

KfK 3876
März 1985

**Untersuchungen
zum Druckabfall
und zur
Massenstromumverteilung von
Zweiphasenströmungen in
rechtwinkligen
Rohrverzweigungen**

W. Seeger
Institut für Reaktorbauelemente

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente

KfK 3876

UNTERSUCHUNGEN ZUM DRUCKABFALL UND ZUR MASSENSTROMUM-
VERTEILUNG VON ZWEIPHASENSTRÖMUNGEN IN RECHTWINKLIGEN
ROHRVERZWEIGUNGEN

WOLFGANG SEEGER

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität
Karlsruhe (T.H.) genehmigte Dissertation.

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

A b s t r a c t

SEEGER, WOLFGANG

UNTERSUCHUNGEN ZUM DRUCKABFALL UND ZUR MASSENSTROMUMVERTEILUNG VON ZWEIPHASENSTRÖMUNGEN IN RECHTWINKLIGEN ROHRVERZWEIGUNGEN

In Gas-Flüssigkeitsströmung wurden Untersuchungen zur Phasenumverteilung und zum Druckverlust in einem T-Stück mit gleichen Rohrdurchmessern ($d = 50$ mm) durchgeführt. Bei horizontalem Zustrom wurden die waagerechte sowie die vertikal nach oben und nach unten orientierte Abzweiganordnung untersucht. Es wurden Luft-Wasser Experimente bei 0,4 bis 1 MPa durchgeführt sowie Dampf-Wasser Experimente bei Drücken bis zu 10 MPa. Der Massenstrom und Gasgehalt des Zustroms wurden derart variiert, daß ein breites Spektrum von Strömungsformen überdeckt wurde (Schwall-, Ring-, disperse Strömung). Für konstante Zustrom-Parameter wurde das Massenstromdichteverhältnis G_3/G_1 zwischen Zustrom (1) und Abzweig (3) zwischen 0 und 1 variiert. Gleichzeitig wurden ausführliche Differenzdruckmessungen entlang des Strömungsweges im Zustrom, Abstrom und Abzweig vorgenommen, um die Druckverluste im T-Stück zu bestimmen. Es wurden verschiedene Modelle für den Druckverlust ΔP_{1-3} zwischen Zustrom und Abzweig und die Druckänderung Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

Für den vertikal nach oben gerichteten Abzweig verhält sich das T-Stück nahezu wie ein guter Separator, da das Gas fast vollständig durch den Abzweig strömt. Für den waagrecht angeordneten Abzweig strömt das Gas bevorzugt für hohe Werte von G_3/G_1 in den Abzweig. Das Verhältnis der Dampfgehalte x_3/x_1 hat ein Maximum bei $G_3/G_1 \approx 0,3$ und nimmt für kleinere Werte von G_3/G_1 stark ab. Für den nach unten gerichteten Abzweig wurde eine starke Abhängigkeit von der Phasenverteilung im Zustrom (Strömungsform) beobachtet; i.a. strömt das Gas für sehr hohe Werte G_3/G_1 bevorzugt in den Abzweig und die Flüssigkeit bei niedrigen Werten. Für alle drei Abzweigorientierungen wurden empirische Beziehungen für die Phasenseparation angegeben.

Für die Modellierung von Δp_{1-2} und Δp_{1-3} ergibt bei allen Parametervariationen das Modell von Reimann-Seeger die besten Ergebnisse.

A b s t r a c t

SEEGER, WOLFGANG

INVESTIGATIONS INTO THE PRESSURE DROP AND MASS FLOW DISTRIBUTION OF TWO-PHASE FLOW IN RECTANGULAR T-JUNCTIONS

The phase separation and pressure drop of a gas-liquid mixture flowing through a T-junction of equal pipe diameters ($d = 50$ mm) was investigated. The inlet pipe was orientated horizontally, the branch directions were horizontal and vertically upward or downward. The experiments were performed with air-water flow ($0.4 < p < 1$ MPa) and steam-water flow at pressures up to 10 MPa. The inlet mass flux and quality were varied in a wide range and included test parameters in the slug, annular and dispersed flow regimes. For constant inlet parameters the mass flux ratio G_3/G_1 between the inlet (1) and branch (3) was varied between 0 and 1. At the same time, detailed differential pressure drop measurements along the inlet, run and branch were carried out to determine the pressure drop in the T-junction. A comparison was made of different models describing the pressure difference Δp_{1-3} between the inlet and branch and the pressure difference Δp_{1-2} between the inlet and run on the one hand, and the experimental results, on the other hand.

For the branch with upward orientation the T-junction acts as a good separator since nearly all of the gas flows through the branch. For the horizontal branch, the gas preferentially flows into the branch at high values of G_3/G_1 . The quality ratio x_3/x_1 has a maximum at about G_3/G_1 . For the downward branch the separation is strongly affected by the phase distribution in the inlet pipe; in general, gas flows predominantly into the branch at very high values of G_3/G_1 , whereas this applies for liquid at low values. Empirical correlations have been derived to describe the phase separation for all three branch orientations.

The best results of modelling Δp_{1-2} and Δp_{1-3} are shown by the model of Reimann-Seeger for all variations of the parameters.

Inhaltsverzeichnis

Seite

	Nomenklatur	
1	Einleitung	1
1.1	Problem	1
1.2	Definitionen	2
1.3	Strömungsformen	7
2	Literaturübersicht	10
2.1	Einphasig durchströmte Abzweigungen	10
2.2	Zweiphasig durchströmte Abzweigungen	11
2.2.1	Schaumströmung im Zustrom	11
2.2.2	Ringströmung im Zustrom	12
2.2.3	Schwallströmung im Zustrom	14
2.2.4	Schichtenströmung im Zustrom	15
3	Beschreibung der Versuchsanlage und Meßtechnik	17
3.1	Versuchskreislauf	17
3.1.1	Versuche zur Strömungsvisualisierung	18
3.2	Teststrecke und Instrumentierung	19
3.2.1	Massenstrommessung	20
3.2.2	Druck- und Differenzdruckmessung in der Teststrecke	22
3.3	Versuchsdurchführung	23
3.3.1	Versuchsmatrix	25
3.4	Auswertung und Darstellung der Messergebnisse	27
3.4.1	Massenstrommessung	27
3.4.2	Gemessene Druckdifferenzen	27
4	Betrachtungen zur Messgenauigkeit	29
4.1	Massenstrommessung	29
4.2	Differenzdruckmessung zur Bestimmung des axialen Druckverlaufs	31
5	Sichtbarmachung der Strömung	32

	<u>Seite</u>	
6	Massenstromumverteilung im T-Stück	41
6.1	Grundsätzliches zur Massenstromumverteilung im T-Stück	41
6.2	Waagerechter Abzweig	42
6.2.1	Luft-Wasser-Strömung	42
6.2.2	Dampf-Wasser-Strömung	44
6.2.3	Vergleich der Ergebnisse mit den Meßdaten anderer Autoren	48
6.2.4	Abhängigkeit der Maxima der Separationskurven	51
6.2.5	Korrelation für die Phasenumverteilung	52
6.3	Abzweig nach unten (Luft-Wasser Strömung)	54
6.4	Abzweig nach oben (Luft-Wasser Strömung)	57
6.5	Einfluß der Abzweigorientierung auf die Phasenseparation	59
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Phasenseparation	62
7	Druckverluste im T-Stück	63
7.1	Modelle für zweiphasige Strömung	63
7.1.1	Druckdifferenz Δp_{1-3}	63
7.1.2	Druckdifferenz Δp_{1-2}	65
7.1.2.1	Homogene Modelle ($S = 1$)	65
7.1.2.2	Modelle mit $S > 1$	66
7.1.3	Meßergebnisse	66
7.1.4	Vergleich mit bekannten Modellen	70
7.1.4.1	Messungen bei vollem Durchsatz	70
7.1.4.2	Splitpunkte	74
7.1.5	Vergleich der Rechenmodelle mit den Experimenten von Saba u. Lahey /34/	84
7.2	Zusammenfassung	84
8	Zusammenfassung und Ausblick	88
9	Literatur	90
10	Anhang	98
10.1	Modell für die Druckverluste im T-Stück	98
10.1.1	Einphasige Strömung	98
10.1.2	Zweiphasige Strömung	101

	<u>Seite</u>
10.1.2.1	Modell von Reimann-Seeger (RSM) 101
10.1.3	Vereinfachte Beziehung für den Abzweigdruckverlust Δp_{1-3} 104
10.1.4	Beziehung für die Druckänderung zwischen Zustrom und Abstrom Δp_{1-2} 105
10.2	Korrelation von McCreery /35/ zur Beschreibung der Phasenseparation im T-Stück 106
10.3	Meßdaten

Nomenklatur

A	Fläche	m^2
C	Kontraktionszahl	-
D, d	Rohrdurchmesser	m
G	Massenstromdichte	$kgm^{-2}s^{-1}$
h	Höhenkoordinate	m
K	Druckverlustkoeffizient	-
m	Massenstrom	$kg s^{-1}$
p	Druck	Pa
S	Schlupf	-
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
u	Geschwindigkeit	ms^{-1}
V	Volumen	m^3
V	Volumenstrom	$m^3 s^{-1}$
v_s	bezogene Geschwindigkeit	ms^{-1}
W	Dampf- bzw. Gasgeschwindigkeit	ms^{-1}
x	Dampfgehalt	-

Griechische Symbole

α	Gasflächenanteil	-
l	Strömungsweg	m
Δp	Differenzdruck	Pa
φ	Dichte	kgm^{-3}
φ_a	scheinbare Dichte	kgm^{-3}
φ_i	Impulsdichte	kgm^{-3}
φ_e	Energiedichte	kgm^{-3}
φ_h	homogene Dichte	kgm^{-3}
σ	Oberflächenspannung	Nm^{-1}
φ	Winkel gegen die Horizontale	-
θ	Abzweigwinkel	-

Indizes

1	Zustrom
2	Abstrom
3	Abzweig
B	Beschleunigung
ber	berechnet
c	vena contracta
e	Energie
g	Gas
gem	gemessen
ges	gesamt
H	Höhe
l	Flüssigkeit, Wasser
Mod	Modell
Reib	Reibung
rel	relativ
s	Sättigung
spül	spülen
2ph	zweiphasig
*	örtlich bezogen
vs	vollständig

1 Einleitung

1.1 Problem

Rohrverzweigungen sind häufig vorkommende Bauteile in der Energie- und Verfahrenstechnik. So enthält z.B. die Rohrleitung eines Primärkreises eines Standard-Druckwasserreaktors ca. 80 Rohrverzweigungen mit verschiedenen Durchmesser-Verhältnissen von Abzweig zu Hauptrohr.

Während bei Normalbetrieb die Rohrleitungen des Primärkreises von Wasser durchströmt werden, kann bei einer Druckabsenkung im Kühlmittelkreislauf, z.B. infolge eines Rohrbruchs im Leitungssystem des Reaktors, der einphasige Strömungszustand plötzlich in einen zweiphasigen Zustand übergehen. Strömt dann das Gemisch aus Dampf und Flüssigkeit im Rohrsystem durch eine Verzweigung, so ist mit der Aufteilung des Massenstroms eine Umverteilung der Phasen verbunden (Abb. 1). Die schwerere Flüssigkeit strömt bevorzugt geradeaus; die leichtere Gasphase kann besser der Umlenkung folgen.

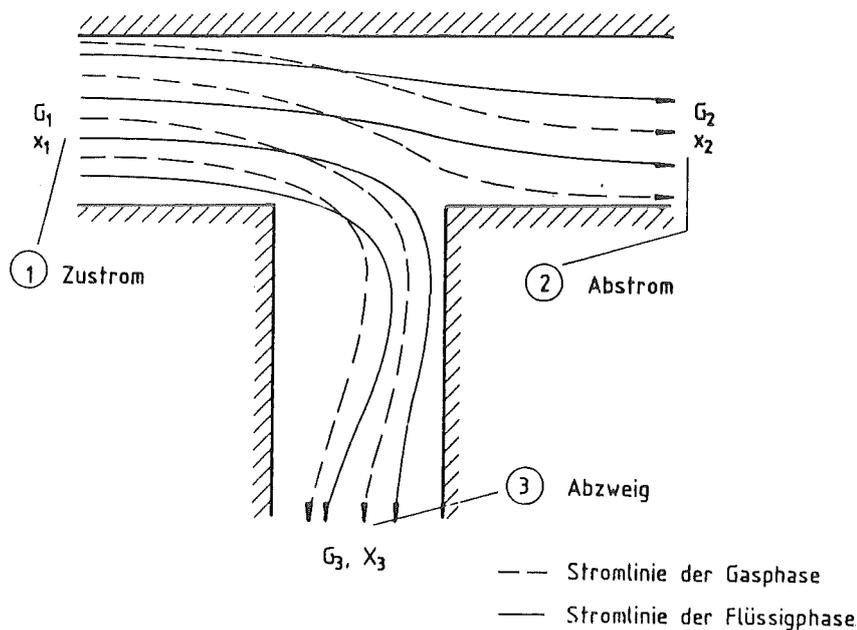


Abb. 1 Schematische Darstellung der Umverteilung einer Zweiphasenströmung in einem T-Stück

Neben der Phasenumverteilung ist der Druckverlust über die Verzweigung von Bedeutung. Beide Größen lassen sich derzeit nur ungenügend genau berechnen; zur Entwicklung entsprechender Modelle sind daher geeignete Experimente erforderlich.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Gesetzmäßigkeiten für die Umverteilung von Zweiphasenströmungen in Rohrverzweigungen zu erarbeiten. Dazu werden in Luft-Wasser Strömung Untersuchungen an einem T-Stück mit gleichen Durchmessern bei horizontalem Zustrom jedoch mit unterschiedlichen Abzweigrichtungen durchgeführt. Variiert werden in weiten Bereichen der Massenstrom und der Gasgehalt des Zustroms sowie die Differenzdrücke über das T-Stück, um ein großes Spektrum von Phasen- und Geschwindigkeitsverteilungen (Strömungsformen) abzudecken. Dabei werden die Massenströme und Gasgehalte im Abzweig und Abstrom bestimmt sowie die Druckverteilung längs der Rohrachsen gemessen.

Der Systemdruckeinfluß auf die Phasenumverteilung wird für die waagerechte Abzweiganordnung in Dampf-Wasser Strömung für Drücke bis zu 10 MPa untersucht.

1.2 Definitionen

Im folgenden werden die wichtigsten aus der Literatur bekannten Begriffe und Definitionen erläutert /1, 2, 3/. Die Strömung wird - wie in den Versuchen realisiert - als im zeitlichen Mittel stationär angenommen.

Für den zweiphasigen Massenstrom \dot{m} , der sich aus dem Gasmassenstrom \dot{m}_g und dem Massenstrom der Flüssigkeit \dot{m}_l zusammensetzt gilt:

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_l \quad (1.1)$$

Analog ergibt sich für den Volumenstrom:

$$\dot{V} = \dot{V}_g + \dot{V}_l \quad (1.2)$$

Der Dampf- bzw. Gasgehalt ist definiert als

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_l} \quad (1.3)$$

Der Flächenanteil des Gases ist definiert als

$$\alpha = \frac{A_g}{A} = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (1.4)$$

Der Flächenanteil ist mit dem Volumenanteil, dem sogenannten "Void" identisch, wenn Querschnittsänderungen in Strömungsrichtung ausgeschlossen werden:

$$\alpha = \frac{V_g}{V} = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (1.5)$$

Das Verhältnis der mittleren Phasengeschwindigkeiten u_g und u_l bezeichnet man als den Schlupf S

$$S = \frac{u_g}{u_l} \quad (1.6)$$

Die auf den Strömungsquerschnitt A bezogenen Volumenströme werden als "bezogene Geschwindigkeiten" oder auch als Leerrohrgeschwindigkeiten bezeichnet. Es gilt:

$$v_{sg} = \frac{\dot{V}_g}{A} \quad (1.7)$$

$$v_{sl} = \frac{\dot{V}_l}{A} \quad (1.8)$$

Durch eine Umformung der Gleichungen (1.1) bis (1.6) erhält man aus dem Massenstromverhältnis \dot{m}_g/\dot{m}_l einen Zusammenhang zwischen x und α :

$$\frac{x}{1-x} = S \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (1.9)$$

Die Dichte einer Zweiphasenströmung kann auf verschiedene Art definiert werden:

Aus einer Volumenbetrachtung für beide Phasen in einem Kontrollraum kann man eine mittlere Dichte definieren. Sie wird auch scheinbare Dichte ("apparent density") genannt.

$$\rho_a = \alpha \cdot \rho_g + (1-\alpha)\rho_l \quad (1.10)$$

Aus einer Impulsbilanz, bei der die beiden Phasen getrennt betrachtet werden, ergibt sich für die Impulsdichte ρ_i die Beziehung

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{x^2}{\alpha \cdot \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{\rho_l} \quad (1.11)$$

Aus den Energiegleichungen der beiden Phasen erhält man für die "Energiedichte" ρ_e den Ausdruck

$$\frac{1}{\rho_e^2} = \frac{x^3}{\alpha^2 \cdot \rho_g^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-\alpha)^2} \cdot \frac{1}{\rho_1^2} \quad (1.12)$$

Sind beide Phasen gleichmäßig über den Querschnitt verteilt und strömen mit gleicher Geschwindigkeit (Schlupf $S = 1$), so reduzieren sich die Ausdrücke (1.11) und (1.12) mit Hilfe von Beziehung (1.9) zur vereinfachten Beziehung für die reziproke Dichte. Diese Dichte wird auch als homogene Dichte bezeichnet

$$\frac{1}{\rho_h} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_1} \quad (1.13)$$

Speziell bei der Zweiphasenströmung durch ein T-Stück tritt neben der Aufteilung des Massenstroms auch eine Separation der beiden Phasen auf. Die Einlaufstrecke bis zur Verzweigung wird im folgenden mit Zustrom (Index 1) bezeichnet. Im T-Stück wird die Zweiphasenströmung in einen Abstrom (Index 2) - und Abzweiganteil (Index 3) auf- und umverteilt, d.h. die Dampfgehalte x_1 im Zustrom, x_2 im Abstrom und x_3 im Abzweig sind i.a. unterschiedlich groß (s. Abb. 1). Bildet man für das T-Stück die Bilanz für den Gesamtmassenstrom und den Gasmassenstrom, so ergibt sich:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1.14)$$

$$x_1 \cdot \dot{m}_1 = x_2 \cdot \dot{m}_2 + x_3 \cdot \dot{m}_3 \quad (1.15)$$

Durch Umformen und Einsetzen von Gl. (1.14) in (1.15) erhält man:

$$\frac{x_3}{x_1} = \frac{1 - \frac{x_2}{x_1} \left(1 - \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}\right)}{\dot{m}_3 / \dot{m}_1} \quad (1.16)$$

Tritt keine Phasenseparation auf, so sind die Dampfgehalte x_1 , x_2 und x_3 gleich. Dieser Fall tritt i.a. in der Praxis nicht auf.

Ein Grenzfall ist die vollständige Phasenseparation, wobei die gesamte zuströmende Gasmenge durch den Abzweig strömt. Für diesen Fall ist der Dampfgehalt im Abstrom $x_2 = 0$, so daß sich Gl. (1.16) auf die folgende Form reduziert (Kurve der vollständigen Phasenseparation):

$$\left(\frac{x_3}{x_1}\right)_{vs} = \frac{1}{\dot{m}_3 / \dot{m}_1} \quad (1.17)$$

Trägt man das Verhältnis x_3/x_1 über \dot{m}_3/\dot{m}_1 auf, so liegt das reale Verhalten einer Zweiphasenströmung durch ein T-Stück im Gebiet unterhalb der Kurve der vollständigen Phasenseparation. Für die Auslegung einer Abzweigung in einem Rohrsystem ist daher der funktionelle Zusammenhang von den Dampfgehalten x_2 und x_3 mit der durchströmten Geometrie und den Zuströmparametern von Bedeutung.

Der auf den Strömungsweg bezogene Gesamtdruckverlust in einer zweiphasigen Rohrströmung setzt sich aus einem Beschleunigungsanteil, einem hydrostatischen und einem Reibungsanteil zusammen:

$$(\Delta p/\Delta l)_{\text{ges}} = (\Delta p/\Delta l)_B + (\Delta p/\Delta l)_H + (\Delta p/\Delta l)_{\text{Reib}} \quad (1.18)$$

Der Reibungsdruckabfall beschreibt eine irreversible, die beiden anderen Anteile eine reversible Druckänderung.

Infolge der durch Reibung verursachten Druckabsenkung tritt eine Volumenstromvergrößerung auf. Mit kleiner werdendem Druck wird das spezifische Volumen der kompressiblen Gasphase größer und die Strömungsgeschwindigkeit steigt an. Dies hat einen Beschleunigungsdruckverlust zur Folge. Die dadurch verursachte Geschwindigkeitszunahme der beiden Phasen und die damit verbundene Impulsänderung macht sich als Beschleunigungsdruckabfall bemerkbar. Eine genaue Berechnung des Beschleunigungsdruckabfalls ist i.a. nicht möglich, da die örtlichen Phasengeschwindigkeiten nicht bekannt sind. Der Beschleunigungsanteil am Gesamtdruckverlust ist jedoch so gering, daß er zumindest für eine unbeheizte Zweiphasenströmung vernachlässigt werden kann.

Durch die Änderung der geodätischen Höhe ist der geodätische Druckabfall durch die Beziehung

$$(\Delta p/\Delta l)_H = (\alpha \cdot \rho_g + (1-\alpha) \cdot \rho_l) \cdot g \cdot \sin\varphi \quad (1.19)$$

gegeben, mit φ als Neigungswinkel zwischen der Rohrachse und der Horizontalen. Zur Auswertung von Gl. (1.19) ist die Kenntnis des mittleren volumetrischen Dampfvolumentails α erforderlich. Da er nicht gemessen wurde, wird die von Friedel /4/ empfohlene Beziehung von Rouhani /5/ benutzt, welche aus dem Driftgeschwindigkeitsmodell von Zuber-Findlay /8/ abgeleitet wurde.

$$\alpha = (x/\rho_g) / [C^* / \rho_h + W_{rel} / G] \quad (1.20)$$

$$\text{mit } W_{rel} = (1,18/\sqrt{\rho_1}) (g \cdot \sigma(\rho_1 - \rho_g))^{1/4} \quad \text{und} \quad (1.21)$$

$$C^* = 1 + 0,12 (1-x) \quad . \quad (1.22)$$

Mit der Beziehung für W_{rel} wurde in (1.20) die lokale Relativgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Phasen berücksichtigt.

Der Faktor C^* in (1.20) berücksichtigt als Verteilungsparameter das ungleichförmige Strömungs- und Konzentrationsprofil des zweiphasigen Gemischs über den Strömungsquerschnitt.

Der Reibungsanteil kann aus dem gemessenen Gesamtdruckverlust nach folgender Beziehung ausgewertet werden:

$$\Delta p_{Reib} = \Delta p_{gem} + \Delta l (\alpha \cdot \rho_g + (1-\alpha)\rho_1) \cdot g \cdot \sin\varphi \quad . \quad (1.23)$$

Für eine vertikal aufwärts gerichtete Strömung wird $\sin\varphi = 1$ und somit wird $\Delta p_{Reib} > \Delta p_{gem}$, bei einer vertikal abwärts gerichteten Strömung wird $\sin\varphi = -1$, d.h. $\Delta p_{Reib} < \Delta p_{gem}$, bei waagerechter Strömung ist $\sin\varphi = 0$ und somit $\Delta p_{Reib} = \Delta p_{gem}$.

Zur Modellierung der zweiphasigen Druckdifferenzen Δp_{1-2} bzw. Δp_{1-3} im T-Stück werden die einphasigen Druckverlustkoeffizienten K_{12} bzw. K_{13} benötigt. Für ihre Bestimmung wird die Energiegleichung

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_2 + K_{12} \cdot \frac{u_1^2}{2g} \quad (1.24)$$

und

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 = \frac{u_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho \cdot g} + h_3 + K_{13} \frac{u_1^2}{2g} \quad (1.25)$$

herangezogen. Die Gleichungen (1.24) und (1.25) enthalten keinen Term, der die Druckverluste infolge Rohrreibung berücksichtigt, da diese bei der Bestimmung von Δp_{1-2} bzw. Δp_{1-3} durch Extrapolation des Druckgradienten für ausgebildete Rohrströmung im Zustrom und Abstrom bzw. Abzweig auf die Mitte des T-Stücks eliminiert werden.

Unter Vernachlässigung der geodätischen Höhen h_i sowie mit $G_i = \rho_l \cdot u_j = \dot{m}_l \cdot A_i$ ergibt sich

$$\Delta p_{1-2} = \frac{1}{2\rho} (G_2^2 - G_1^2) + K_{12} \frac{G_1^2}{2\rho} \quad (1.26)$$

und

$$\Delta p_{1-3} = \frac{1}{2\rho} (G_3^2 - G_1^2) + K_{13} \cdot \frac{G_1^2}{2\rho} \quad (1.27)$$

Die Druckdifferenzen Δp_{1-2} bzw. Δp_{1-3} können dabei als die Summe aus einem reversiblen und irreversiblen Term aufgefaßt werden:

$$\Delta p_{1-2} = (\Delta p_{1-2})_{\text{rev}} + (\Delta p_{1-2})_{\text{irr}} \quad (1.28)$$

$$\Delta p_{1-3} = (\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} + (\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} \quad (1.29)$$

Aus Messungen der Druckdifferenzen Δp_{1-2} bzw. Δp_{1-3} können dann K_{12} bzw. K_{13} mit Hilfe der Gln. (1.26) und (1.27) empirisch bestimmt werden.

