] durch ein Berechnungsbeispiel gestützt. Die entwickelten Ableitungen dürften ausreichen, um im praktischen Sprühgerätebau Nutzenanwendungen zu finden.

Résumé:

Dr. C. D. Klügel: "Movement and Dissolution of Two-phase Mixtures in Pipes and Tubes."

This article deals with the calculation of two-phase streams of mixtures under conditions similar to those pertaining in equipment used in plant protection techniques. The incentive to the commencement of these investigations was the wish so often expressed by users that only one tube be utilised for conducting both the air and the mixtures used in plant spraying equipment. All types of flows likely to be encountered in spraying operations were therefore investigated. The most satisfactory type was the annular flow. A method whereby all essential data for this type of flow could be calculated was then developed. The method paid particular consideration to disturbances caused by bends or kinks in the hose. Flow conditions at the nozzle were also investigated. The results of these investigations will furnish designers of spraying equipment utilising the annular flow principle with adequate theoretical data.

Dr. C. D. Klügel: «Transport et dissolution des flux de mélange de deux phases.»

L'article présent s'occupe du calcul des flux de mélanges de deux phases dans la mesure où cela touche à la technique de la protection des plantes. Ces recherches ont été entreprises afin de pouvoir faire circuler de l'air et la bouillie au moyen d'une seule conduite dans les appareils de pulvérisation. C'est pourquoi on a dû examiner les types de flux possibles et a dû caractériser le type de courant qui convient en particulier à la pulvérisation. On a constaté que le flux annulaire est le plus avantageux. Les auteurs ont établi une méthode mathématique qui permet de calculer ce type de flux et ceci en tenant compte des influences provenant des courbures du tuyau. Ils ont examiné en outre le flux dans le jet. Les résultats de ces recherches peuvent servir de base de calcul lors de la conception de pulvérisateurs à flux annulaire.

Dr. C. D. Klügel: «Transporte y separación de corrientes de mezcla bifásica.»

Este trabajo se ocupa del cálculo de corrientes de mezcla bifásica en el terreno que interesa a la técnica de la lucha antiparasitaria para la protección de las plantas. Se sale del deseo de llevar en los aparatos pulverizadores la solución y el aire por un solo tubo. Ha sido preciso investigar las formas posibles de las corrientes y determinar la clase de flujo que se presenta en la pulverización, llegándose al resultado de que el flujo en forma de película o flujo anular es el más favorable. Se ha desarrollado un método para el cálculo de esta clase de flujo, teniendo en cuenta las influencias producidas por las curvas que forma el tubo flexible. Se investigaron también las corrientes que se producen en la boquilla pulverizadora. Los resultados de estos trabajos podrán servir al técnico para la construcción de pulverizadores por el sistema del flujo en forma de película.

Schrifttum:

- [1] Abramson, A. E.: Investigation of Annular Liquid Flow with Concurrent Air Flow in Horizontal Tubes. J. Appl. Mech. 74 (1952), S. 267/274
- [2] Alves, G. E.: Concurrent Liquid-Gas Flow in a Pipe Line Contactor. Chem. Eng. Progr. 50 (1954), S. 449/456
- [3] Boelter, L. M. K. u. R. H. Kepner.: Ind. Eng. Chem. 31 (1939), S. 426/434
- [4] Brauer, H.: Strömung und Wärmeübertragung bei Rieselfilmen. VDI-Forschungsheft 457, B 22. Düsseldorf 1956
- [5] Davidson, W. F. u. a.: Trans. Am. Soc. Mech. Engr. 65 (1943), S. 553/591
- [6] Duckler u. Bergelin: Characteristics of Flow in Falling Liquid Films. Chem. Engng. Progr. 48 (1952), S. 557/563
- [7] Gallwitz, K.: Zur Rationalisierung der Schädlingsbekämpfung im Feldbau. Dt. Agrartechnik, 9 (1956), S. 390/395
- [8] Gazley, C. u. O. P. Bergelin: Univ. of Del. Report TPF-1. (1947)
- [9] Jenkins, R. M. Ch. E.; Thesis Univ. of Del. (1947)
- [10] Johnson u. A. H. Abou-Sabe: Heat Transfer and Pressure Drops for Turbulent Mow of Air-Water Mixtures in a Horizontal Pipe. ASME 74 (1952), S. 977/987
- [11] Klügel, C.-D.: Untersuchungen über Transport und Auflösung von Zwei-Phasengemischströmungen in einem für die Pflanzenschutztechnik interessierenden Bereich. Diss. Göttingen 1957.
- [12] Lockhart, R. W.: Isothermal Pressure Drop for Two-Phase, Two-Component, Viscous-Viscous Flow in a Tube of Various Angles to the Horizontal. M. S. Thesis Univ. of Calif. 1945
- [13] Lockhart, R. W.: An Analysis of Isothermal Two-Phase, Two-component Flow Data. Mech. Engr. Thesis Univ. of Calif. 1946
- [14] Lockhart, R. W. u. R. C. Martinelli: Proposed Correlations of Data Isothermal Two-Phase, Two-component Flow in Pipes. Chem. Engng. Progr. 45 (1949), S. 39/48
- [15] Martinelli, R. C. u. a.: Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 66 (1944), S. 139/161
- [16] Martinelli, R. C. u. a.: Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 42 (1946), S. 681/705
- [17] Ravenscroft, R. W.: Pressure Drop and Heat Transfer Accompanying Two-component, Two-phase Flow in Horizontal Pipes. M. S. Thesis Univ. of Calif. (1943)
- [18] McAddams, W. H. u. a.: Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 64 (1942), S. 193/200
- [19] McElwee, F. D.: Behaviour of Two-phase, Two-component Flow in Tubes. M. S. Thesis Univ. of Calif. (1947)
- [20] Nikuradse, J.: Strömungswiderstand in rauhen Rohren, Z. angew. Math. Mech. 11 (1931), S. 409
- [21] Nusseft, W.: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Z. VDI (1916), S. 541/552
- [22] Pennie u. Belanger: A New Method for Liquid Film Thickness Measurement. Canad. J. Technology 30 (1952), S. 9/19
- [23] Richter, H.: Rohrhydraulik, 2. Aufl., Göttingen
- [24] Seifert, R. u. W.: Krüger: Z. VDI 92 (1950), S. 189
- [25] Sexauer: Der Wärmeüberg. am senkrecht berieselten Rohr. Forsch. Ing. Wes. 10 (1939) S. 286/296
- [26] Taylor, T. H. M.: M. S. Thesis Univ. of Calif. (1942)
- [27] Thomson, E. G.: M. S. Thesis Univ. of Calif. (1941)
- [28] VDI: Durchflußmeßregeln, Düsseldorf 1934 und 1948