1.3 Strömungsformen

Die Modellierung von Zweiphasenströmungen wird erschwert durch die mögliche Vielfalt der Verteilungen von gasförmiger und flüssiger Phase. Die Charakterisierung einer Zweiphasenströmung geschieht immer noch weitgehend empirisch, da nicht alle physikalischen Phänomene in vollem Umfang erfaßt sind. Es wird dabei eine Einteilung nach Strömungsformen vorgenommen, bei der zwischen Strömungen in horizontalen und vertikalen Rohren unterschieden wird. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurde im Fall der Luft-Wasser-Experimente bei einigen Versuchsserien eine Plexiglas-Teststrecke mit horizontalem Zustrom verwendet, um die Strömung sichtbar zu machen. Durch Beobachtung sowie anhand früher durchgeführter Untersuchungen zur lokalen Bestimmung des Phasenzustandes mit Sonden /6/, wurden die untersuchten Strömungsformen charakterisiert.

Bei einer Zweiphasenströmung durch ein horizontales Rohr strömt infolge der Schwerkraft die Flüssigkeit bevorzugt in der unteren, das Gas in der oberen Rohrhälfte. Je nach dem wie stark der Einfluß der Schwerkraft relativ zur Wirkung der Impulskräfte auf die Strömung ist, weichen die Strömungsformen in

einem waagerechten und in einem senkrechten Rohr - wo sie symmetrisch zur Rohrachse sind - voneinander ab. Zum besseren Verständnis der Massenstromumverteilung in einem T-Stück ist die Kenntnis der Strömungsform im waagerechten Zustrom von Bedeutung. Die in dieser Arbeit untersuchten Strömungsformen können folgendermaßen charakterisiert werden (Abb. 2 aus /7/): Die disperse Blasenströmung besteht aus in der flüssigen Phase verteilten Gasbläschen, die vermehrt dazu neigen, in der oberen Rohrhälfte zu strömen (vgl. Abb. 2). Die Geschwindigkeiten der einzelnen Phasen unterscheiden sich dabei nicht sehr voneinander, so daß i.a. ein Schlupf von $S = 1$ angenommen werden kann.

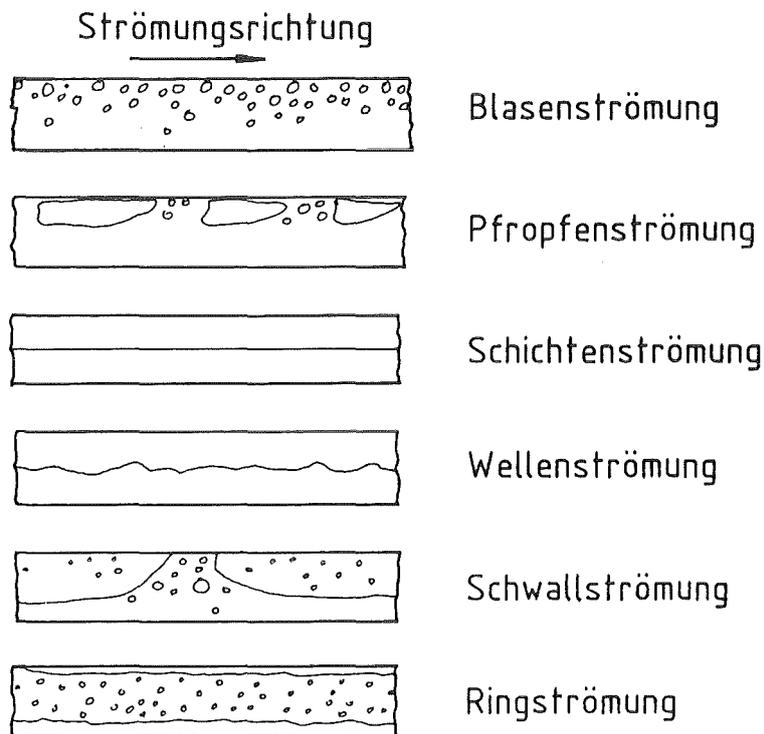


Abb. 2: Strömungsformen im horizontalen Rohr nach Hewitt /7/

Die Schwallströmung gehört zum Typ der intermittierenden Strömungsformen. Durch Anwachsen der Wellen bei einer Wellenströmung kann es zur Bildung von größeren schaumigen Flüssigkeitsschwällen kommen. In einem Fall können diese Schwälle den ganzen Rohrquerschnitt einnehmen, im anderen Fall kommt es zu einer Phasenverteilung, die im wesentlichen aus Gas im oberen Teil und aus Flüssigkeit im unteren Teil des Rohres besteht. Auf dieser Flüssigkeitsschicht bewegen sich Schwälle, die nicht den ganzen Querschnitt einnehmen, als "Rollwelle" in relativ großen Abständen fort. In beiden Fällen wird Flüssigkeit an die obere Rohrwandung hochtransportiert und strömt zwischen den

Schwällen an der Rohrwand herunter. Mit der Erhöhung des Gasanteils in der Zweiphasenströmung nimmt der Dampfvolumenteil (Void) in den Schwällen und in der Flüssigkeitsschicht zu.

Mit einer weiteren Steigerung des Gasanteils erhält man eine Ringströmung, die in horizontalen Rohren durch eine dicke Flüssigkeitsschicht am Boden mit darin eingeschlossenen Gasbläschen charakterisiert ist. Im oberen Teil des Rohres ist ein dünner Flüssigkeitsfilm zu verzeichnen. Die flüssige Phase ist somit exzentrisch im Querschnitt verteilt, im Gegensatz zum vertikalen Rohr, wo sie in einem konzentrischen Flüssigkeitsfilm am Rohrumfang strömt. Die Gasphase mit darin verteilten Tröpfchen füllt den restlichen Strömungsquerschnitt aus.

Eine Strömungsform, die nur in horizontalen Rohren vorkommt, ist die Schichtenströmung. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß die flüssige Phase durch den Einfluß der Schwerkraft vollständig im unteren Teil des Rohres strömt und die Gasphase im oberen Teil. Die Phasentrennfläche besitzt eine nahezu glatte Struktur, beide Phasen können mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten strömen.

2. Literaturübersicht

2.1 Einphasig durchströmte Abzweigungen

Die Arbeiten, in denen einphasige Strömungen in Rohrverzweigungen untersucht wurden, hatten zum Ziel, die einphasigen Druckverlustbeiwerte K_{12} und K_{13} (vgl. Gl. (1.26) und (1.27)) zu bestimmen.

Exemplarisch seien die Arbeiten von Vogel /10/ und Gardel /11, 12/ genannt. Die Autoren bestimmten experimentell für eine Wasserströmung die Druckverlustbeiwerte K_{12} und K_{13} für 45° und 90° Abzweigungen. Die einphasigen K_{12} und K_{13} sind als Funktion des Verhältnisses der Massenstromdichten G_3/G_1 in Abb. 3 für eine 90° Abzweigung mit gleichen Durchmessern aufgetragen. In Tabelle 1 sind die aus der Literatur bekannten Untersuchungen in einphasig durchströmten Abzweigungen zusammenfassend dargestellt.

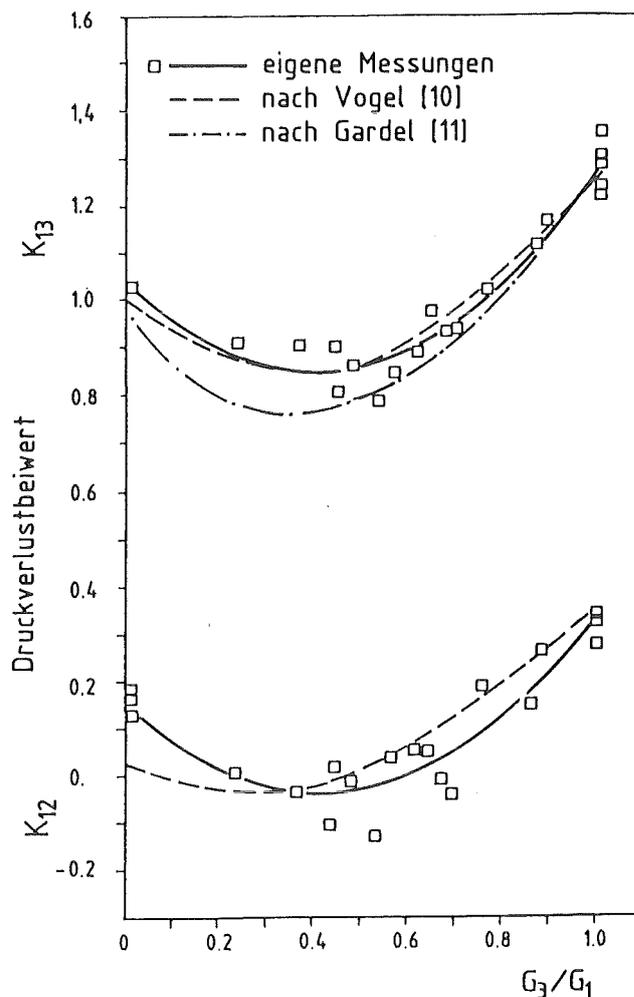


Abb. 3: Vergleich von gemessenen einphasigen Druckverlustbeiwerten mit Literaturwerten

2.2 Zweiphasig durchströmte Abzweigungen

Eine Übersicht über die aus der Literatur bekannten Arbeiten gibt Tabelle 2. In ihr sind die wichtigsten Geometrie - und Strömungsparameter sowie die gemessenen Parameter zusammengefaßt.

Im folgenden sollen die Arbeiten, die mit den hier vorgestellten Untersuchungen in einem engeren Zusammenhang stehen, ausführlicher diskutiert werden.

Die relevantesten Arbeiten zur Massenstromumverteilung auf dem Gebiet der zweiphasig durchströmten Abzweigungen haben Honan und Lahey /23, 24/, Zetzmann /25/, Collier /26/, Whalley und Azzopardi /27/, Azzopardi und Baker /30/, Azzopardi und Whalley /31/, Henry /33/ sowie Saba und Lahey /34/, Reimann und Khan /46/ und Smoglie und Reimann /47, 48, 63/ durchgeführt.

In den nächsten Abschnitten werden die o.g. Arbeiten nach Art der untersuchten Strömungsform im Zustrom eingeteilt und diskutiert.

2.2.1 Schaumströmung im Zustrom

Honan und Lahey /23, 24/ untersuchten das Separationsverhalten bei vertikaler Zuströmung und verschiedenen Abzweigrichtungen ($\Theta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) in einem Plexiglas T-Stück. Die Massenströme im Zustrom, Abstrom und Abzweig wurden durch Trennung der Phasen bestimmt. Schwierigkeiten ergaben sich bei der Messung des Gasmassenstroms im Abstrom. Durch den unerwartet kleinen Gasanteil kam es oft zu Meßbereichunterschreitungen an der Luftblende. Die Werte für m_{2g} wurden daher aus der Bilanz bestimmt und waren wegen ihrer geringen Größe mit einem relativ großen Fehler behaftet.

Differenzdruckmessungen wurden zwar durchgeführt, sind aber wegen der großen Schwankung der Manometeranzeige nicht veröffentlicht worden.

Honan und Lahey stellten erstens eine überraschend starke Phasenseparation fest. Dieser Sachverhalt war auch der Grund dafür, daß der Gasmassenstrom im Abstrom wegen zu kleiner Werte nicht mehr direkt gemessen werden konnte.

Ein zweites wichtiges Ergebnis war die starke Abhängigkeit der Phasenseparation vom Eintrittsdampfgehalt x_1 . So war für steigende x_1 eine zunehmende

Phasenseparation zu verzeichnen. Eine Abhängigkeit von der Eintrittsmassendichte G_1 oder vom Abzweigwinkel Θ wurde von Honan und Lahey nicht beobachtet. Im Bereich $0,1 < \dot{m}_3/\dot{m}_1 < 0,3$ führten Honan und Lahey keine Untersuchungen durch. Der Verlauf ihrer Separationskurven wurde von ihnen über den Meßbereich ($0,3 < \dot{m}_3/\dot{m}_1 < 0,7$) hinaus extrapoliert und zeigte einen monoton ansteigenden Verlauf ohne Maximum und anschließenden Abfall.

Zetzmann /25/ untersuchte ebenfalls vertikal aufwärts durchströmte 45° und 90° -Rohrabzweigungen. Er bestimmte die Separation der beiden Phasen an der Abzweigung sowie den dabei zusätzlich auftretenden Druckverlust. Durch die Variation der Durchmesser und der Abzweigwinkel wurde der Einfluß der Geometrieparameter untersucht. Für den Fall unterschiedlicher Rohrdurchmesser $D_3/D_1 < 1$ stellt er eine verstärkte Phasenseparation bei konstanter Massendichteaufteilung G_3/G_1 fest. Unterschiedliche Durchmesser bei gleichem Verhältnis D_3/D_1 zeigten keinen Einfluß auf die Phasenumverteilung.

Zetzmann führte die Experimente hauptsächlich im Bereich $0,1 < G_3/G_1 < 0,35$ durch. Er stellte fest, daß das Separationsverhalten bei konstanten Geometrieparametern und konstantem Massendichteverhältnis G_3/G_1 unabhängig vom Eintrittsdampfgehalt x_1 und nur in geringem Maße abhängig von der Massendichte G_1 im Zustrom ist. Als wesentliches Ergebnis findet er keinen monoton ansteigenden Verlauf der Separationskurven wie Honan und Lahey. Seine Kurven weisen vielmehr ein Maximum auf, wenn x_3/x_1 über G_3/G_1 aufgetragen wird.

Zetzmann kam ebenso wie Honan und Lahey zu der Aussage, daß eine Variation des Abzweigwinkels praktisch keinen Einfluß auf das Separationsverhalten hat. Zu den von Zetzmann durchgeführten Differenzdruckmessungen im Bereich des Abzweigs ist zu bemerken, daß er durch die zu geringe Anzahl von insgesamt nur vier Druckanbohrungen im Zustrom, Abstrom und Abzweig keine Kontrolle hatte, ob sich die vier Druckanbohrungen im Gebiet eines konstanten Druckgradienten der Zweiphasenströmung befanden. Die gemessenen Differenzdrücke über den Abzweig sind daher mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten.

2.2.2 Ringströmung im Zustrom

Die Arbeiten in Harwell bei der Atomic Energy Research Establishment Authority (AERE) konzentrierten sich hauptsächlich auf die Untersuchung des Separa-

tionsverhaltens einer Ringströmung in einem T-Stück mit vertikalem oder horizontalem Zustrom. Druckverlustmessungen entlang des Strömungsweges wurden nicht veröffentlicht.

Collier /26/ veröffentlichte Phasenseparationsmessungen an einem horizontal angeordneten T-Stück für kleine Eintrittsmassenstromdichten G_1 unter Variation des Eintrittsdampfgehaltes x_1 . Seine Messungen zeigen ebenfalls, daß die Phasenseparation, charakterisiert durch das Verhältnis x_3/x_1 , bei Variation des Massenstromverhältnisses \dot{m}_3/\dot{m}_1 , ein charakteristisches Maximum aufweist. Collier stellt ferner ein um so ausgeprägteres Separationsverhalten fest, je stärker der Dampfgehalt x_1 im Zustrom zunimmt.

Whalley und Azzopardi /27/ untersuchten eine Ringströmung in Abzweigungen mit vertikalem und horizontalem Zustrom. Für vertikalen Zustrom wurde in einer Meßserie der Wasserfilm an der Wand und ein Gasanteil durch eine poröse Schicht am Rohrumfang abgesaugt. In einer zweiten Versuchsreihe wurde die poröse Wand durch ein T-Stück mit horizontalem Abzweig ersetzt.

Experimente in einem T-Stück mit horizontalem Zustrom und einem gegen die Vertikale unter verschiedenen Winkeln geneigten Abzweig verglichen Whalley und Azzopardi mit analogen Flüssigkeitsfilmmessungen von Butterworth und Pulling /28/. Whalley und Azzopardi stellen eine Analogie zwischen der Bestimmung des Flüssigkeitsfilmmassenstroms einer Ringströmung mit der Methode der Absaugung durch einen porösen Wandabschnitt und der Massenstrombestimmung im Abzweig eines T-Stückes auf.

Für das horizontal angeordnete T-Stück stimmten die Messungen des Abzweigmassestroms bis auf einen mittleren Fehler von 30 % mit den Vorhersagen anhand der Filmmassenstrommessungen überein. Für die vertikale Anordnung wurden keine Angaben gemacht. Die Ergebnisse von Whalley und Azzopardi besitzen nur für Ringströmung Gültigkeit und sind nur für die untersuchte Geometrie gültig (vgl. Tab. 2).

Azzopardi und Baker /30/ setzten die Untersuchungen von Whalley und Azzopardi /27/ für das T-Stück mit vertikalem Zustrom und horizontalem Abzweig fort und dehnten sie auf das Gebiet der Schaumströmung aus. Zusätzlich wurden Aufnahmen in axialer Richtung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht. In einer zweiten Versuchsserie wurde das T-Stück durch die poröse Wand ersetzt

und Flüssigkeitsfilmmessungen für eine Schaumströmung im Zustrom vorgenommen. Ihre Ergebnisse zeigten eine ziemlich gute Übereinstimmung mit den Arbeiten von Whalley und Azzopardi /27/. Die Autoren schlugen daher vor, eine Schaumströmung in derselben Weise zu behandeln wie eine Ringströmung, d.h. es wurde eine Analogie zwischen der Bestimmung des Flüssigkeitsfilmmassenstroms einer Schaumströmung mit der Methode der porösen Wand und der Strömung in einem T-Stück hergestellt.

Die in Harwell durchgeführten Arbeiten wurden 1982 von Azzopardi und Whalley zusammenfassend vorgestellt /31/.

Während die Arbeiten in Harwell sich fast ausschließlich auf die Untersuchungen von Ringströmungen bei vertikaler Zuströmung beschäftigten, untersuchte Henry /33/ Ringströmungen für ein horizontales T-Stück mit $D_1 = D_2 = 100$ mm und $D_3 = 20$ mm. Er fand einen linearen Zusammenhang zwischen dem Flüssigkeitsmassenstrom \dot{m}_{13} im Abzweig und dem Gasmassenstrom \dot{m}_{g3} .

2.2.3 Schwallströmung im Zustrom

Saba und Lahey /34/ untersuchten überwiegend im Bereich der Schwallströmung für ein horizontal angeordnetes T-Stück die Phasenseparation und detailliert den Druckverlust entlang des Strömungsweges. Da die Teststrecke aus Plexiglas bestand, konnten die untersuchten Strömungsformen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen werden. Die Massenstromdichte G_1 im Zustrom und der Dampfgehalt x_1 wurden im gleichen Bereich wie bei den Untersuchungen von Honan und Lahey /23, 24/ variiert (vgl. Tab. 2). Ebenfalls wie in früheren Untersuchungen /23, 24/ wurden nur die drei Massenstromdichteverhältnisse $G_3/G_1 = 0,3; 0,5; 0,7$ untersucht. Wiederum wurde kein Maximum in der Verteilung der Separationskurven gefunden (s. Abb. 34). Die Ergebnisse von Saba und Lahey bzw. Honan und Lahey sind im untersuchten Bereich einander sehr ähnlich und zeigen praktisch keine Abhängigkeit von der Zustromrichtung.

Mit den aus den Experimenten zur Phasenumverteilung gewonnenen Daten ($x_1, G_1, \Delta p_{1-3}$ oder $x_1, \Delta p_{1-3}, \Delta p_{1-2}$) gelang es Saba und Lahey zum ersten Mal, ein empirisches Drift-flux-Modell für die Druckverluste über die Abzweigung ($\Delta p_{1-2}, \Delta p_{1-3}$) und für die Massenstromumverteilung zu entwickeln. Es wurden dazu fünf Erhaltungsgleichungen benutzt: Die Kontinuitätsgleichung für das Gemisch der beiden Phasen und für die Dampfphase, die Impulsgleichung für das

Gemisch im Abzweig und für das Gemisch im Zustrom sowie für die Dampfphase im Abzweig. In den Gleichungen sind vier Größen enthalten, die aus Experimenten von Saba und Lahey entnommen werden. Dies sind die beiden Druckverlustkoeffizienten K_{12} und K_{13} für die einphasige Strömung durch das T-Stück, die Länge $L = f(d_3, \rho_{11}, \rho_{g1}, G_1, G_3, x_1, x_3)$ einer charakteristischen Stromlinie der Dampfphase zwischen Zustrom 1 und Abzweig 3 sowie der Verteilungsparameter $C^* = f(\rho_{11}, \rho_{g1})$. Während die Druckverlustkoeffizienten K_{12} und K_{13} leicht aus einphasigen Messungen berechnet werden können (vgl. Gl. (1.26) und (1.27)), wurde die funktionelle Abhängigkeit der empirisch bestimmten Größen L und C^* von Saba-Lahey ohne physikalische Begründung angegeben. Trotz intensiver Bemühungen gelang es nicht, die Versuche von Saba und Lahey mit dem von ihnen vorgeschlagenen Modell nachzurechnen, so daß nicht versucht wurde, mit dem Modell die eigenen Experimente nachzurechnen. Die Gründe dafür werden derzeit mit den Autoren diskutiert.

2.2.4 Schichtenströmung im Zustrom

Bei einem Kühlmittelverluststörfall, verursacht durch ein kleines Leck in der Hauptkühlmittelleitung (Abreißen einer Rohrleitung kleinen Durchmessers), kann eine separierte Zweiphasenströmung, d.h. Schichtenströmung im Hauptrohr auftreten. Zuber /43/ stellte in einer Literaturübersicht fest, daß es für den Fall eines kleinen Lecks in einer waagerechten Leitung ($D_1 \gg D_3$) keine relevanten Untersuchungen gab. Diese Thematik wurde daher am Institut für Reaktorbauelemente aufgenommen und Experimente mit einer Plexiglas-Teststrecke mit waagerechtem Zustrom und verschiedenen Abzweigorientierungen begonnen /44, 45/. Versuche mit einer zweiphasigen Ausströmung aus Abzweigen kleiner Durchmesser bei geschichteter Strömung im Hauptrohr mit nach unten gerichtetem Abzweig sind von Reimann und Khan /46/ veröffentlicht worden, entsprechende Untersuchungen mit nach oben gerichtetem Abzweig von Reimann und Smoglie /47/ und waagerechtem Abzweig von Smoglie und Reimann /48/. In den Experimenten wurde die Abzweig-Massenstromdichte G_3 und Dampfgehalt x_3 bestimmt. Ferner wurden Kriterien für den Beginn des Luft- (bzw. Wasser-) Mitrisses für verschiedene Abzweigdurchmesser und -richtungen aufgestellt.

Die bisher durchgeführten experimentellen Arbeiten auf dem Gebiet der zweiphasig durchströmten Abzweigungen sind alle für Luft-Wasser Strömung und nahezu bei Atmosphärendruck durchgeführt worden. Zum überwiegenden Teil waren

die untersuchten Strömungsformen im Zustrom auf Ringströmung oder Blasenströmungen beschränkt.

Eine Variation des Systemdruckes wurde von keinem Experimentator durchgeführt. Die vorgestellten Untersuchungen zur Massenstromumverteilung an T-Stücken mit gleichen Durchmessern bei horizontaler Zuströmung sind für Durchmesser $D_1 < 38,1$ mm vorgenommen worden. Eine Variation der Abzweigorientierung wurde nur in einem Fall - jedoch ohne Druckverlustmessungen entlang des Strömungsweges - für $D_1 = 9,525$ mm durchgeführt /42/.

Aus den in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen wird ersichtlich, daß weitere systematische Experimente zur Massenstromumverteilung und zum Druckverlust von Zweiphasenströmungen in Rohrverzweigungen mit horizontalem Zustrom und unterschiedlichen Abzweigrichtungen für Durchmesser $D_1 > 38,1$ mm notwendig sind. Variiert werden sollten dabei in weiten Bereichen der Massenstrom und der Dampfgehalt des Zustromes, der Systemdruck sowie die Differenzdrücke über das T-Stück, um ein großes Spektrum von Phasen- und Geschwindigkeitsverteilungen (Strömungsformen) abzudecken.

3 Beschreibung der Versuchsanlage und Meßtechnik

3.1 Versuchskreislauf

Die Versuche zur Massenstromumverteilung in Abzweigen wurden am Dampf-Wasser- bzw. Luft-Wasser-Kreislauf für stationäre Zweiphasenströmung des Instituts für Reaktorbauelemente (IRB) im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) durchgeführt. Die Anlage wurde ausführlich in /49/ beschrieben.

Abb. 4 zeigt schematisch den Dampf-Wasser-Kreislauf der für Massenströme bis zu 5 kg/s und für Dampfgehalte zwischen 0 und 1 bei Systemdrücken bis zu 15 MPa ausgelegt ist. Zwei Dampferzeuger versorgen den Kreislauf mit leicht unterkühltem Wasser und leicht überhitztem Dampf. Die einphasigen Massenströme werden mit Blenden gemessen, bevor sie der Mischkammer zugeführt werden. Hinter der eigentlichen Teststrecke, welche noch ausführlich in Kapitel 3.2 beschrieben wird, wird das Zweiphasengemisch kondensiert. Das Kondensat wird wieder zurückgepumpt, der Kreislauf ist somit geschlossen.

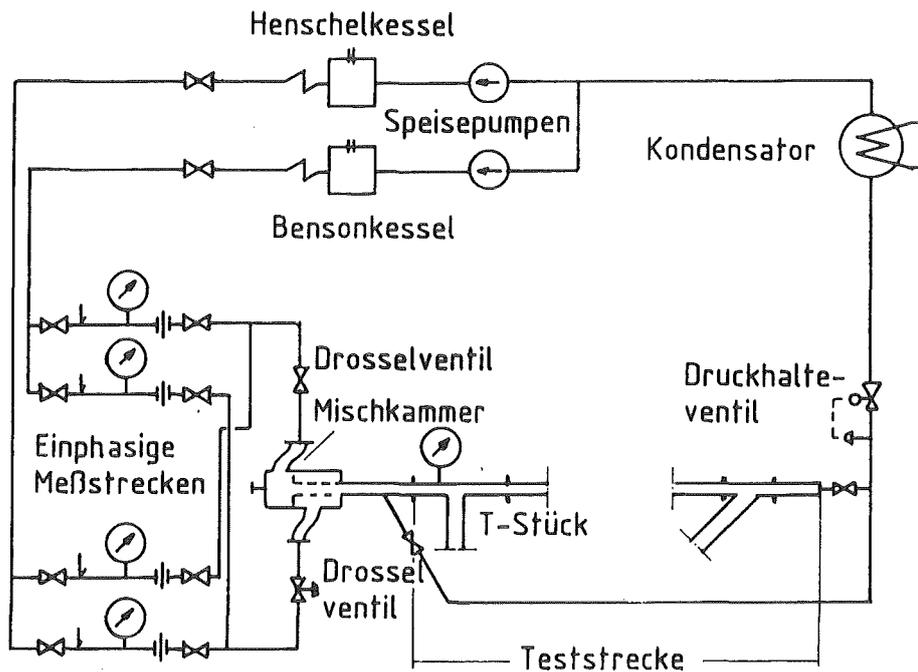


Abb. 4: Dampf-Wasser Kreislauf

Der Luft-Wasser-Kreislauf (Abb. 5) ist ausgelegt für einen maximalen Wassermassenstrom von 30 kg/s und einen maximalen Luftmassenstrom von 1 kg/s. Der maximale Systemdruck beträgt 1,2 MPa. Die einphasigen Massenströme werden wieder mit Blenden gemessen. Am Ende der Teststrecke wird die Luft an die Atmosphäre abgegeben, während das Wasser im Kreislauf verbleibt. Beide Kreis-

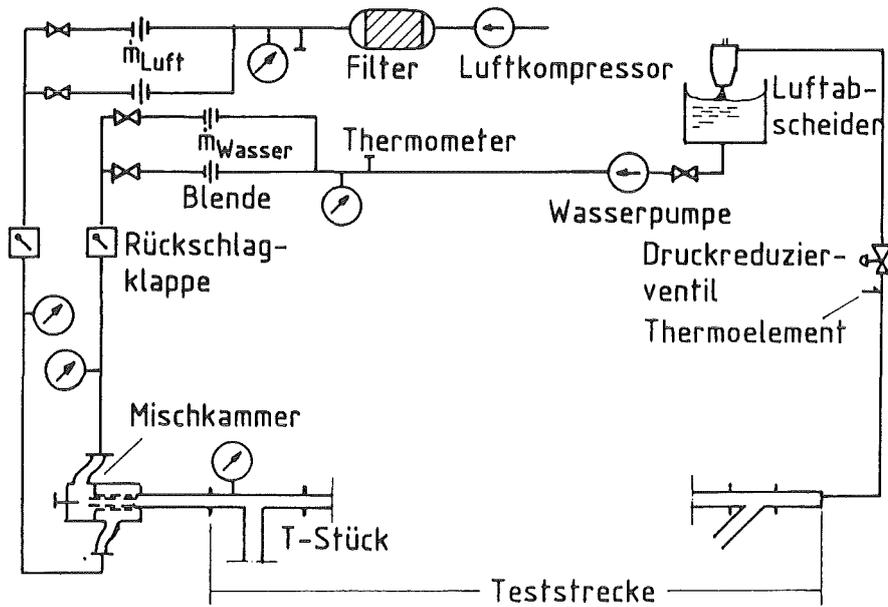


Abb. 5: Luft-Wasser Kreislauf

läufe können an dieselbe Mischkammer angeschlossen werden (vgl. Abbn. 4 und 5), an welche sich dann die Teststrecke für das zu untersuchende T-Stück anschließt.

3.1.1 Versuche zur Strömungsvisualisierung

Die Experimente zur Strömungssichtbarmachung wurden für Luft-Wasser-Strömung durchgeführt /50/.

Der für die Strömungssichtbarmachung wesentlichste Teil der Teststrecke bestand aus einem an den Mischkammeraustritt angeflanschten 0,97 m langem horizontalen Rohrstück, das wie das darauffolgende T-Stück aus dickwandigem Plexiglas bestand. Die kreisförmigen Strömungskanäle (alle Durchmesser 50 mm) wurden aus Vollmaterial gebohrt und anschließend poliert. Die Kanten im Bereich des Abzweigs sind scharf ausgebildet. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer Spiegelreflexkamera (2 Bilder/s) konnte die durch das T-Stück hervorgerufene Phasenseparation qualitativ erfasst werden.

3.2 Teststrecke und Instrumentierung

Abb. 6 zeigt schematisch den Aufbau der Teststrecke für die T-Stück-Experimente. Der übrige Kreislauf stromauf der Mischkammer bzw. stromab der Schnittstelle zu den Kondensatoren ist nicht dargestellt.

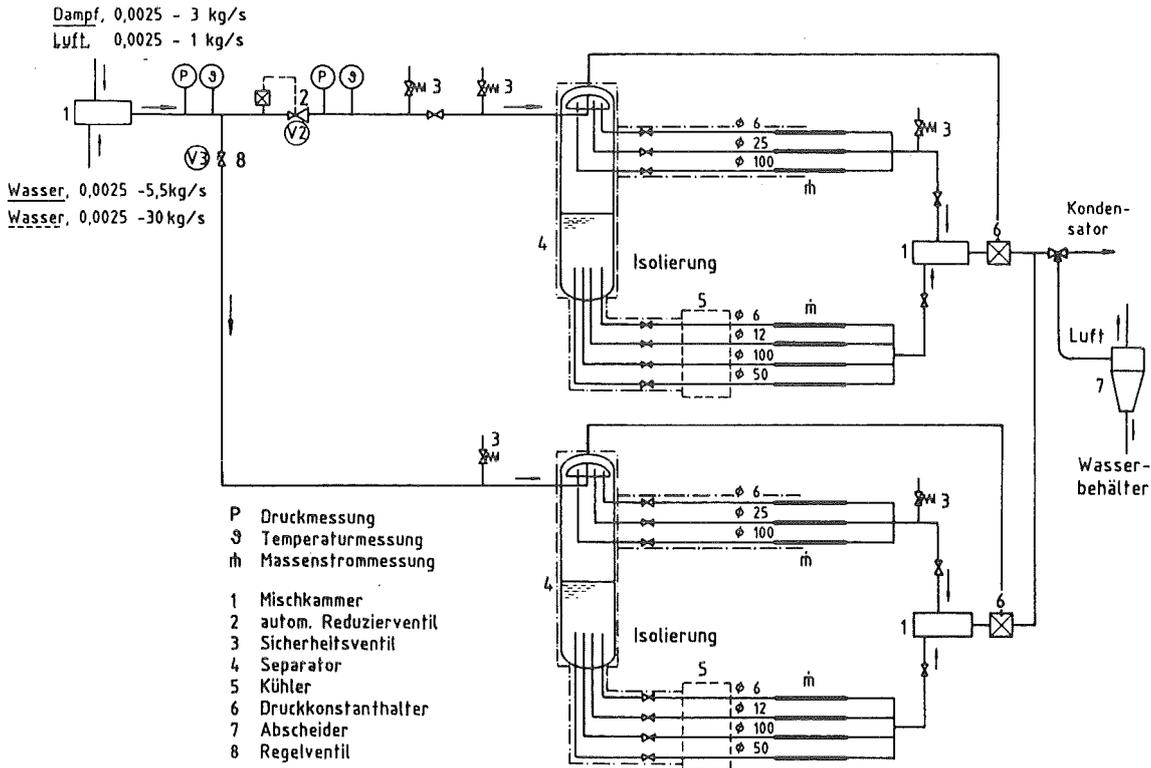


Abb. 6: Schematische Darstellung der Teststrecke

Nach der Mischkammer, in der die beiden einphasigen Massenströme zusammengeführt werden, strömt das Zweiphasengemisch durch ein waagrechtes Rohr ($D_1 = 50$ mm) zum T-Stück. Im T-Stück wird die Zweiphasenströmung in einen Abstrom- und Abzweiganteil auf- und umverteilt. In der Abzweigleitung ($D_3 = 50$ mm) befindet sich ein Drosselventil V3 zum Einstellen der Massenstromaufteilung \dot{m}_3/\dot{m}_1 . Das Druckreduzierventil V2 in der Abstromleitung ($D_2 = 50$ mm) hält den Systemdruck automatisch konstant. Nach den Ventilen V2 und V3 im Abstrom und Abzweig wird der Systemdruck von maximal 10 MPa auf maximal 0,5 MPa heruntergeregelt. Für die Separatoren und die sich daran anschließenden einphasigen Meßstrecken ist dies der höchst zulässige Druck. Der Flüssigkeitsstand in den Separatoren kann durch Regelventile, die sich am Ende des Dampf- und Wasser-

zweiges der Meßstrecken befinden, eingeregelt werden. Hinter den Meßstrecken werden die einphasigen Massenströme wieder zusammengeführt. Unmittelbar hinter den Mischkammern befinden sich Regelventile, mit denen der Druck in den Separatoren geregelt wird.

Die nun wieder zweiphasigen Gemische aus Abstrom und Abzweig werden vereinigt und strömen entweder zum Kondensator oder Luft-Wasser-Abscheider (vgl. Kap. 3.1).

3.2.1 Massenstrommessung

Um den Grad der Phasenseparation im T-Stück zu bestimmen, werden die einphasigen Massenströme im Zustrom, Abstrom und Abzweig gemessen. Bei den Luft-Wasser-Versuchen werden der Wassermassenstrom \dot{m}_{11} und der Luftmassenstrom \dot{m}_{1g} vor der Mischkammer mittels geeichter Normblenden bestimmt. Es stehen dazu je vier Blenden unterschiedlichen Meßbereichs zur Verfügung. Die Differenzdrücke an den Meßblenden werden an Quecksilber-U-Rohrmanometern abgelesen. Die Absolutdrücke an den Blenden sowie der Systemdruck werden mit Rohrfederanometern gemessen. Die Temperaturen für Luft- und Wasser werden vor den Meßblenden mit Quecksilberthermometern gemessen. Mit einem HP-97 Rechner werden dann die einphasigen Massenströme im Zustrom ausgewertet. Für die Dampf-Wasser-Versuche werden die entsprechenden Zustromwerte für den leicht überhitzten Dampf und das leicht unterkühlte Wasser mit elektrischen Meßwertgebern gemessen und Massenstrom und Dampfgehalt in der Teststrecke mit dem on-line betriebenen Rechner PDP 11/40 ermittelt /49/.

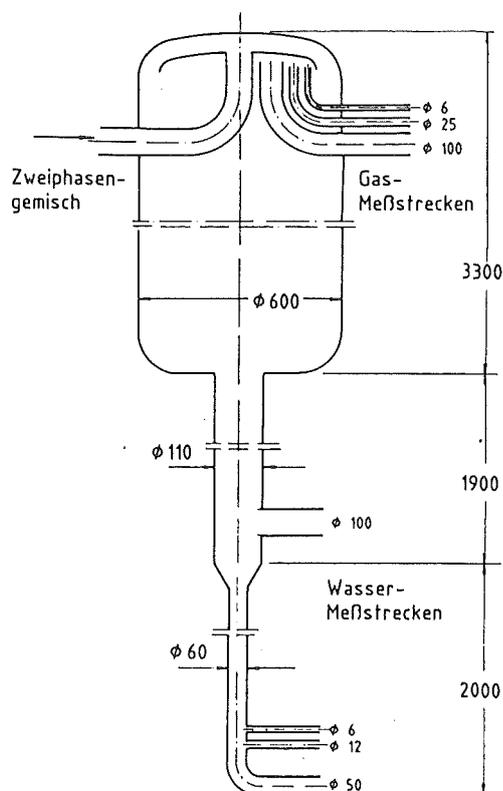
Die Bestimmung der Massenströme und Dampfgehalte in beiden Zweigen stromab des T-Stücks erfolgt sowohl bei Luft-Wasser- als auch bei Dampf-Wasser-Betrieb durch Separation der Phasen und anschließender Messung in einphasigem Zustand. Bei Dampf-Wasser-Betrieb werden die vom Separator abgehenden Dampfleitungen beheizt und die Wasserleitungen gekühlt, um zu gewährleisten, daß kein Phasenübergang stattfindet.

Bei sehr hohen Gasdurchsätzen im Separator tritt ein geringfügiger Wassermitriß in die Gasmeßstrecken auf. Dies beeinträchtigte die Genauigkeit der Gasmassenstrommessung bis zu einem gewissen Maße. Aus diesem Grund wurden in die Gasmeßstrecken der NW 100 im Abstrom und Abzweig zusätzliche Hilfsseparatoren eingebaut. Aufgrund der extremen Variationsbreite der einphasige Mas-

senströme ($0,024 < \dot{m}_{\text{liquid}} < 30 \text{ kg/s}$; $0,001 < \dot{m}_{\text{gas}} < 3 \text{ kg/s}$) befinden sich in jedem Dampfzweig 3 Meßstrecken, in jedem Wasserzweig 4 Meßstrecken. Diese Meßstrecken wurden mit variablen, geeichten Drosselstellen bestückt (Durchflußmeßgerät CD, Fa. Caldyn). Die meisten dieser Meßstrecken wurden für zwei verschiedene Drosselkörperstellungen geeicht, so daß die o.g. Massenstrombereiche mit guter Genauigkeit gemessen werden können. Die an den Drosselstellen anliegenden Absolutdruck- und Differenzdruckwerte werden mit elektrischen Absolut- und Differenzdruckmeßumformern (Rosemount Typ G 1151 DP) gemessen. Zur Messung der Luft-, Dampf- und Wassertemperaturen in den einzelnen Meßstrecken sind vor den Drosselstellen NiCrNi-Mantelthermoelemente angebracht.

Stromab der einphasigen Meßstrecken werden die Phasen wieder zusammengeführt und strömen zum Kondensator bzw. Luft-Wasser-Abscheider.

Bei der Konzeption der Versuchsanlage wurde besonderen Wert gelegt auf eine optimale Auslegung der Separatoren (Abb. 7). Das in den Separator einströmende Gemisch wird im Spalt zwischen oberem Gehäuseboden und Führungs-



blech verzögert; der Flüssigkeitsspiegel stellt sich im unteren Bereich des Separators ein; das Gas (bzw. der Dampf) wird durch die obere Entnahmerohre abgesaugt. Die Geschwindigkeit in der Nähe der Trennfläche soll klein sein; dies erfordert eine große Trennfläche (Separatordurchmesser). Bei kleinem Wasseranfall führt dies jedoch dazu, daß kleinste zeitliche Änderungen der Wasserspiegelhöhe, die nur ungenau gemessen werden können, zu wesentlichen Meßfehlern führen können. Der Separator wurde deshalb so konstruiert, daß, abhängig vom Wassermassenstrom, verschiedene Trennflächen eingestellt werden können.

Abb. 7: Separator

Sämtliche elektrischen Meßsignale für Druck, Differenzdruck und Temperatur werden mit dem on-line betriebenen Rechner PDP 11/40 erfaßt, gemittelt und in physikalische Werte umgewandelt.

Die berechneten Massenströme und Dampfgehalte des Zweiphasengemischs für den Zustrom, Abstrom und Abzweig des T-Stücks werden anschließend ausgegeben.

3.2.2 Druck- und Differenzdruckmessung in der Teststrecke

Der Systemdruck der Anlage wird über ein im Zustrom des T-Stücks angebrachtes Rohrfederanometer abgelesen. Der Meßbereich geht für Luft-Wasser-Strömung bis 1 MPa, für Dampf-Wasser-Strömung bis 15 MPa.

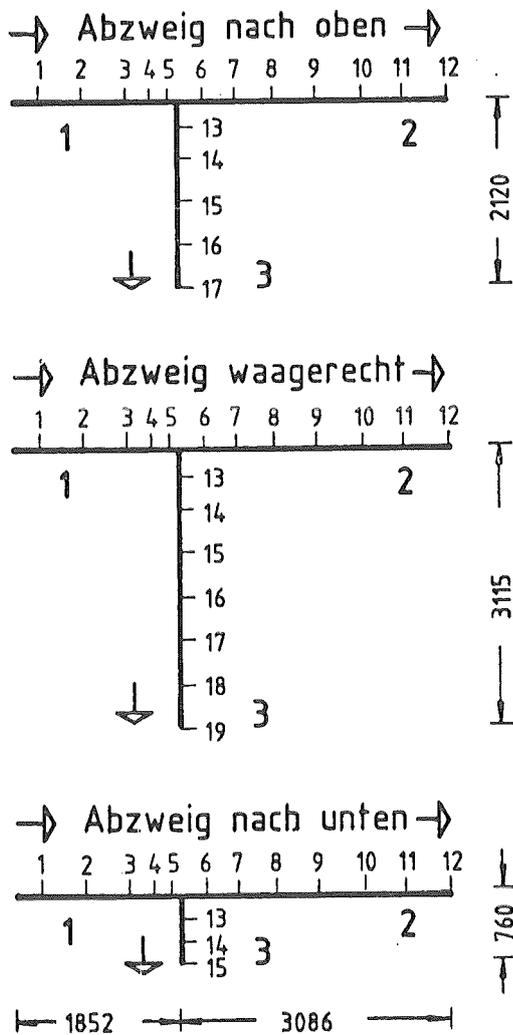


Abb. 8:
Abmessungen der Teststrecke und Lage der Druckanbohrungen

Zur Messung der Differenzdrücke entlang des Strömungswegs im Zustrom, Abstrom und Abzweig sind insgesamt bis zu 19 Druckanbohrungen ($d = 2,5 \text{ mm}$) angebracht. Abb. 8 zeigt für die drei untersuchten Abzweigorientierungen die Abmessungen der Teststrecke und die Lage der Druckanbohrungen. Die Druckanbohrungen sind über ein Meßleitungssystem mit vier parallel geschalteten elektrischen Rosemount-Differenzdruckmeßumformern verbunden (Meßbereiche: $\Delta p_1: 0-12 \times 10^2 \text{ Pa}$; $\Delta p_2: 0-30 \times 10^2 \text{ Pa}$; $\Delta p_3: 0-75 \times 10^2 \text{ Pa}$; $\Delta p_4: 0-370 \times 10^2 \text{ Pa}$) (Abb. 9) um stets in einem günstigen Meßbereich zu arbeiten.

Die Meßleitungen sind mit Wasser gefüllt. Um zu verhindern, daß Luft in die Meßleitungen eindringen konnte, wurde vor jeder Druckmessung durch Spülen der Meßleitungen Wasser über eine Spülleitung von den Transmittern bis an die Druckanbohrungen an der Rohrunterkante gedrückt. Abb. 9 zeigt das Schema der Differenzdruckmeßeinrichtung am Beispiel dreier aufeinander-

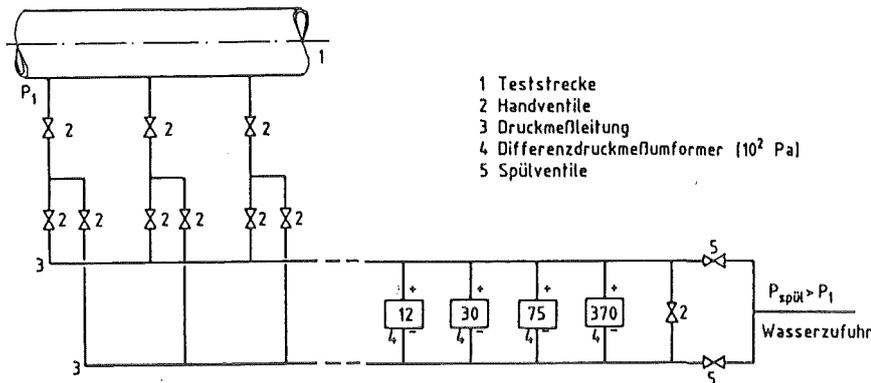


Abb. 9: Schema der Differenzdruckmesseinrichtung

derfolgender Druckerbohrungen. Durch Öffnen der entsprechenden Ventile zweier Druckmeßleitungen liegt der Differenzdruck an den Meßumformern an und kann gemessen werden.

3.3 Versuchsdurchführung

Das Einstellen eines stabilen Versuchspunktes im Zustrom wurde in /49/ beschrieben. Zur Messung der Phasenumverteilung im Abstrom und Abzweig wird bei konstant gehaltenem Versuchspunkt im Zustrom ($v_{s11} = \text{konst.}$, $v_{sg1} = \text{konst.}$, $p_1 = \text{konst.}$) die sogenannte Drosselkurve durchfahren. Dabei wird, ausgehend von einem Zustand mit geöffnetem Ventil V2 im Abstrom (s. Abb. 6) und geschlossenem Ventil V3 im Abzweig ("Full-Flow-Abstrom"), schrittweise das Abzweigventil geöffnet (Splitpunkt). Das Abstromventil schließt automatisch, weil es als Regelventil den Systemdruck konstant hält. Das Ende der Drosselkurve stellt der Zustand dar, bei dem das Abstromventil V2 geschlossen und das Abzweigventil V3 entsprechend geöffnet ist ("Full-Flow Abzweig"). Für einen konstant gehaltenen Zustromwert wurden bis zu 10 Splitpunkte eingestellt.

Bei den Luft-Wasser-Versuchen sind zum Einstellen eines Splitpunktes mindestens zwei Experimentatoren erforderlich. Während der eine das Ventil V3 im Abzweig bedient, beobachtet der zweite die Zustromwerte sowie den Systemdruck um gegebenenfalls nachregeln zu können. Für die Dampf-Wasser-Versuche werden die Zustromwerte von einer Schaltwarte aus überwacht und gegebenenfalls nachgeregelt /49/.

Hat man bei konstant gehaltenen Zustromwerten und Systemdruck durch das Öffnungsverhältnis der Abstrom- und Abzweigventile V2 und V3 einen Splitpunkt eingestellt, so müssen die einphasigen Dampf- und Wassermeßstrecken im Abstrom und Abzweig gewählt und die variablen Drosselstellungen eingestellt werden. Mit Hilfe eines Vielkanalschreibers wurden die elektrischen Differenzdrucksignale der Druckumformer für die Gas- und Wassermeßstrecken im Abstrom und Abzweig aufgezeichnet und beobachtet.

So wurde sichergestellt, daß man mit den benutzten Meßstrecken und gewählten Drosselstellungen im Meßbereich der Massenstrommeßstrecken lag. Als weitere wichtige Signale wurden die Höhenstände der beiden Separatoren im Abstrom und Abzweig kontinuierlich auf dem Mehrkanalschreiber zur Kontrolle aufgezeichnet. Für eine genaue Massenstrommessung der separierten Phasen in den Meßstrecken im Abstrom und Abzweig, war es - neben konstanten Zustromwerten - erforderlich, daß die Flüssigkeitshöhe in den Separatoren konstant war. Ein Fallen des Flüssigkeitsspiegels hätte eine zu hohe Wassermassenstrommessung \dot{m}_{21} bzw. \dot{m}_{31} zur Folge, ein Ansteigen des Flüssigkeitsspiegels andererseits eine zu niedrige.

Die Auswahl der Meßstrecken und insbesondere das Einstellen und Konstanthalten der Flüssigkeitshöhe in den Separatoren mußte für jeden Splitpunkt vor der eigentlichen Massenstrommessung aufs Neue vorgenommen werden, um einen stabilen Betriebszustand zu erreichen. Dies war besonders bei kleinen zu messenden Massenströmen mit erheblichem Zeitaufwand von bis zu zwei Stunden verbunden.

War ein stabiler Betriebszustand erreicht, d.h. Zustromwerte und Separatorhöhenstand waren konstant, so erfolgte die Bestimmung des Massenstroms mit Hilfe des on-line betriebenen Rechners PDP 11/40.

Die einphasigen Massenströme für Dampf bzw. Gas und Wasser werden gleichzeitig für den Zustrom, Abstrom und Abzweig berechnet. Über eine Bilanz wird für jede Phase die Summe aus Abstrom- und Abzweigmassenstrom mit dem Massenstrom im Zustrom verglichen und ausgedruckt. Für jeden Splitpunkt wurden zwischen 10 und 20 Massenstrommessungen durchgeführt und daraus anschließend die arithmetischen Mittelwerte berechnet.

Gleichzeitig mit den Massenstrommessungen wurden für jeden Splitpunkt die Druckverluste entlang der Strömungswege im Zustrom, Abstrom und Abzweig aufgenommen. Vor jeder einzelnen Differenzdruckmessung wurden jedesmal die Meßleitungen "gespült". Anschließend wurde der Differenzdruck (bzw. die Spannung) an den Differenzdruckmessumformern mit einem integrierenden Digitalvoltmeter gemessen. Eine Integrationszeit von 16 Sekunden war meist ausreichend. Bei stark schwankenden Strömungen (z.B. Schwallströmung) wurden mehrere Messungen mit 16 Sekunden Integrationszeit durchgeführt und daraus der arithmetische Mittelwert gebildet.

Je nach Anzahl der Splitpunkte waren für eine Drosselkurve zwischen einem und drei Versuchstage notwendig.

3.3.1 Versuchsmatrix

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Versuchsmatrix. Die Versuchspunkte sind in Strömungskarten eingetragen, in denen die bezogenen Flüssigkeitgeschwindigkeiten v_{sll} über der bezogenen Gasgeschwindigkeit v_{sgl} aufgetragen ist (vgl. Gl. 1.7 und 1.8).

In Abb. 10 sind die Versuchspunkte für Luft-Wasser-Strömung und alle drei Abzweigorientierungen dargestellt. Die Experimente wurden überwiegend für den Bereich der dispersen Blasenströmung, der Schwallströmung und der Ringströmung bei einem Systemdruck von 0,7 MPa durchgeführt.

Eine breite Variation des Systemdrucks wurde bei Dampf-Wasser-Strömung durchgeführt. Die Versuchspunkte für Systemdrücke zwischen 1,5 MPa und 10 MPa sind in Abb. 11 eingetragen. Zu beachten ist, daß sich die Grenzen der Strömungsbereiche für wachsenden Systemdruck verschieben (vgl. z.B. /51/). Die Grenze zwischen Schwall- und Ringströmung wandert für wachsenden Systemdruck nach links (s. Abb. 11).

Mit den Dampf-Wasser-Versuchen sollte der Einfluß des Systemdrucks auf die Phasenumverteilung und auf die Phasenseparation untersucht werden. Wegen der hohen Kosten des Versuchsbetriebes wurden nur Versuche mit waagrechttem Abzweig durchgeführt. Der Einfluß der Abzweigorientierung auf die Strömungsverteilung wurde in Luft-Wasser-Strömung untersucht.

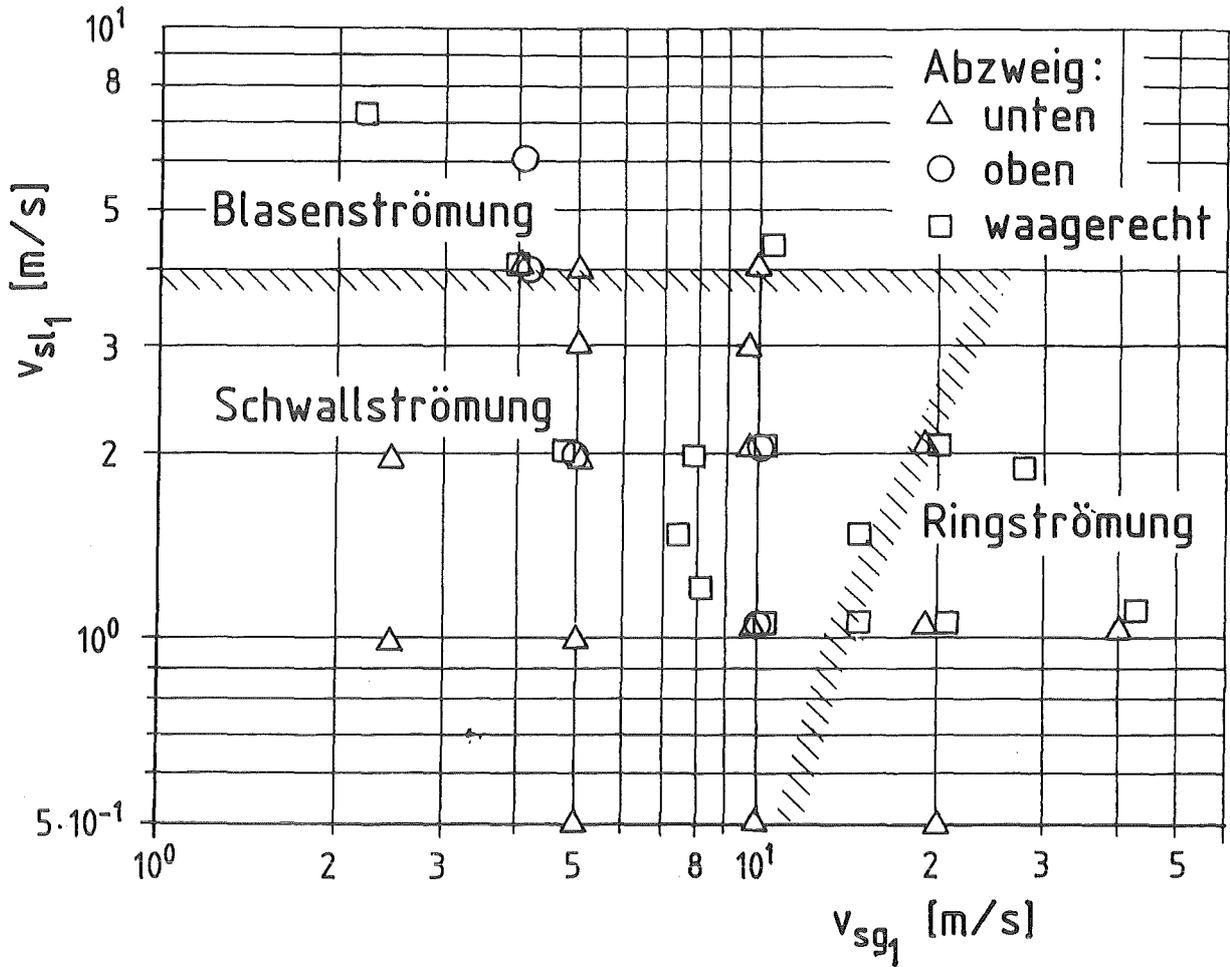


Abb. 10: Untersuchte Versuchspunkte für Luft-Wasser-Strömung

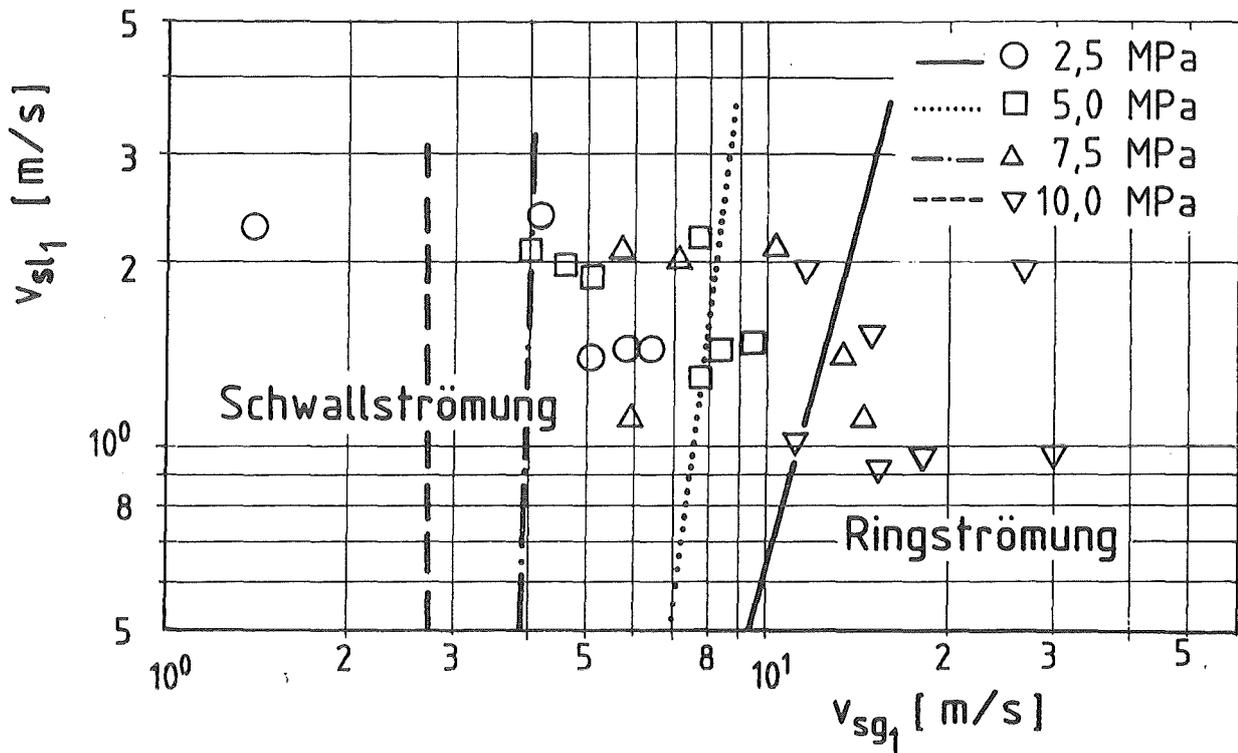


Abb. 11: Untersuchte Versuchspunkte für Dampf-Wasser-Strömung

3.4 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse

3.4.1 Massenstrommessung

In Kapitel 3.2.1 wurde schon erwähnt, daß während des Versuchsbetriebes sämtliche elektrischen Meßsignale für Druck, Differenzdruck und Temperatur gleichzeitig mit dem on-line betriebenen Rechner PDP 11/40 erfaßt, gemittelt und in physikalische Werte umgewandelt wurden. Die Werte für Druck und Temperatur am T-Stück, in den Separatoren und in den einphasigen Meßstrecken stromab der Separatoren konnten jederzeit zusammen mit den gemessenen einphasigen Massenströmen im Zustrom, Abstrom und Abzweig an einem Terminal am Versuchsstand abgefragt werden. Bei den Dampf-Wasser Versuchen wurde das zweiphasige Gemisch vom Systemdruck ($2,5 < p_1 < 10$ MPa) auf den Druck in den einphasigen Meßstrecken, die sich an die Separatoren anschließen, entspannt. Der aus den einphasigen Messungen im Abstrom und Abzweig errechnete Dampfgehalt mußte daher durch eine Enthalpiebilanz auf die Bedingungen, wie sie direkt am T-Stück herrschen (Systemdruck p_1 , Sättigungstemperatur T_s) umgerechnet werden.

3.4.2 Gemessene Druckdifferenzen

Die als elektrische Spannungen vorliegenden Differenzdrücke wurden in Dateien katalogisiert, und konnten so an der Großrechenanlage des Kernforschungszentrums ausgewertet werden. So können für jeden gemessenen Splitpunkt folgende Größen bestimmt werden:

- gemessener axialer Druckverlauf längs der Rohrachsen im Zustrom, Abstrom, Abzweig in Diagrammform,
- Druckdifferenz Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom,
- Druckdifferenz Δp_{1-3} zwischen Zustrom und Abzweig,
- gemessener Zweiphasenmultiplikator im Zustrom, Abstrom, Abzweig sowie aus der Literatur bekannte Zweiphasenmultiplikatoren /4/,
- verschiedene Beziehungen für den Dampfvolumenteil und den Schlupf S im Zustrom, Abstrom und Abzweig.

Abb. 12 zeigt beispielhaft für zwei Drosselstellungen bei konstant gehaltenen Zustromwerten die axiale Druckverteilung im Zustrom, Abstrom und Abzweig. Zur Bestimmung der Druckdifferenz Δp_{1-3} bzw. der Druckdifferenz Δp_{1-2} wird der Gradient des Druckverlaufs im Zustrom, Abstrom und Abzweig im Bereich eines

linearen Druckverlaufs durch lineare Interpolation festgelegt. Die Druckverläufe im Zustrom, Abstrom und Abzweig werden dann auf die Mitte des T-Stücks extrapoliert. Aufgrund der großen Anzahl von Meßdaten aus den Versuchsserien wurde die Interpolation, die Extrapolation sowie das Bestimmen von Δp_{1-3} bzw. Δp_{1-2} mit einem Rechenprogramm durchgeführt.

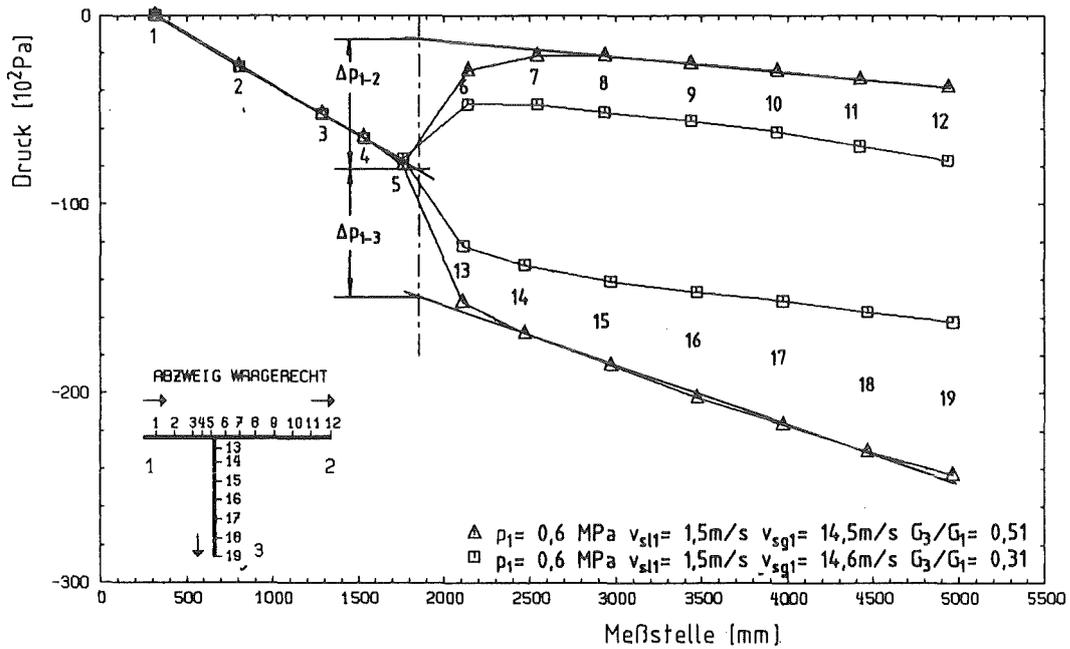


Abb. 12: Gemessene Druckverläufe bei 2 unterschiedlichen Massenstromdichteverhältnissen (Beispiel für waagerechtes T-Stück)

4. Betrachtungen zur Meßgenauigkeit

4.1 Massenstrommessung

Die Aufteilung der Gas- und Flüssigkeitsphase in einer Abzweigung ist mit dem bezogenen Dampfgehalt x_3/x_1 und dem Massenstromdichteverhältnis G_3/G_1 charakterisiert. Nach Gl. (1.3) hängen die Dampfgehalte x_1 und x_3 von den Luft- bzw. Dampf- und Wassermassenströmen im Zustrom und Abzweig ab, die wiederum während eines Versuches gewissen Schwankungen unterlegen sind.

Die Abschätzung der Meßgenauigkeit wird exemplarisch für einen schwierig zu erfassenden Versuchspunkt durchgeführt, der im Übergangsbereich von der Schwall- zur Ringströmung liegt ($v_{s11} = 1,5$ m/s, $v_{sg1} = 15$ m/s; waagerechtes T-Stück). Für diesen Luft-Wasser Versuchspunkt wurde während einer Versuchsserie (Durchfahren einer Drosselkurve) mehrmals die Schwankung der Luft- und Wassermassenströme im Zustrom (\dot{m}_{1g} , \dot{m}_{1l}) bestimmt. Dazu wurde am U-Rohrmanometer jeweils der Maximal- und Minimalwert sowie der Mittelwert abgelesen, welcher üblicherweise zur Auswertung verwendet wurde. Die maximale Abweichung vom Mittelwert betrug + 0,44 % bzw. -0,33 % für den Luftmassenstrom \dot{m}_{1g} und + 0,64 % bzw. -0,32 % für den Wassermassenstrom \dot{m}_{1l} .

Die Auswertung der übrigen Luft-Wasser-, sowie der Dampf-Wasser-Versuche ergab, daß die Massenströme \dot{m}_{1l} und \dot{m}_{1g} im Zustrom für Luft-Wasser bei konstantem Systemdruck weniger als ± 1 % vom Mittelwert abweichen. Die Genauigkeit der Dampf-Wasser Massenstrommessungen hing vom Wasseranteil des Zweiphasengemisches ab. Für Gemische mit einem höheren Wasseranteil war die Massenstrommessung mit größerer Genauigkeit durchführbar, da die Abhängigkeit der Dichte des Wassers vom Druck geringer ist. Jede Phase für sich betrachtet, konnte mit einem Toleranzbereich von 1,5 - 2,5 % genau gemessen werden /49/.

Der Strömungszustand im Zustrom konnte sowohl für die Luft-Wasser-, als auch für die Dampf-Wasser-Experimente in dem angegebenen Streubereich über Stunden hinweg aufrecht erhalten werden. Die Ermittlung der Massenströme \dot{m}_{21} bzw. \dot{m}_{2g} im Abstrom und \dot{m}_{31} bzw. \dot{m}_{3g} im Abzweig erfolgte bei einem stabilen Zustand der Anlage.

Mit dem Rechner wurden über einen Zeitraum von 15 - 20 Minuten ca. 10 - 20 Messungen der einphasigen Massenströme im Zustrom, Abstrom und Abzweig durchgeführt und jeweils der arithmetische Mittelwert errechnet. Bildet man mit

diesen Mittelwerten die Summe für die Gas- und Flüssigkeitsphase im Abstrom und Abzweig, so ergab sich bei den durchgeführten Versuchen eine Massenstromdifferenz gegenüber den Zustromwerten von maximal $\pm 5\%$. Bei gleichem relativen Meßfehler wurde immer der kleinere gemessene Massenstrom aus den Abstrom- und Abzweigwerten zur Auswertung verwendet und der jeweils fehlende Wert aus der Bilanz ermittelt,

z.B.
$$\dot{m}_{2l} = \dot{m}_{1l} - \dot{m}_{3l}$$

$$\dot{m}_{2g} = \dot{m}_{1g} - \dot{m}_{3g}$$

Wie schon erwähnt, zeigen die gemessenen Abstrom- und Abzweigmassenströme \dot{m}_{2l} bzw. \dot{m}_{2g} und \dot{m}_{3l} bzw. \dot{m}_{3g} eine größere Schwankung um den Mittelwert als die Massenströme \dot{m}_{1l} und \dot{m}_{1g} im Zustrom. In Abb. 13 ist für den Versuchspunkt $v_{sll} = 1,5 \text{ m/s}$, $v_{sgl} = 15 \text{ m/s}$ die Streuung der Massenstrommessungen und deren

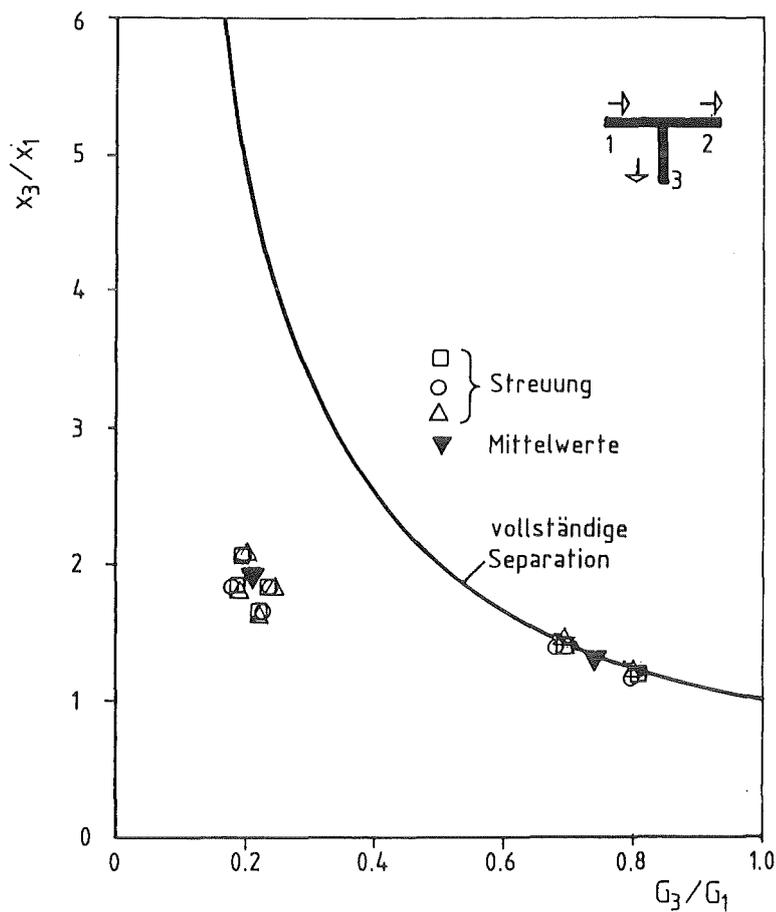


Abb. 13: Streuung der Massenstrommessung und Einfluß auf die Phasenseparation am Beispiel für $v_{sll} = 1,5 \text{ m/s}$ und $v_{sgl} = 15 \text{ m/s}$

Einfluß auf die bezogenen Dampfgehalte x_3/x_1 dargestellt. Hierzu wurden für zwei Splitpunkte zusammen mit den Mittelwerten sämtliche Kombinationsmöglichkeiten von Maximal- und Minimalwerten der Zustrom- Abstrom- bzw. Abzweigmasenströme und deren Einfluß auf den bezogenen Dampfgehalt x_3/x_1 aufgetragen.

Aus diesem auch für die anderen Messungen charakteristischen Beispiel kann man entnehmen, daß für kleine Massenstromdichteverhältnisse G_3/G_1 die bezogenen Dampfgehalte x_3/x_1 etwas stärker streuen, als bei größerem G_3/G_1 . Die maximale Fehlerbandbreite beträgt $\pm 15\%$. Für die Auswertung der Phasenumverteilungskurven bedeutet dies, daß manchmal die Lage der Maxima der Umverteilungskurven nur bedingt genau zu bestimmen ist.

4.2 Differenzdruckmessung zur Bestimmung des axialen Druckverlaufs

Zur Abschätzung der Genauigkeit der Differenzdruckmessung längs der Rohrachsen wurden für mehrere repräsentative Versuchspunkte mehrmals die über eine Integrationszeit von 16 Sekunden gemittelten Differenzdrücke zwischen zwei Meßstellen gemessen. Die Schwankung um den Mittelwert war bei den Differenzdruckmessungen kleiner als $\pm 1\%$. Die Differenzdruckmessungen konnten somit als genau angesehen werden.

Als Beispiel für mehrere hundert gemessene Druckverläufe ist in Abb. 12 für zwei Splitpunkte bei konstanten Zustromwerten der axiale Druckverlauf im Zustrom, Abstrom und Abzweig dargestellt. Der Druckverlauf längs der Rohrachsen setzt sich dabei aus 18 Einzeldifferenzdruckmessungen zusammen, die unabhängig voneinander durchgeführt wurden. Nach einer Einlaufphase zeigen sie für die eingelaufene Strömung im Zustrom, Abstrom und Abzweig einen konstanten Gradienten. Dies spricht ebenfalls für die Genauigkeit der einzelnen Differenzdruckmessungen.

5. Sichtbarmachung der Strömung

In diesem Kapitel wird die Umverteilung der Strömung beim Durchfahren einer Drosselkurve anhand von Photographien qualitativ beschrieben. Dazu wurden an der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Plexiglasteststrecke Aufnahmen mit einer Spiegelreflexkamera (2 Bilder/s) gemacht.

Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurden die Versuchspunkte so gewählt, daß sich im Zustrom folgende charakteristische Strömungsformen einstellen: Disperse Blasenströmung, Schwallströmung oder Ringströmung. Der Abzweig war senkrecht nach oben oder senkrecht nach unten angeordnet.

Die Abbn. 14 - 16 zeigen eine disperse Blasenströmung im Zustrom, wobei man den Eindruck hat, daß die Phasen nahezu homogen verteilt sind. In Abb. 14 ist das Abzweigventil V3 geschlossen, die Strömungsformen im Zu- und Abstrom sind daher gleich. Aufgrund von Oszillationen wird periodisch etwas Wasser in die rechte Seite des Abzweigs hineingedrückt, das auf der anderen Seite der Kanalwand infolge der Schwerkraft wieder herunterströmt. Öffnet man unter Konstanthaltung der Zustromwerte und des Systemdrucks etwas das Ventil V2 (Abb. 15), so strömt hauptsächlich Gas durch den Abzweig, das im rechten Bereich des Abzweigs mitgerissene Wasser strömt teilweise im linken Bereich wieder zurück. Da der Flüssigkeitsstrom im Abstrom sich nur geringfügig verringert hat, ist im Abstrom noch eine disperse Blasenströmung vorhanden.

Ein weiteres Öffnen von V3 ($G_3/G_1 \approx 0,5$) führt zu einer Verringerung des Massenstromes im Abstrom (Abb. 16). Dies hat zur Folge, daß sich die Phasen separieren. Nach einer gewissen Lauflänge bildet sich in der Abstromleitung eine Schwallströmung aus. Im Abzweig ist direkt hinter der Verzweigung ein Totwassergebiet vorhanden.

In den Abbn. 15 und 16 ist deutlich zu erkennen, daß der Gasanteil im Abzweig größer ist als der Gasanteil im Zustrom bzw. Abstrom.

Die Abbn. 17 bis 23 zeigen Aufnahmen aus einer Drosselkurve mit einer Schwallströmung im Zustrom ($p_1 = 0,5$ MPa, $v_{s11} = 2$ m/s, $v_{sg1} = 5$ m/s). In Abb. 17 ist das Abzweigventil V3 geschlossen ("voller Durchsatz im Abstrom"). Wasser pulsiert vereinzelt in die Abzweigleitung und fällt dann wieder herunter.

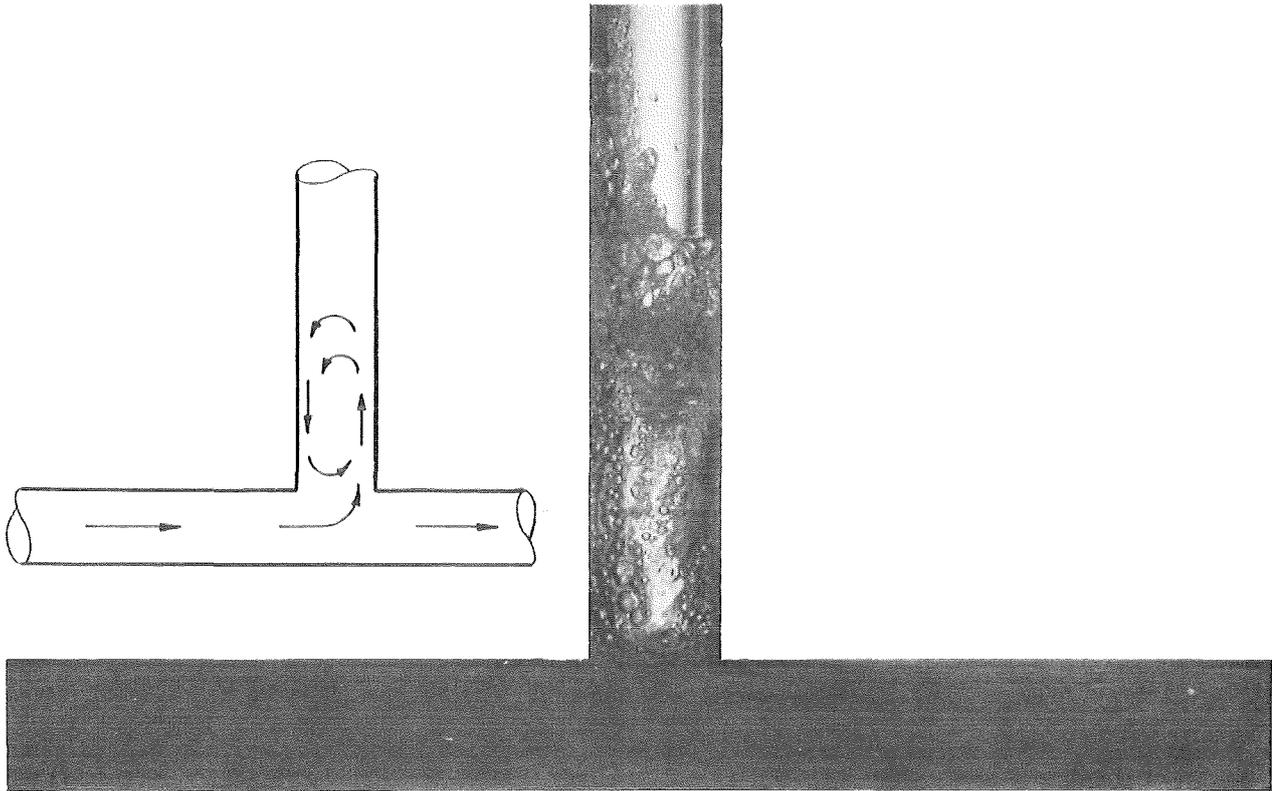


Abb. 14: Strömungszustand im T-Stück bei disperser Blasenströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0$; $v_{s11} = v_{sg1} = 4$ m/s; $p_1 = 0,5$ MPa

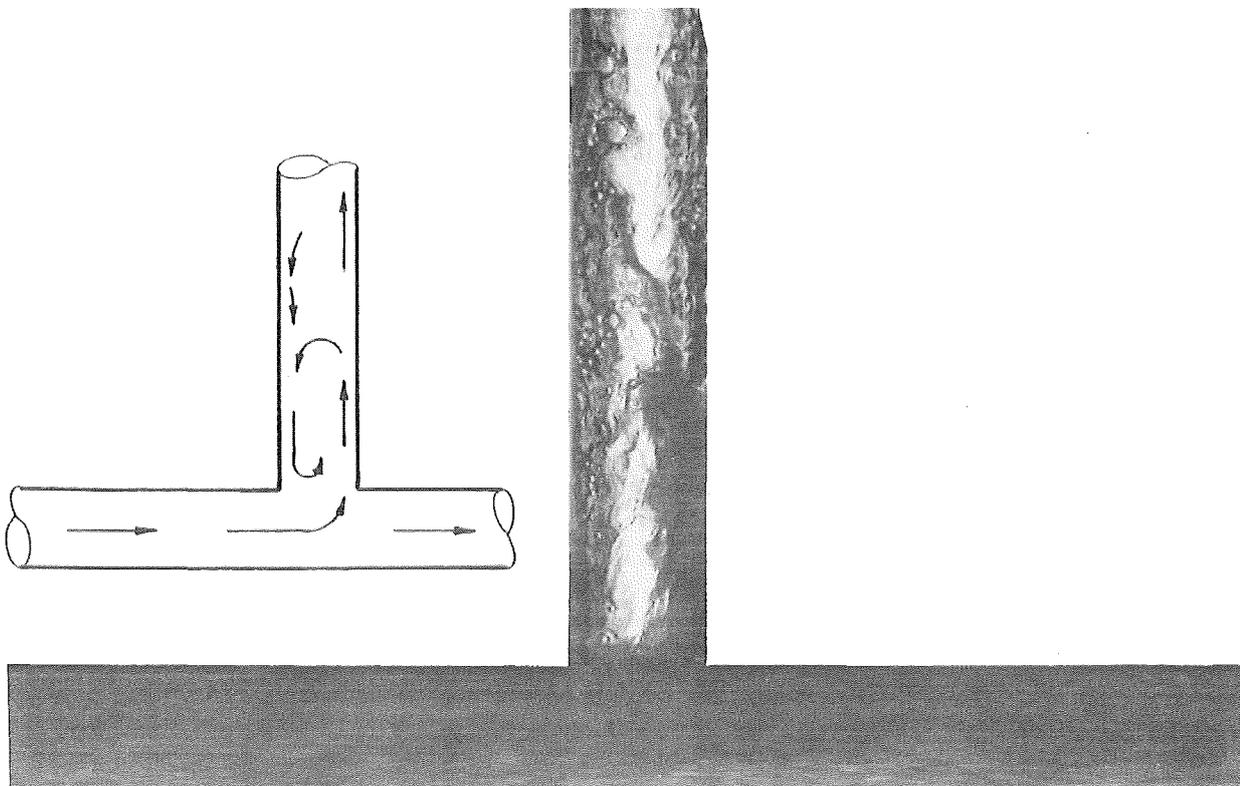


Abb. 15: Strömungszustand im T-Stück bei disperser Blasenströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 \ll 1$; $v_{s11} = v_{sg1} = 4$ m/s; $p_1 = 0,5$ MPa

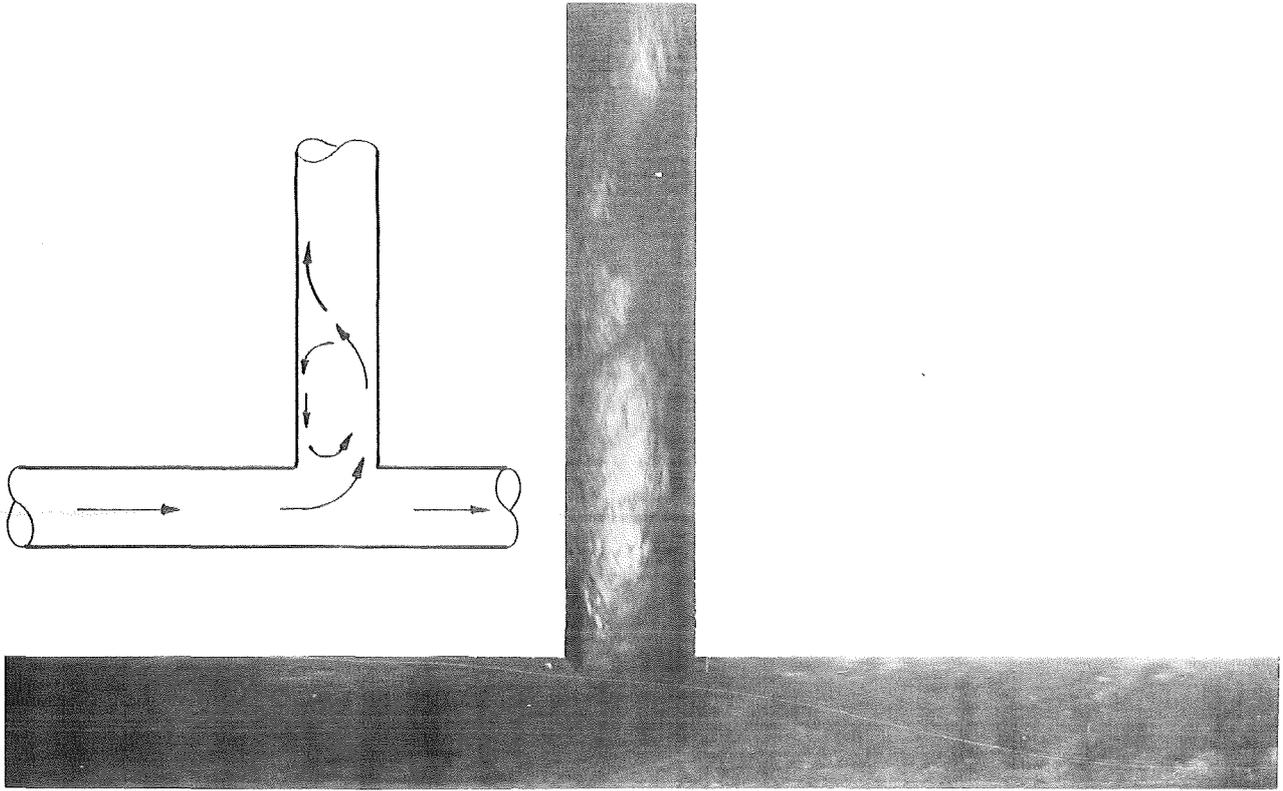


Abb. 16: Strömungszustand im T-Stück bei disperser Blasenströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 \approx 0,5$; $v_{s11} = v_{sg1} = 4$ m/s; $p_1 = 0,5$ MPa

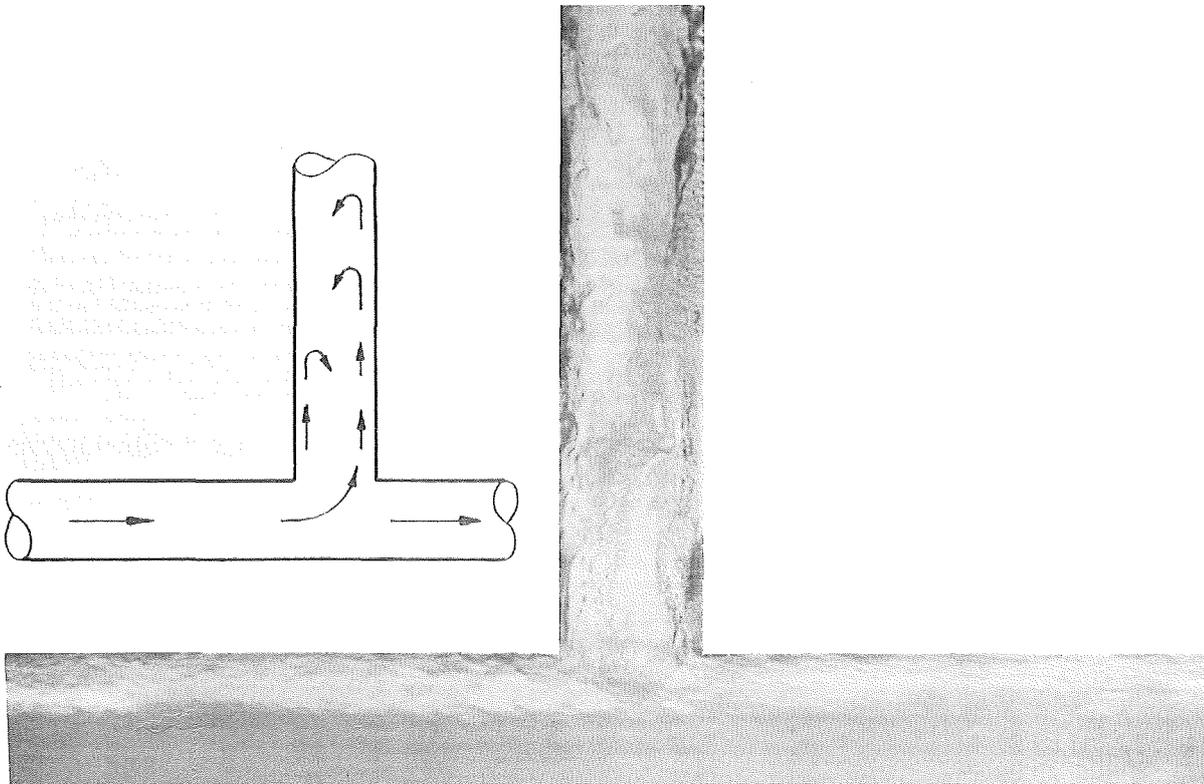


Abb. 17: Strömungszustand im T-Stück bei Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0$; $v_{s11} = 2$ m/s; $v_{sg1} = 5$ m/s; $p_1 = 0,5$ MPa

Abb. 18 zeigt den Fall, bei dem nur noch Luft aus dem Abzweig heraustransportiert wird ($G_3/G_1 \approx 0,015$). Das Wasser pulsiert im Abzweig. Ab einer Länge von ungefähr 0,4 m schweben oberhalb nur noch Wassertröpfchen im Gasstrom, die sich schließlich an der Wand niederschlagen und dann nach unten strömen. Dies ist in Abb. 19 dargestellt, die etwa 1,5 m über der Abzweigung aufgenommen wurde.

Abb. 20 zeigt eine Momentaufnahme für einen Splitpunkt $G_3/G_1 = 0,05$. Die Strömung im Abzweig oszilliert, Wasserschwälle fallen in sich zusammen, da die Schubspannung des Gases nicht groß genug ist, um einen nennenswerten Flüssigkeitsmassenstrom nach oben zu transportieren. Die nicht nach oben transportierte Flüssigkeit gelangt in das Totwassergebiet des Abzweigs und zirkuliert dort.

Eine Momentaufnahme für $G_3/G_1 = 0,28$ zeigt Abb. 21. Es strömt gerade ein Flüssigkeitsschwall durch die Verzweigung, so daß eine Phasentrennfläche nicht sichtbar ist. Im Abzweig ist eine Schaumströmung sowie ein Totwassergebiet hinter der Verzweigung zu erkennen. Abb. 22 zeigt das durchströmte T-Stück für $G_3/G_1 = 0,55$ und Abb. 23 ein Bild der Strömung im Abzweig etwa 1,5 m oberhalb der Verzweigung. Im Abzweig liegt eine Schaumströmung vor. Es ist zu sehen, wie die Phasentrennfläche in den Abzweig umgelenkt wird und sich hinter der Verzweigung im Abstrom ein Totwassergebiet ausbildet.

Abb. 24 zeigt die Teststrecke vom Mischkammeraustritt bis zum Ende des T-Stückes. Der Eindruck, daß das zwischen Mischkammer und T-Stück befindliche Rohrstück einen größeren Innendurchmesser als das T-Stück besitzt, entsteht dadurch, daß das Zwischenstück aus Rundmaterial, das T-Stück jedoch aus Vierkantmaterial gefertigt wurde.

Es wurde ein Versuchspunkt eingestellt, bei dem sich im ausgebildeten Zustand Ringströmung einstellen sollte. Es ist deutlich zu erkennen, daß im Zustrom zunehmend mit der Lauflänge von der Mischkammer das Wasser sich im unteren Kanalbereich konzentriert und der Flüssigkeitsfilm an der oberen Wand sehr dünn ist (exzentrische Ringströmung). Bei dem dargestellten Splitpunkt ($G_3/G_1 \approx 0,5$) gelangt daher ein größerer Wasseranteil in den Abzweig als in den Abstrom.

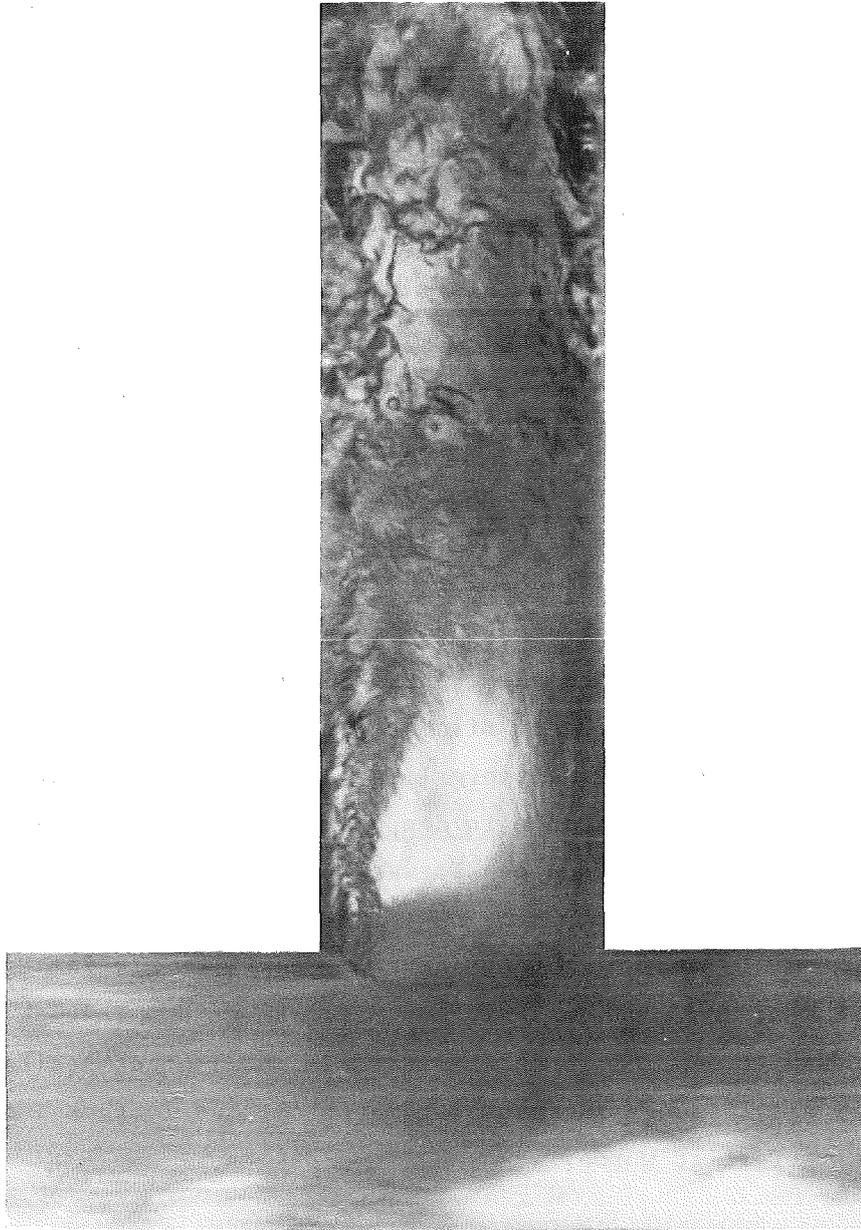


Abb. 18: Strömungszustand im T-Stück bei Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 \approx 0,015$; $v_{s11} = 2\text{m/s}$; $v_{sg1} = 5\text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5\text{ MPa}$



Abb. 19: Strömungszustand im Abweig bei Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 \approx 0,015$; $v_{s11} = 2\text{ m/s}$; $v_{sg1} = 5\text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5\text{ MPa}$

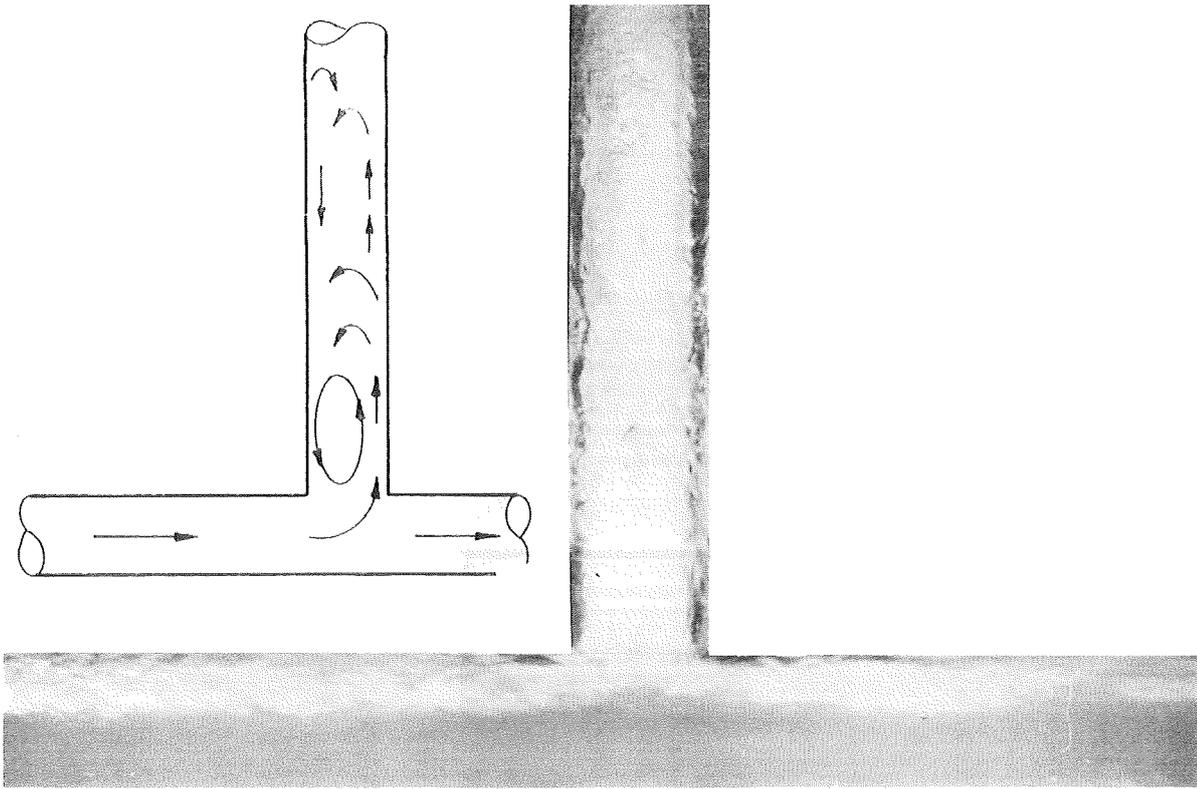


Abb. 20: Strömungszustand im T-Stück bei Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0,05$; $v_{s11} = 2\text{ m/s}$; $v_{sg1} = 5\text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5\text{ MPa}$

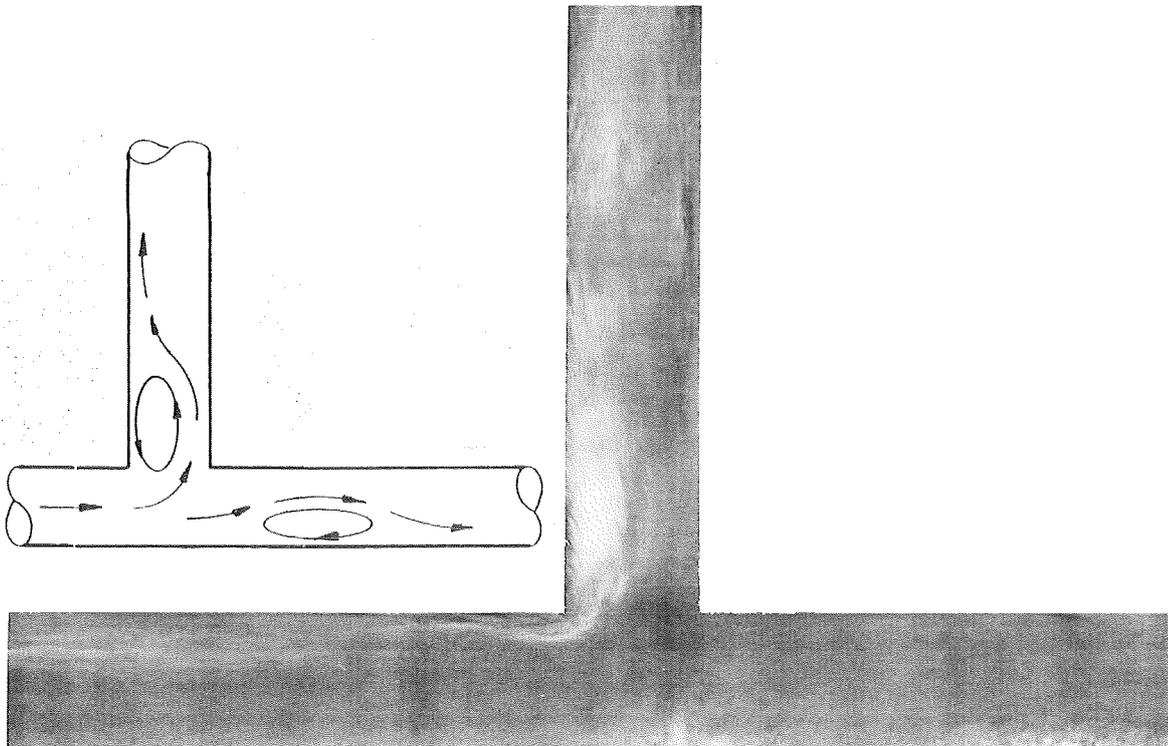


Abb. 21: Strömungszustand im T-Stück bei Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0,28$; $v_{s11} = 2\text{ m/s}$; $v_{sg1} = 5\text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5\text{ MPa}$

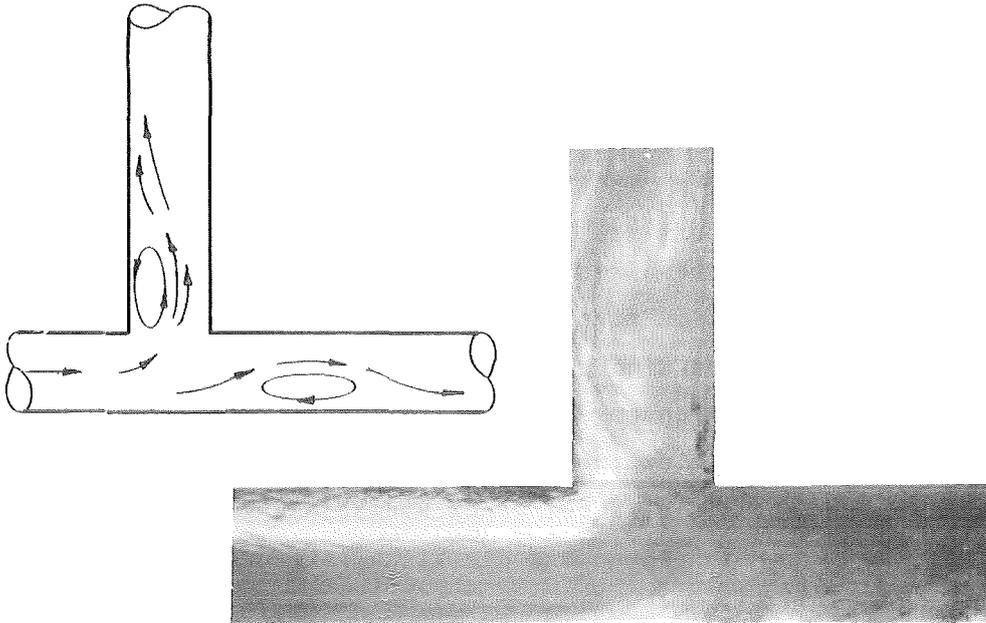


Abb. 22: Strömungszustand im T-Stück Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0,55$; $v_{s11} = 2 \text{ m/s}$; $v_{sg1} = 5 \text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5 \text{ MPa}$



Abb. 23: Strömungszustand im Abzweig bei Schwallströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0,55$; $v_{s11} = 2 \text{ m/s}$; $v_{sg1} = 5 \text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5 \text{ MPa}$

Zusammenfassend ist zu sagen, daß auf den Aufnahmen gut die Lage von Totwassergebieten zu erkennen ist. Durch die Sichtbarmachung der Strömung kann außerdem die Änderung der Strömungsform durch die Phasenumverteilung im Abzweig und Abstrom im Vergleich zum Zustrom beobachtet werden. Zu beachten ist, daß anhand der Momentaufnahmen nur eine qualitative Aussage gemacht werden kann. Dies gilt in besonderem Maße für die Schwallströmung, die als intermittierende Strömung im Prinzip für eine Beschreibung mit Momentaufnahmen ungünstig ist. Trotzdem sind gerade bei dieser Strömungsform wegen ihrer bereits stark separierten Phasenverteilung im Zustrom die sich einstellenden Strömungsvorgänge Ablösegebiet im Abstrom und Abzweig, Phasentrennfläche im Zustrom besser sichtbar als etwa bei einer Ringströmung, da hier durch den Flüssigkeitsfilm an der Rohrwand die Visualisierung erschwert wird.

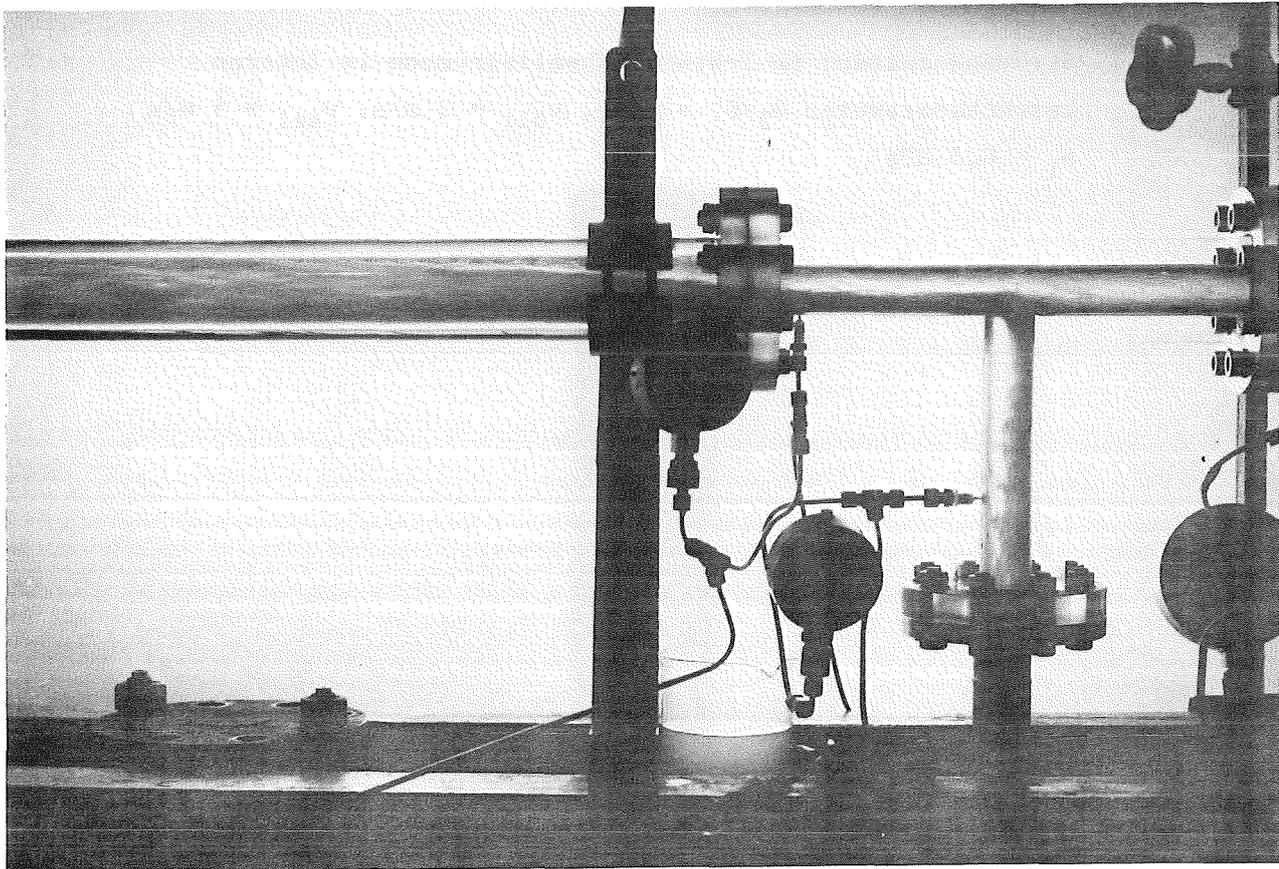


Abb. 24: Strömungszustand im T-Stück bei Ringströmung im Zustrom
Versuchsparameter $G_3/G_1 = 0,5$; $v_{s11} = 1 \text{ m/s}$; $v_{sg1} = 20 \text{ m/s}$
 $p_1 = 0,5 \text{ MPa}$

6. Massenstromumverteilung im T-Stück

6.1 Grundsätzliches zur Massenstromumverteilung im T-Stück

Bei der zweiphasigen Durchströmung einer Verzweigung wird das Zweiphasengemisch nicht nur aufgeteilt, sondern auch umverteilt d.h. die Dampfgehalte stromab der Verzweigung sind vom Dampfgehalt vor der Verzweigung verschieden.

Dafür gibt es im wesentlichen zwei Erklärungen:

a) Die Phasenseparation aufgrund der Massenträgheit.

Dieser Separationsmechanismus tritt im unmittelbaren Bereich des Abzweigs auf und ist unabhängig von dessen Orientierung. Die Aufteilung hängt von der Größe der örtlichen Impulsstromdichte ρu^2 der einzelnen Phasen ab. Die Gasphase mit einer niedrigen Impulsstromdichte und damit auch mit der kleineren Trägheit folgt der Druckdifferenz zwischen Zustrom und Abzweig besser als die schwerere Phase und strömt deshalb bevorzugt in den Abzweig.

b) Die Phasenseparation aufgrund der Schwerkraft.

Hier können zwei Situationen auftreten:

1. Eine separierte Phasenverteilung bei waagrecht angeordnetem Zustrom.

Hier strömt durch den Schwerkrafteinfluß die flüssige Phase je nach Strömungsform im Zustrom bevorzugt unten, die Gasphase oben, abgesehen von einer idealen Ringströmung bzw. dispersen Strömung. Das Separationsverhalten hängt in hohem Maße von der Abzweigorientierung ab; d.h. bei nach oben gerichtetem Abzweig strömt überwiegend Gas in den Abzweig, bei nach unten gerichtetem Abzweig strömt überwiegend die Flüssigkeit in den Abzweig.

2. Phasenseparation in der Abzweigleitung im Anschluß an das T-Stück.

Für den Fall des nach oben orientierten Abzweigs gelangt für kleine Massenstromdichteverhältnisse ($G_3/G_1 \ll 1$) die flüssige Phase zwar in den Abzweig hinein, wird aber vom Gas nicht mit hochtransportiert. In der vertikalen Abzweigleitung tritt dann eine starke Separation der zweiphasigen Strömung auf. Durch den Schwerkrafteinfluß fällt die Flüssigkeit zurück. Es bildet sich eine Rezirkulationszone aus.

Bei nach unten gerichtetem Abzweig ist dieser Separationsmechanismus weniger ausgeprägt, Gasblasen werden meist von der Flüssigkeit mit nach unten transportiert, abgesehen von extrem kleinen Wassergeschwindigkeiten. Bei waagerechtem Abzweig spielen Separationseffekte im Abzweigrohr keine Rolle für die Umverteilung.

Der Einfluß von Massenträgheit und Schwerkraft auf die Massenstromumverteilung läßt sich für die drei Abzweigorientierungen wie folgt zusammenfassen:

Bei der Orientierung nach oben wird die schon aufgrund der Massenträgheit auftretende Phasenseparation noch durch die schwerkraftbedingte Phasenseparation in der Abzweigleitung verstärkt. Bei waagerechtem Abzweig spielt der Schwerkrafteinfluß keine Rolle, die Phasenseparation ist im wesentlichen durch die unterschiedliche örtliche Impulsstromdichte und Phasenverteilung beider Phasen bestimmt. Ist der Abzweig nach unten gerichtet, so wirken Massenträgheit und Auftrieb der leichteren Phase einander entgegen und die Massenstromumverteilung ist davon abhängig welcher Effekt dominiert.

6.2 Waagerechter Abzweig

6.2.1 Luft-Wasser-Strömung

Die Untersuchungen in Luft-Wasserströmung haben zum Ziel, bei niedrigem Systemdruck ($0,6 < p_1 < 1$ MPa) den Einfluß der Abzweigorientierung und der Strömungsform im Zustrom auf die Phasenseparation zu bestimmen. Zur Darstellung der Phasenseparation werden in den folgenden Kapiteln die Meßergebnisse für eine Drosselkurve als bezogene Dampfgehalte x_3/x_1 über dem Massenstromdichteverhältnis G_3/G_1 aufgetragen (vgl. 3.4.3). Die im folgenden diskutierten vier Abbildungen 25 - 28 sollen den Einfluß der Strömungsform im Zustrom auf die Phasenseparation verdeutlichen.

In Abb. 25 ist das Separationsverhalten für Versuchspunkte mit einer konstanten bezogenen Flüssigkeitgeschwindigkeit $v_{s11} = 1$ m/s und zunehmender bezogener Gasgeschwindigkeit v_{sg1} dargestellt.

Für die Versuchspunkte wird beispielhaft für eine Drosselkurve (vgl. Kap. 3.3) die Phasenseparationskurve beschrieben.

Ausgehend vom Punkt $G_3/G_1 = 0$ (Abzweigventil V3 geschlossen) wird nach Öffnen des Ventils V3 überwiegend die an der Wand befindliche Flüssigkeitsschicht in den Abzweig abgesaugt; der Dampfgehalt x_3 im Abzweig ist kleiner als der Dampfgehalt x_1 im Zustrom ($x_3/x_1 < 1$). Der Dampfgehalt im Abzweig nimmt bis zu einem Maximum $(x_3/x_1)_{\max}$ zu, welches im Gebiet bei $G_3/G_1 \approx 0,3$ liegt. Soll die Massenstromdichte G_3 im Abzweig weiter erhöht werden ($G_3/G_1 > 0,3$), so kann dies nur durch eine wesentliche Erhöhung des Flüssigkeitsmassenstroms im Abzweig erfolgen. Die Folge davon ist, daß der Dampfgehalt x_3 abnimmt und damit auch die Phasenseparation. Bei großen G_3/G_1 verlaufen die Kurven in der Nähe der Kurve zur vollständigen Phasenseparation. Für $G_3/G_1 = 1$ ist der Dampfgehalt im Zustrom gleich dem Dampfgehalt im Abzweig.

Dieser Verlauf der Phasenseparationskurve ist typisch für alle Versuchspunkte bei waagrechter Abzweiganordnung.

Aus Abb. 25 und 26 ist zu ersehen, daß für $v_{s11} = \text{konst.}$ mit steigenden bezogenen Gasgeschwindigkeiten v_{sg1} die Separationskurven zu tieferen Werten (x_3/x_1) verschoben werden. Eine Ausnahme bilden die Punkte mit $v_{sg1} = 5$ bzw. 8 und 10 m/s in Abb. 26. Sie liegen im Bereich der Schwallströmung und zeigen, wenn man die Schwankungsbreite der Messungen zugrundelegt, kaum einen Unterschied im Kurvenverlauf.

Der unterschiedliche Verlauf der Phasenseparationskurven im Fall des waagerechten Abzweigs kann erklärt werden durch die örtliche Phasenverteilung und das lokale Impulsflußverhältnis $\rho_g u_g^{*2} / \rho_1 u_1^{*2} = \rho_g / \rho_1 \cdot S^{*2}$ im Bereich der Abzweigung. Demnach folgen immer Teilchen mit einer kleinen Impulsstromdichte bevorzugt der Druckdifferenz, die zwischen Zustrom und Abzweig herrscht. Im Bereich $G_3/G_1 \approx 0$ ist dies die flüssige Phase, die im Wandbereich, der zuerst abgesaugt wird, eine niedrige Geschwindigkeit u_1^* und damit eine kleine Impulsstromdichte $\rho_1 u_1^{*2}$ besitzt. Mit zunehmendem G_3/G_1 wird zunehmend Gas mit einer im Vergleich zur Wasserphase kleineren Impulsstromdichte (kleine Dichte) abgesaugt.

Ein systematischer Unterschied zwischen den Versuchspunkten mit $v_{s11} = 1$ m/s = const und $v_{s11} = 2$ m/s = const (vgl. Abbn. 25 und 26) ist praktisch nicht festzustellen; dies gilt besonders für den Bereich der Schwallströmung, wo die Punkte im Streubereich der Messungen liegen /52/. Bei Übergang von der Blasenströmung zur Ringströmung (Erhöhung von v_{sg1}) erhöht sich der Schlupf

zwischen den Phasen, so daß der Impulsfluß der Gasphase im Vergleich zur Wasserphase ansteigt, was sich in einem kleinen Wert für $(x_3/x_1)_{\max}$ auswirkt.

Abb. 27 zeigt das Separationsverhalten zweier Versuchspunkte aus dem Gebiet der dispersen Blasenströmung für $v_{s11} = 4 \text{ m/s} = \text{konst.}$ und $v_{sg1} = 4 \text{ m/s}$ bzw. $v_{sg1} = 10 \text{ m/s}$. Da beide Versuchspunkte örtlich im Bereich der Verzweigung annähernd den gleichen Schlupf S^* aufweisen, ergibt sich kein Unterschied im Impulsstromdichteverhältnis und somit ein gleicher Verlauf der Phasenseparationskurven.

In Abb. 28 wird der Einfluß der Massenstromdichte im Zustrom auf die Phasenseparation untersucht. Für v_{sg1} konst. wird v_{s11} von 2 m/s auf 7 m/s erhöht.

Mit der Erhöhung von v_{s11} , was gleichbedeutend ist mit der Zunahme der Massenstromdichte G_1 , verlaufen die Phasenseparationskurven flacher, das Separationsverhalten nimmt etwas ab.

6.2.2 Dampf-Wasser Strömung

Experimente zur Strömungsumverteilung in einer Dampf-Wasser Strömung bei hohen Systemdrücken sind bisher aus der Literatur nicht bekannt. Ziel der nachfolgend dargestellten Untersuchungen ist, bei gleicher Versuchsanordnung wie bei den Luft-Wasser Experimenten, die Bestimmung des Einflusses des Systemdrucks auf die Phasenseparation herauszufinden. Hierzu wurden mit horizontalem Abzweig Dampf-Wasser-Experimente bei Systemdrücken bis zu 10 MPa durchgeführt.

Wie bei den Luft-Wasser Versuchen wird zunächst der Einfluß der Strömungsform im Zustrom auf die Phasenseparation untersucht. Bei einem Systemdruck $p_1 = 2,5 \text{ MPa}$ wird v_{s11} mit 1m/s konstant gehalten und v_{sg1} von 11 m/s auf 30 m/s erhöht.

Wie Abb. 29 zeigt, ist die gleiche Tendenz wie bei den Luft-Wasser-Versuchen zu beobachten (vergl. Abb. 25). Mit steigendem v_{sg1} werden die Maxima der Separationskurven zu tieferen Werten verschoben. Eine ähnliche Tendenz zeigt auch Abb. 30, in der die Phasenseparationskurven für $v_{s11} = 2 \text{ m/s} = \text{const.}$ und für $v_{sg1} = 11 \text{ m/s}$ bzw. 26 m/s bei einem Systemdruck von 2,5 MPa aufgetragen sind.

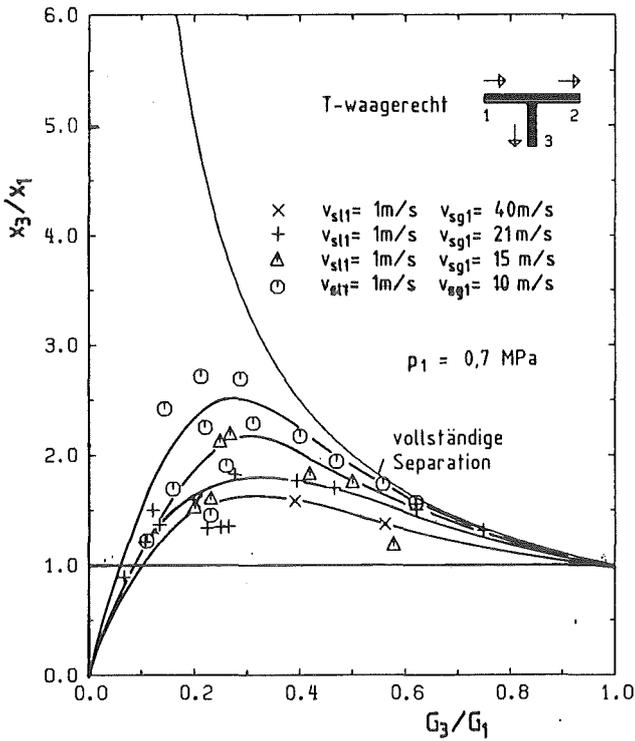


Abb. 25 Phase separation im T-Stück:
Luft-Wasser Strömung

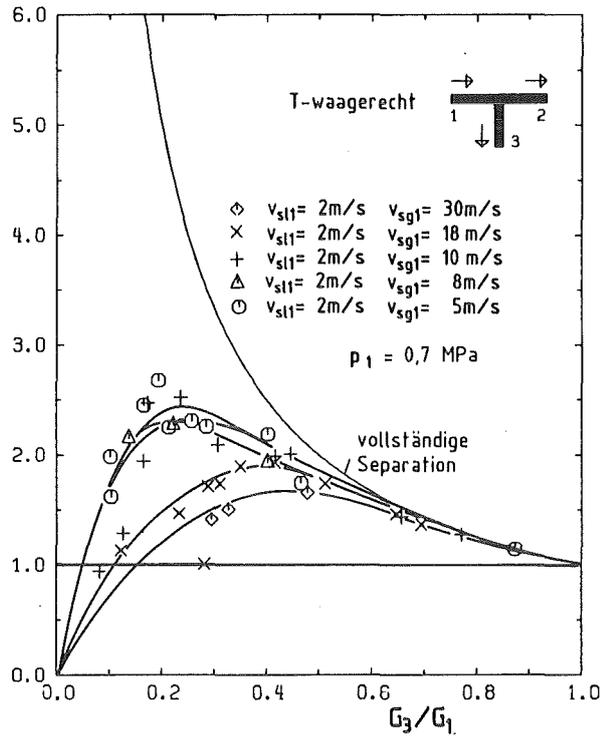


Abb. 26 Phase separation im T-Stück:
Luft-Wasser Strömung

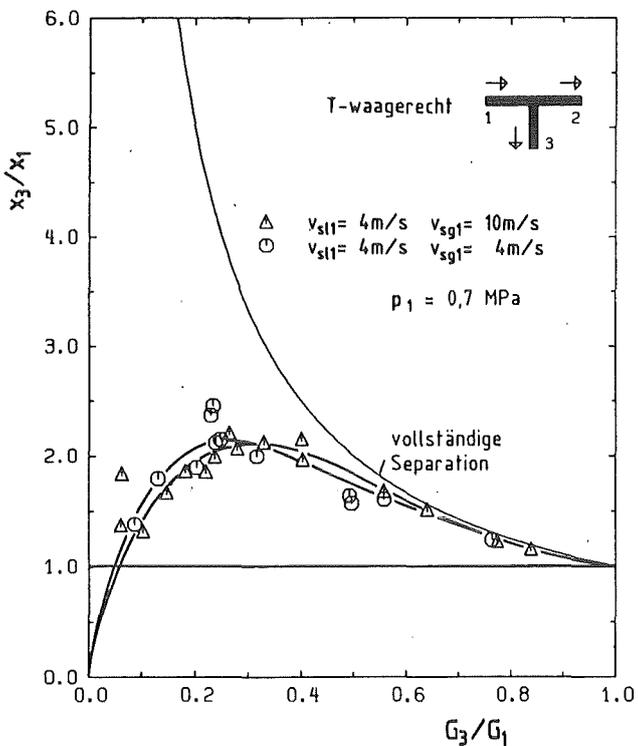


Abb. 27 Phase separation im T-Stück:
Luft-Wasser Strömung

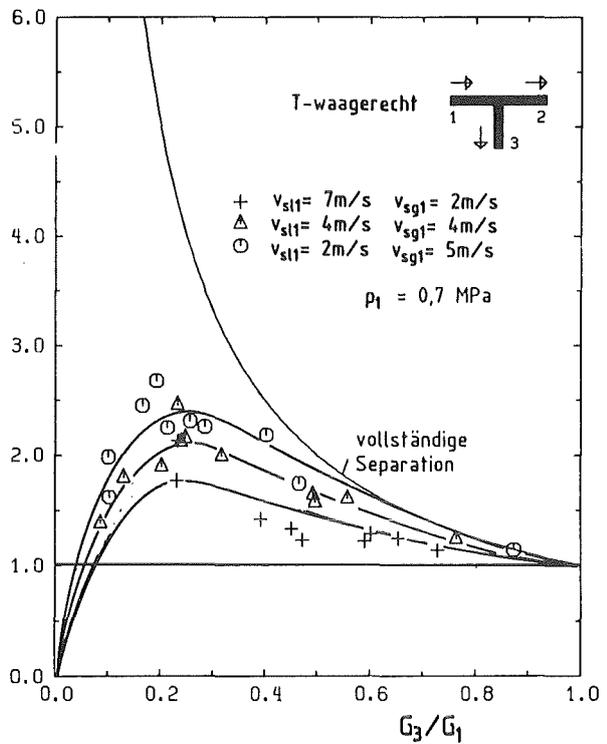


Abb. 28 Phase separation im T-Stück:
Luft-Wasser Strömung

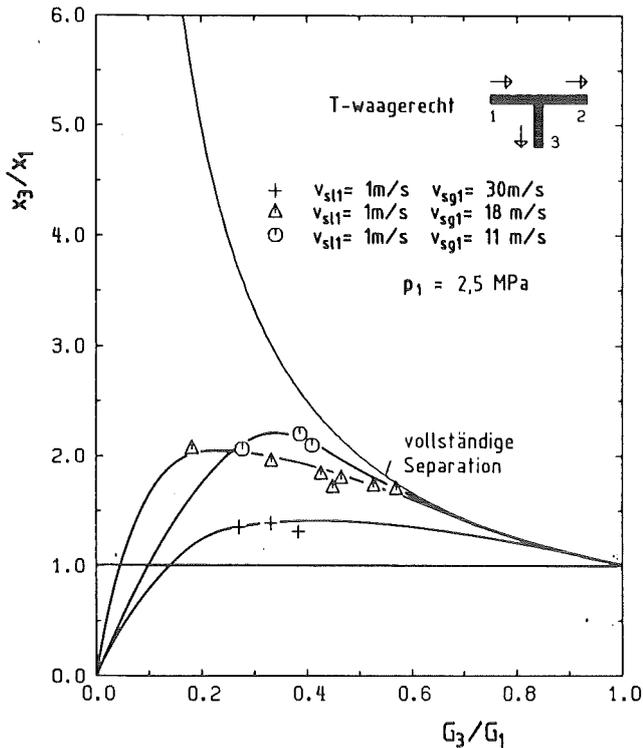


Abb. 29 Phasenseparation im T-Stück:
Dampf-Wasser Strömung

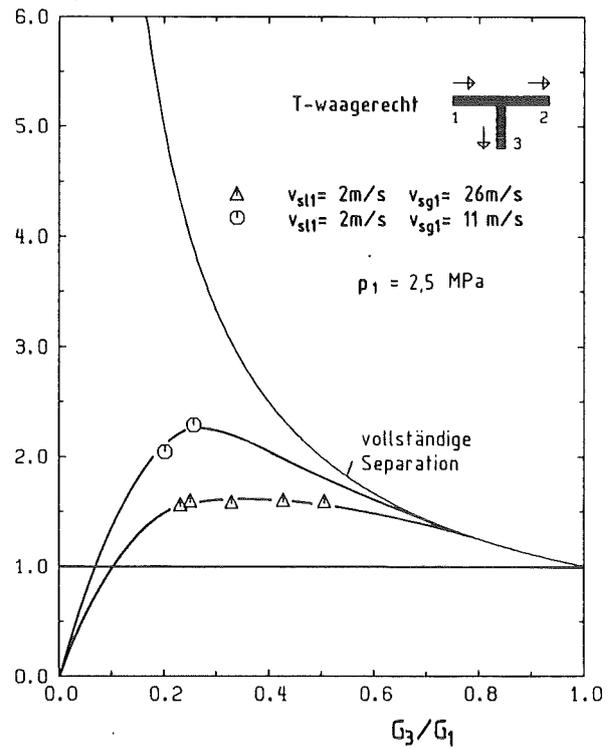


Abb. 30 Phasenseparation im T-Stück:
Dampf-Wasser Strömung

Vergleicht man die Kurven für Dampf-Wasser Strömung ($p_1 = 2,5 \text{ MPa}$) aus den Abb. 29 und 30 mit den entsprechenden Kurven für Luft-Wasser Strömung ($p_1 = 0,7 \text{ MPa}$) aus den Abb. 25 und 26, so stellt man fest, daß die Phasenseparationskurven bei den Dampf-Wasser Versuchen in der Tendenz niedrigere Werte als die Kurven für die Luft-Wasser Strömung aufweisen.

Dieser Einfluß des Systemdrucks auf den Verlauf der Phasenseparationskurven wird in den folgenden Abbildungen weiter diskutiert. Es werden hierzu Luft-Wasser Experimente und Dampf-Wasser Experimente für verschiedene Systemdrücke bei konstanten bezogenen Geschwindigkeiten im Zustrom diskutiert.

Es wurden nur Massenstromdichteverhältnisse im Bereich zwischen $0 < G_3/G_1 < 0,6$ untersucht, in dem auch die gesuchten Maxima $(x_3/x_1)_{\text{max}}$ der Separationskurven lagen. Im Bereich $G_3/G_1 > 0,6$ verhielt sich das untersuchte T-Stück nahezu wie ein idealer Separator, d.h. die Punkte der Separationskurven verlaufen dicht bei der Kurve der vollständigen Phasenseparation.

In Abb. 31 ist für eine Ringströmung im Zustrom der Einfluß des Systemdrucks auf die Phasenseparation dargestellt. Für $v_{s11} = 1 \text{ m/s}$ und $v_{sg1} = 15 \text{ m/s}$ werden für Luft-Wasser-Strömung Ergebnisse bei Systemdrücken von $0,4 \text{ MPa}$ und 1 MPa gezeigt sowie Ergebnisse für Dampf-Wasser Strömung bei Systemdrücken

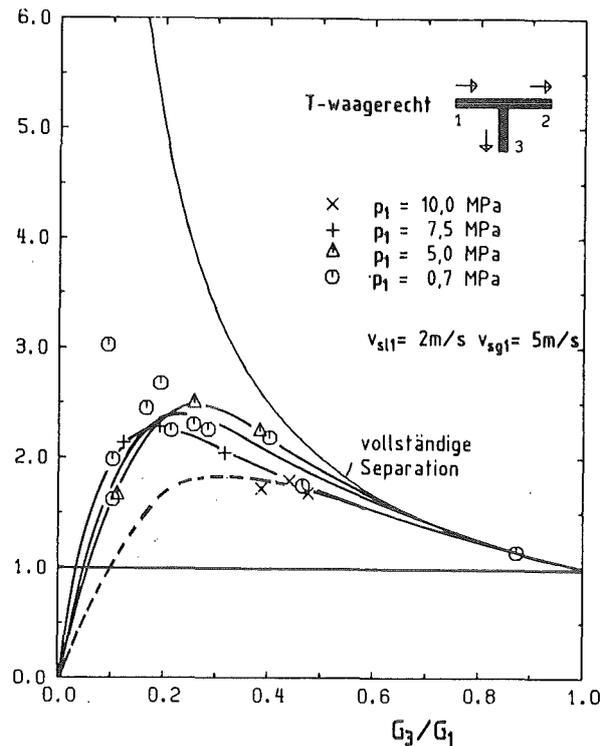
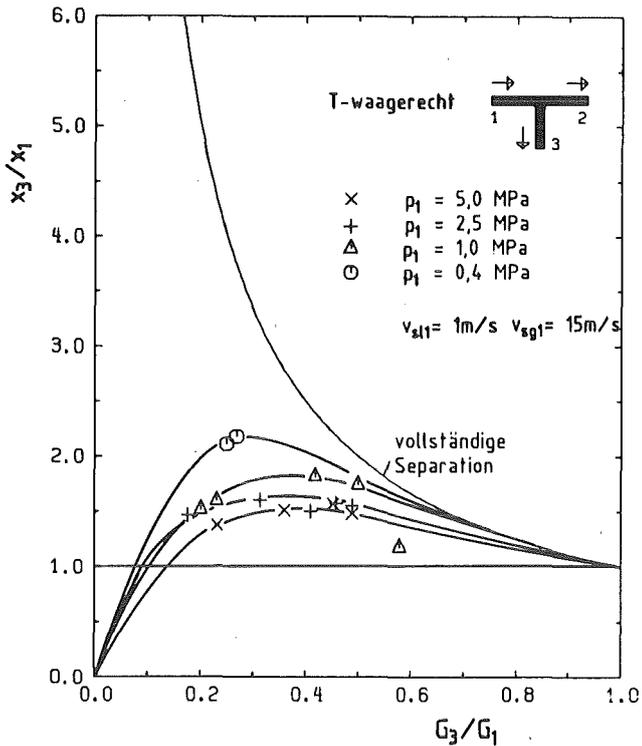


Abb. 31 Phasenseparation im T-Stück:
Luft-u. Dampf-Wasser Strömung

Abb. 32 Phasenseparation im T-Stück:
Luft-u. Dampf-Wasser Strömung

von 2,5 auf 5 MPa. Die Separationskurve und damit auch die Maxima $(x_3/x_1)_{\max}$ nehmen für steigenden Systemdruck kleinere Werte an. Der Grund dafür ist, daß mit Erhöhung des Systemdrucks die Dampfdichte zunimmt und die Wasserdichte und der Schlupf abnimmt; das Impulsstromdichteverhältnis strebt somit gegen 1.

Abb. 32 zeigt Ergebnisse für $v_{s11} = 2$ m/s und $v_{sg1} = 5$ m/s bei Luft-Wasser-Strömung ($p_1 = 0,7$ MPa) und für Dampf-Wasser Strömung ($p_1 = 5 - 10$ MPa).

Der Versuchspunkt mit Luft-Wasser-Strömung und der Versuchspunkt mit Dampf-Wasser-Strömung bei 5 MPa sind Punkte mit Schwallströmung im Zustrom. Wegen der größeren Schwankungsbreite dieser Strömungsform (vgl. 6.2.1) sind die Unterschiede im Kurvenverlauf der beiden Betriebspunkte vernachlässigbar. Bei weiterer Erhöhung des Systemdrucks unter gleichzeitigem Konstanthalten der bezogenen Geschwindigkeiten v_{s11} und v_{sg1} auf 7,5 bzw. 10 MPa ändert sich die Strömungsform im Zustrom /51/; es liegt eine exzentrische Ringströmung vor. Wie in Abb. 31 liegen auch hier die Werte der Separationskurven für den höheren Systemdruck unter den Werten bei niedrigerem Systemdruck.

Abb. 33 zeigt Ergebnisse für eine Schwallströmung im Zustrom ($v_{s11} = 2$ m/s; $v_{sg1} = 10$ m/s). Die Separationskurven für Luft-Wasser ($p_1 = 0,7$ MPa) und

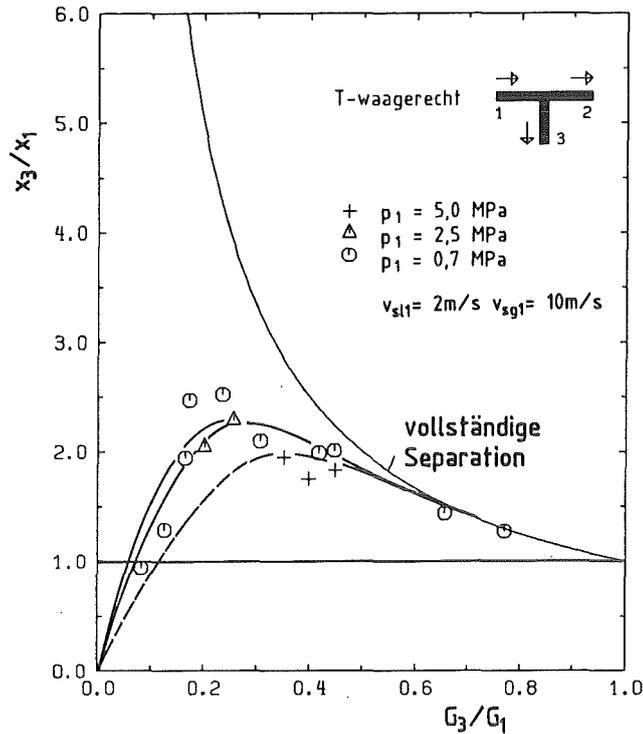


Abb. 33 Phasenseparation im T-Stück:
Luft- u. Dampf-Wasser Strömung

Dampf-Wasser ($p_1 = 2,5 \text{ MPa}$) zeigen den gleichen Verlauf. Einen Unterschied erkennt man erst bei Erhöhung des Systemdruckes auf 5 MPa, wo die Strömung von der Schwall- in die Ringströmung übergeht.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Phasenseparationskurven bei Luft-Wasser- und Dampf-Wasser-Strömung ein typisches Maximum aufweisen. Der Einfluß von Strömungsform im Zustrom und des Dichteverhältnisses auf die Phasenseparation ist relativ gering im Vergleich zum Einfluß der lokalen Phasengeschwindigkeiten.

6.2.3 Vergleich der Ergebnisse mit den Meßdaten anderer Autoren

Abb. 34 zeigt einen Vergleich der Meßergebnisse von Saba und Lahey /34/ mit eigenen Luft-Wasser-Ergebnissen. Es werden für das waagrecht angeordnete T-Stück zwei Betriebspunkte aus dem Gebiet der Schwallströmung verglichen. Saba und Lahey haben für jeden Betriebspunkt nur drei Splitpunkte bei $G_3/G_1 = 0,3; 0,5; 0,7$ gemessen. Ihre Meßwerte befinden sich sehr dicht an der Kurve der vollständigen Phasenseparation und liegen stets höher als die eigenen Messungen. Für ein fallendes G_3/G_1 zeigen sie einen gleichmäßig ansteigenden Verlauf. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen bereits Honan und Lahey /23, 24/, die im

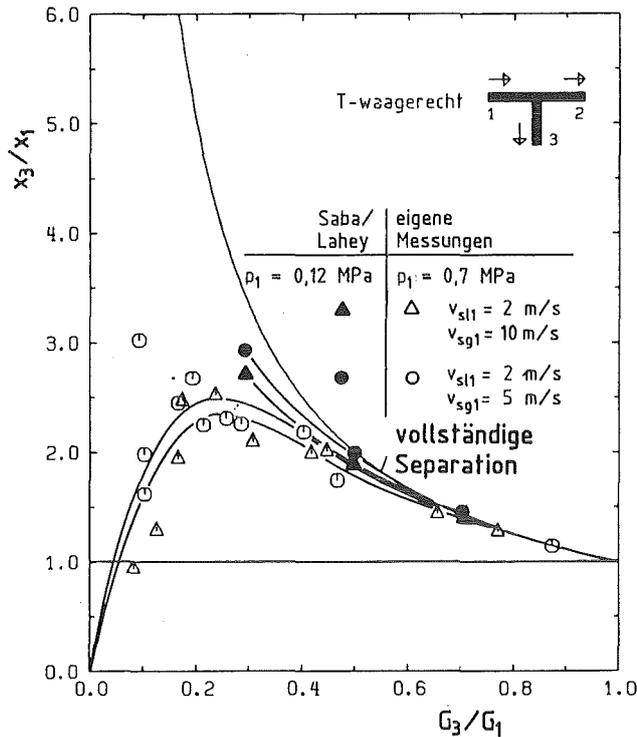


Abb. 34 Vergleich der Phasenseparationsmessungen mit experimentellen Daten nach Saba-Lahey /34/

selben Parameterbereich vertikal durchströmte Abzweigungen untersuchten. Charakteristisch für sämtliche Ergebnisse von Saba und Lahey ebenso wie für Honan und Lahey ist, daß sie im von ihnen untersuchten Bereich kein Maximum der Separationskurven gefunden haben. Dieses Maximum der Separationskurven ist wiederum von Zetzmann /25/ bei seinen Untersuchungen in vertikal aufwärts durchströmten Rohrverzweigungen festgestellt worden (vgl. 2.2.1)

Von McCreery /35/ stammt eine Korrelation zur Beschreibung der Phasenseparation in einem T-Stück. Sie basiert auf der Annahme einer homogenen Strömung im Zustrom. Durch Vereinfachung der Kontinuitäts- und Impulsgleichungen für jede einzelne Phase beschreibt er die Zweiphasenströmung aus einer waagrecht angeordneten Abzweigung. Seine Gleichungen enthalten Ausdrücke für modifizierte Dichten der Gas- und Flüssigkeitsphase, welche experimentell zu bestimmende Exponenten enthalten, die wiederum vom Massenstromverhältnis \dot{m}_2/\dot{m}_3 abhängig sind (s. Anhang). Die Abb. 35-37 zeigen einen Vergleich von Messungen für verschiedene Zustromparameter mit den Resultaten aus dem Rechenmodell von McCreery /35/. Die in dem Modell enthaltenen Koeffizienten wurden von McCreery mit Hilfe der im IRB durchgeführten Vorversuche /50/ angepaßt. In den Abb. 35-37 wurde das Modell mit Ergebnissen der jetzt durchgeführten Untersuchungen verglichen.

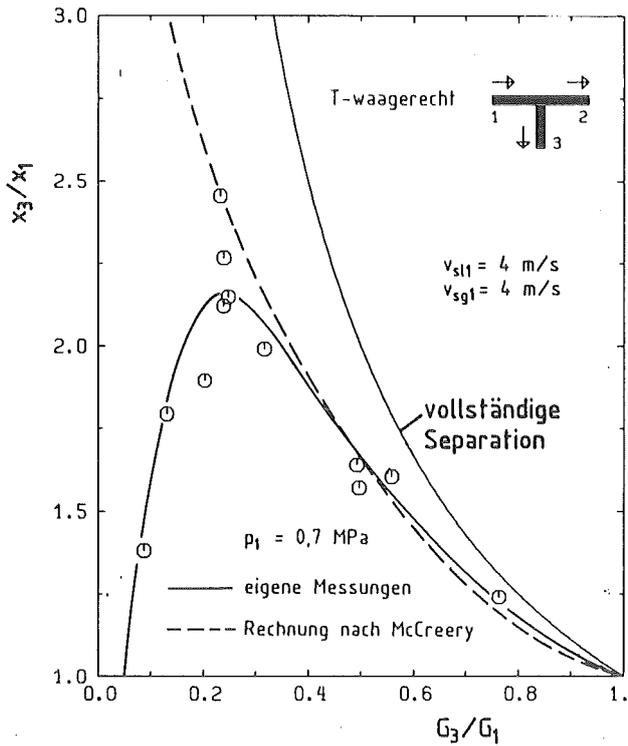


Abb. 35: Vergleich der Phasenseparationsmessung mit dem Modell von McCreery /35/

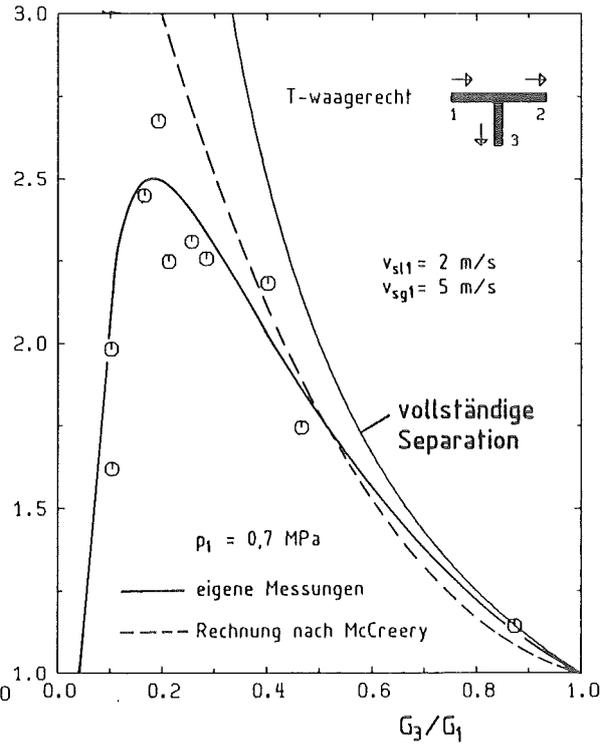


Abb. 36: Vergleich der Phasenseparationsmessung mit dem Modell von McCreery /35/

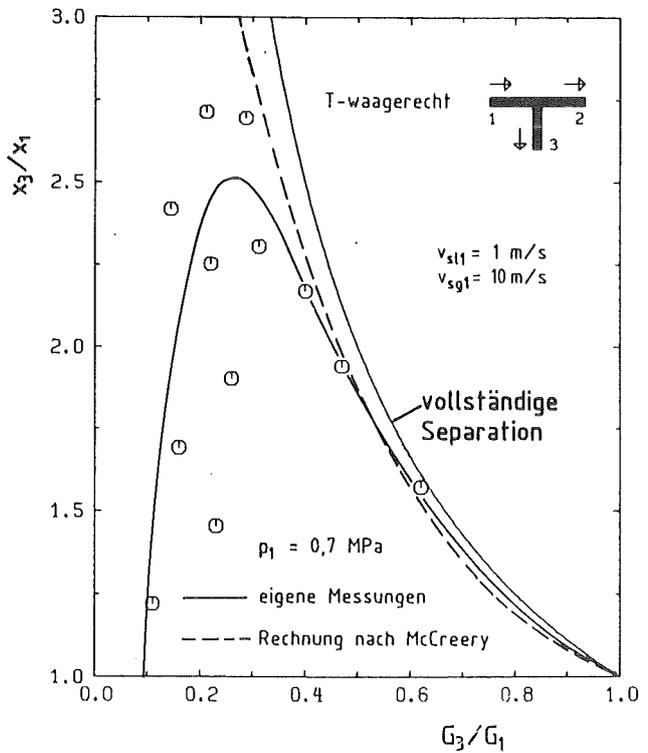


Abb. 37: Vergleich der Phasenseparationsmessung mit dem Modell von McCreery /35/

Dabei zeigt sich, daß das Modell für große Verhältnisse G_3/G_1 befriedigende x_3/x_1 -Werte liefert. Augenfällig ist jedoch, daß es nicht in der Lage ist, das für den horizontalen Abzweig charakteristische Maximum zu beschreiben. Für fallende G_3/G_1 gibt es einen monotonen Anstieg der Separationskurve an.

6.2.4 Abhängigkeit der Maxima der Separationskurven

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, daß die Separationskurven für den waagerechten Abzweig sowohl für Dampf-Wasser- als auch für Luft-Wasser-Strömung ein ausgeprägtes Maximum aufweisen. Die Phasenseparation wurde mit dem lokalen Impulsstromdichteverhältnis $(\rho_g u_g^2)/(\rho_l u_l^2) = \rho_g/\rho_l \cdot S^2$ beschrieben.

Im folgenden wird versucht, mit bekannten Größen, z.B. dem Impulsstromdichteverhältnis gebildet mit querschnittsgemittelten Werten, die Umverteilung zu beschreiben. Das querschnittsgemittelte Impulsstromdichteverhältnis ist:

$$\left(\frac{\rho_g \cdot u_{g1}^2}{\rho_l \cdot u_{l1}^2}\right) = \rho_g/\rho_l \cdot S_1^2 \quad (6.1)$$

Da die einzelnen mittleren Phasengeschwindigkeiten im Zustrom u_{g1} bzw. u_{l1} nicht gemessen werden konnten, wurde das Verhältnis u_{g1}/u_{l1} durch den Schlupf S_1 der beiden Phasen ersetzt. S_1 wurde nach der Beziehung von Rouhani I /5/ bestimmt:

$$S_1 = \rho_l \frac{1}{1-x_1} \left(\frac{C^*}{\rho_{h1}} + \frac{W_{rel}}{G_1} - \frac{x_1}{\rho_g} \right) \quad (6.2)$$

mit C^* nach Gl. (1.22) und W_{rel} nach Gl. (1.21).

Nimmt man als charakteristische Größe für eine Umverteilungskurve den Maximalwert und trägt diesen über dem Impulsflußverhältnis auf (Abb. 38), so liegen die Maxima in einem relativ engen Streubereich auf der Kurve

$$\left(\frac{x_3}{x_1}\right)_{max} = \left[\frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot S_1^2 \right]^{-0,26} \quad (6.3)$$

In Gl. (6.3) steckt dabei die Annahme, daß beide Phasen unabhängig voneinander in den Abzweig strömen können. Diese Annahme gilt jedoch nicht für Punkte aus dem Bereich der dispersen Blasenströmung, welche in Gl. (6.3) ausgenommen sind.

Die Zahlenangaben neben den Symbolen beziehen sich auf das Verhältnis der bezogenen Geschwindigkeiten v_{s11}/v_{sg1} im Zustrom. Am Beispiel einer Schwallströmung im Zustrom ($v_{s11} \approx 2$ m/s; $v_{sg1} \approx 10$ m/s) läßt sich für einen Luft-Wasser Versuchspunkt ($p_1 = 0,7$ MPa) und für Dampf-Wasser Versuchspunkte

(2,5 < p₁ < 7,5 MPa) gut die Abnahme der Maxima der Separationskurven mit steigendem Systemdruck bei konstanten Zustromgeschwindigkeiten entnehmen.

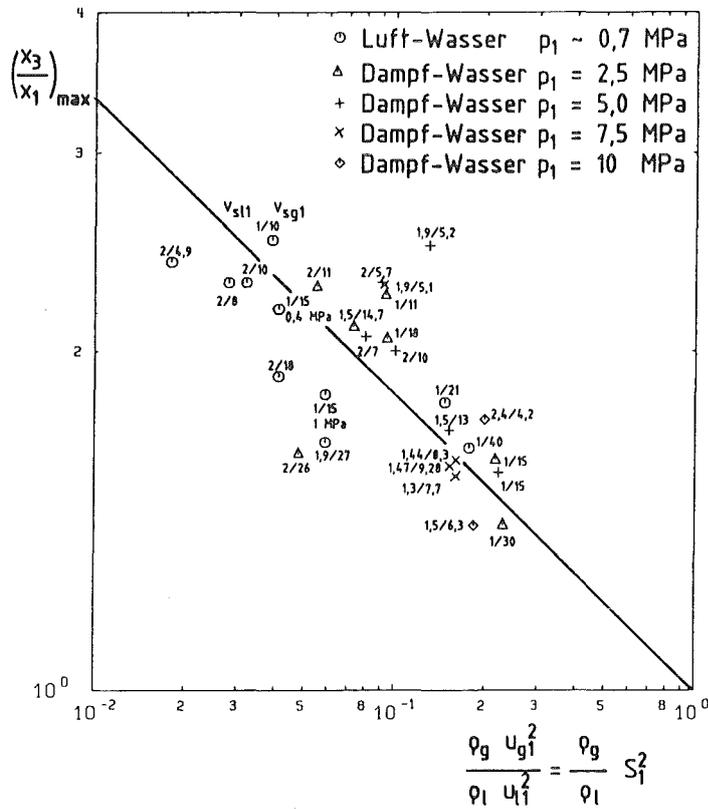


Abb. 38: Abhängigkeit der Maxima der Separationskurven vom Impulsflußverhältnis im Zustrom

6.2.5 Korrelation für die Phasenumverteilung

Die Separationskurven für den waagerechten Abzweig können sowohl für Dampf-Wasser- als auch für Luft-Wasser-Strömung mit der Interpolations-Beziehung

$$\frac{x_3}{x_1} = 5 \eta - 6\eta^2 + 2\eta^3 + a \cdot \eta(1-\eta)^b \quad (6.4)$$

mit

$$\eta = G_3/G_1$$

beschrieben werden, wobei b = 4 und a = 14,6 für Versuchspunkte aus dem Bereich der dispersen Blasenströmung ist.

Der Faktor a in Gl. (6.4) ist für andere Strömungsformen mit den Maxima $(x_3/x_1)_{\max}$ der Separationskurven linear verknüpft:

$$(x_3/x_1)_{\max} = 0,072 \cdot a + 1 \quad (6.5)$$

Aus den Gleichungen (6.3) und (6.5) ergibt sich, daß a nur noch vom querschnittsgemittelten Impulsstromdichteverhältnis $\rho_g/\rho_l \cdot S_1^2$ abhängig ist.

$$a = \frac{\left[\frac{\rho_g}{\rho_l} S_1^2 \right]^{-0,26} - 1}{0,072} \quad (6.6)$$

Trägt man den relativen Fehler zwischen den gemessenen und den berechneten Splitpunkten der Phasenseparationskurven über dem Massenstromdichteverhältnis G_3/G_1 auf, so ergibt sich eine Standardabweichung von $\pm 25\%$ und ein arithmetischer Mittelwert von -3% (Abb. 39).

Durch die empirischen Formeln nach den Gleichungen (6.4) und (6.6) lassen sich somit die Phasenseparationskurven für den waagerechten Abzweig nur anhand der Zustromgrößen ρ_g , ρ_l und S_1 bestimmen.

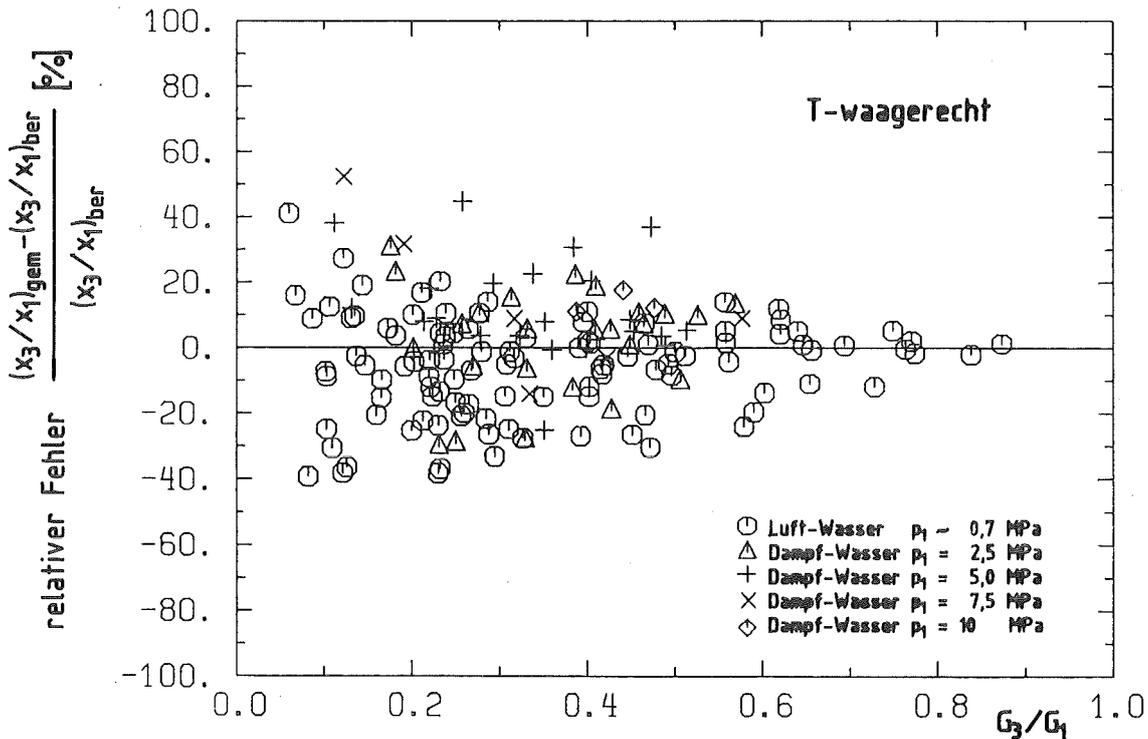


Abb. 39: Relativer Fehler der berechneten einzelnen Umverteilungskurven.

6.3 Abzweig nach unten (Luft-Wasser-Strömung)

In den Abbn. 40 und 41 ist das Separationsverhalten für Versuchspunkte mit $v_{s11} = 1 \text{ m/s}$ bzw. 2 m/s und zunehmender bezogener Gasgeschwindigkeit v_{sg1} dargestellt. Die Separationskurven liegen dicht zusammen und haben nur ein schwach ausgeprägtes Maximum. Ursache hierfür ist die schon separierte Strömung im Zustrom (Schwallströmung) und der Einfluß der Schwerkraft der bewirkt, daß Flüssigkeit bevorzugt in den Abzweig nach unten strömt. Die Separationskurven $v_{s11} = 2 \text{ m/s}$ und $v_{sg1} = 5 \text{ m/s}$ bzw. $2,5 \text{ m/s}$ liegen tiefer als die Kurven für $v_{sg1} = 10 \text{ m/s}$ bzw. $v_{sg1} = 19 \text{ m/s}$ da für diesen Versuchspunkt die Phasen am stärksten separiert sind.

Die deutlichere Abhängigkeit des Separationsverhaltens von der Strömungsform im Zustrom ist in den Abbn. 42 und 43 dargestellt.

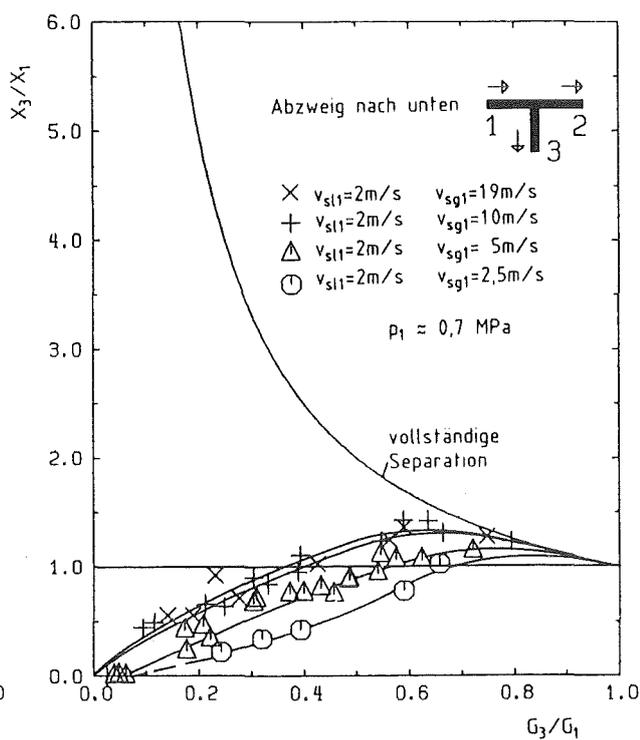
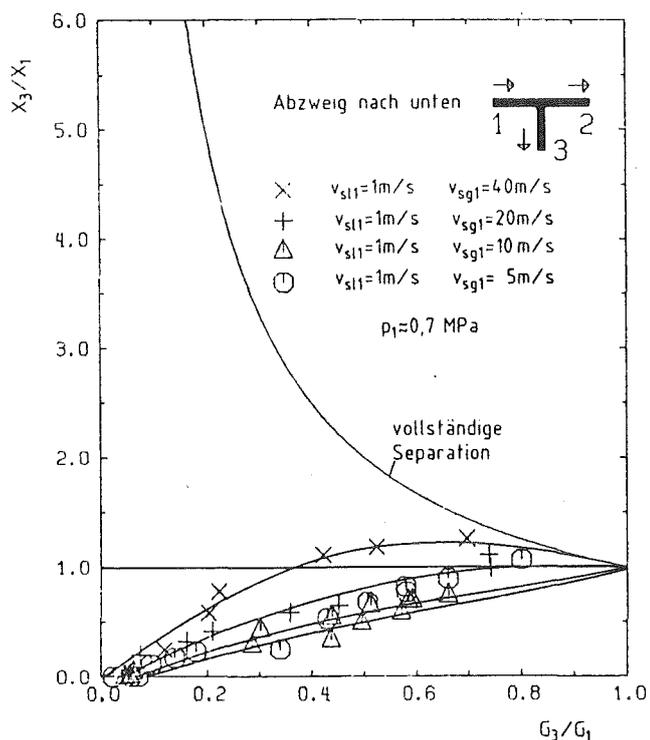


Abb. 40: Phasenseparation im T-Stück:
Luft-Wasser-Strömung;
 $v_{s11} = 1 \text{ m/s} = \text{konst.}$

Abb. 41: Phasenseparation im T-Stück:
Luft-Wasser-Strömung;
 $v_{s11} = 2 \text{ m/s} = \text{konst.}$

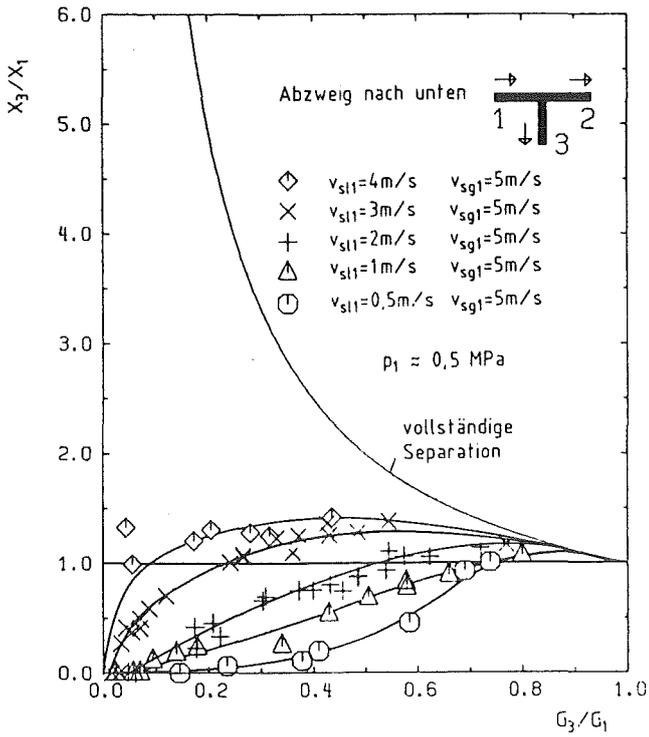


Abb. 42: Phasenseparation im T-Stück:
Luft-Wasser-Strömung;
 $v_{sg1} = 5\text{ m/s} = \text{konst.}$

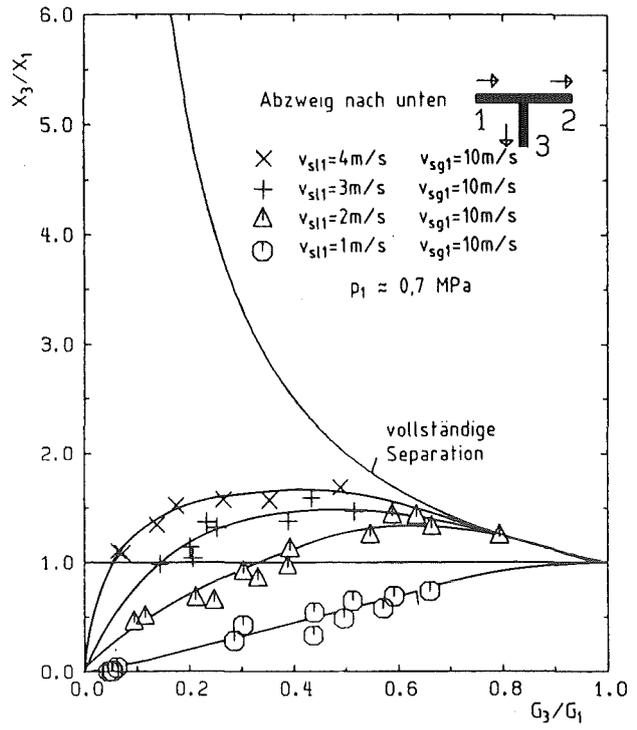


Abb. 43: Phasenseparation im T-Stück
Luft-Wasser-Strömung;
 $v_{sg1} = 10\text{ m/s} = \text{konst.}$

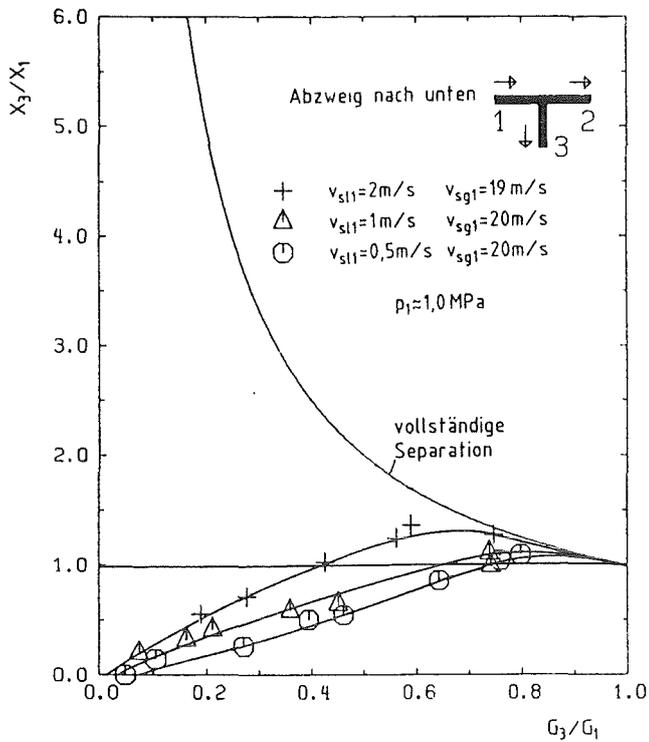


Abb. 44: Phasenseparation im T-Stück
Luft-Wasser-Strömung;
 $v_{sg1} = 20\text{ m/s} = \text{konst.}$

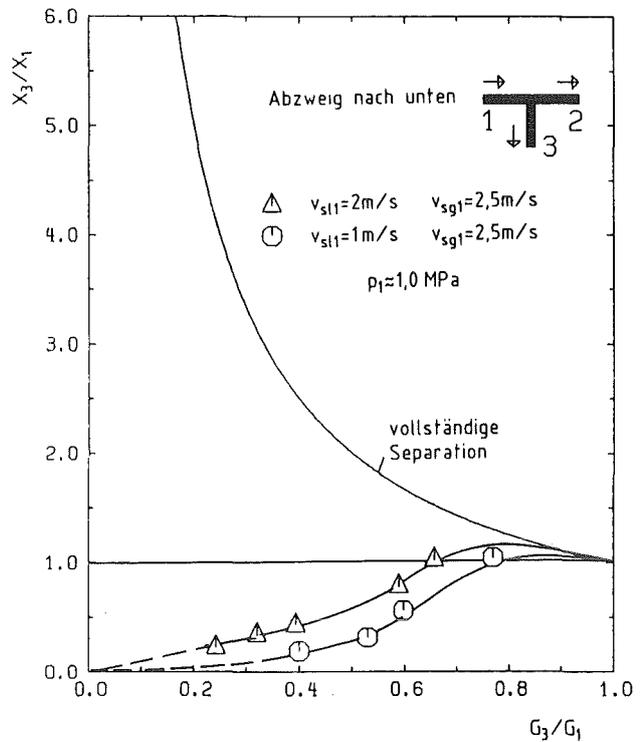


Abb. 45: Phasenseparation im T-Stück
Luft-Wasser-Strömung;
 $v_{sg1} = 2,5\text{ m/s} = \text{konst.}$

Für $v_{sg1} = \text{konst.} = 5 \text{ m/s}$ wird die bezogene Flüssigkeitgeschwindigkeit von $v_{s11} = 0,5 \text{ m/s}$ über $v_{vs11} = 2 \text{ m/s}$ auf $v_{s11} = 4 \text{ m/s}$ erhöht (Abb. 42). Die Maxima der beiden letzten Kurven sind sehr schwach ausgeprägt; die Kurven $v_{s11} = 0,5 \text{ m/s}$ bzw. $v_{s11} = 1 \text{ m/s}$ und $v_{sg1} = 10 \text{ m/s}$ liegen zum größten Teil unterhalb des Wertes $x_3/x_1 = 1$, d.h. im Gegensatz zu allen anderen bisher diskutierten Kurven ist der Dampfgehalt im Abzweig fast immer kleiner als der Eintrittsdampfgehalt x_1 . Ursache hierfür ist die extrem separierte Phasenverteilung im Zustrom. Ein ähnliches Verhalten ist aus Abb. 43 zu ersehen, in der die Phasenseparationskurven für $v_{sg1} = 10 \text{ m/s}$ dargestellt sind.

Die Abbildungen 44 und 45 zeigen das Phasenseparationsverhalten bei Ringströmung (Abb. 44) und Schichtenströmung (Abb. 45). Auch hier ist der Dampfgehalt im Abzweig x_3 aufgrund der separierten Strömungsform im Zustrom fast immer kleiner als der Eintrittsdampfgehalt x_1 .

Für die Abzweiganordnung nach unten ist in stärkerem Maße als für den waagerechten Abzweig eine Abhängigkeit der Phasenseparation von der Strömungsform im Zustrom vorhanden. Als Fit der Phasenseparationskurven wird eine erste empirische Beziehung nach Gl. (6.4) benutzt. Der Exponent b wird als Funktion der Flüssigkeitsmassenstromdichte im Zustrom ausgedrückt:

$$b = 3 + 2,2 \cdot \tanh(0,5(G_1 - 3000)) \quad (6.7)$$

der Faktor a hingegen hängt vom Flüssigkeits- und Gasmassenstrom ab, wie aus Abb. 46 zu ersehen ist.

Zur Bestimmung der maximalen Massenstromdichte G_3 im Abzweig, bei der x_3 gerade noch Null ist, wird folgende Beziehung vorgeschlagen:

$$G_{\max, x=0} = 0,52 \cdot \rho_1^{0,5} (\sigma \cdot g(\rho_1 - \rho_g))^{0,25} \quad (6.8)$$

Diese Beziehung ist ähnlich der von Wallis /64/ für die Aufstiegsgeschwindigkeit von Blasen in einer Flüssigkeit.

Als Korrelation zur Beschreibung der Phasenumverteilung für die Abzweiganordnung nach unten ergibt sich nun folgende Beziehung:

$$x_3/x_1 = 5y - 6y^2 + 2y^3 + ay(1-y)^b \quad (6.9)$$

wobei

$$y = (G_3/G_1 - G_{3\max, x=0}/G_1) / (1 - G_{3\max, x=0}/G_1) \quad (6.10)$$

ist. Der Faktor b wird dabei nach Gl. (6.7) bestimmt und a aus Abb. 46 entnommen.

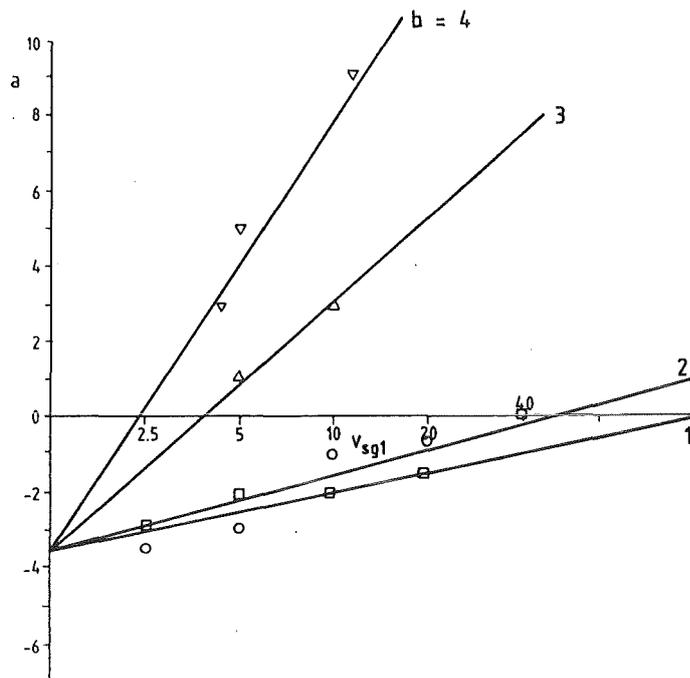


Abb. 46: Abhängigkeit des Faktors a vom Flüssigkeits- und Gasmassenstrom im Zustrom.

6.4 Abzweig nach oben (Luft-Wasser-Strömung)

In Abb. 47 ist für Versuchspunkte mit Schwallströmung im Zustrom ($v_{s11} = 2$ m/s; $v_{sg1} = 5$ m/s bzw. 10 m/s) das Separationsverhalten dargestellt. Im Bereich $0,45 < G_3/G_1 < 1,0$ kann für diese zwei Betriebspunkte das T-Stück mit der Abzweiganordnung nach oben als idealer Separator angesehen werden. Beide Kurven fallen nämlich in diesem Bereich mit der Kurve der vollständigen Phasenseparation zusammen. Für Massenstromdichteverhältnisse $0,05 < G_3/G_1 < 0,45$ ist die Abweichung bei $v_{sg1} = 5$ m/s größer als bei $v_{sg1} = 10$ m/s. Ein

Grund dafür kann sein, daß mit steigendem v_{sg1} die Abstände zwischen zwei Schwällen länger werden und zudem die Schwälle selbst einen hohen Gasanteil besitzen.

Bei den Experimenten mit nach oben orientiertem Abzweig wurde festgestellt, daß der Separationseffekt mit fallendem Massenstromdichteverhältnis G_3/G_1 zunimmt bis nur noch Gas durch den Abzweig strömt ($x_3 = 1$) und daher ein maximaler Wert von x_3/x_1 erreicht wird. Einige typische Werte sind:

$$\begin{aligned} v_{s11} &= 1 \text{ m/s}; v_{sg1} = 5 \text{ m/s}: (x_3/x_1)_{\max} \approx 26, \\ v_{s11} &= 1 \text{ m/s}; v_{sg1} = 10 \text{ m/s}: (x_3/x_1)_{\max} \approx 15, \\ v_{s11} &= 1 \text{ m/s}; v_{sg1} = 20 \text{ m/s}: (x_3/x_1)_{\max} \approx 8. \end{aligned}$$

Berechnet man aus diesen Werten die Gasgeschwindigkeit im Abzweigrohr, so entspricht dies in guter Übereinstimmung der Grenzgeschwindigkeit für Wassermitriß in einem senkrecht nach oben strömenden Gasstrom von $v_{sg} \approx 2 \text{ m/s}$ bei $p = 0,6 \text{ MPa}$ (vgl. z.B. Weber /59/).

Eine Zunahme der Phasenseparation mit fallendem G_3/G_1 ist auch für die untersuchten Versuchspunkte in Abb. 48 zu beobachten. Bei konstanter bezogener Gasgeschwindigkeit $v_{sg1} \approx 4 \text{ m/s}$ wird v_{s11} von 2 m/s auf 6 m/s erhöht, um den Einfluß der Massenstromdichte G_1 auf die Phasenseparation zu untersuchen.

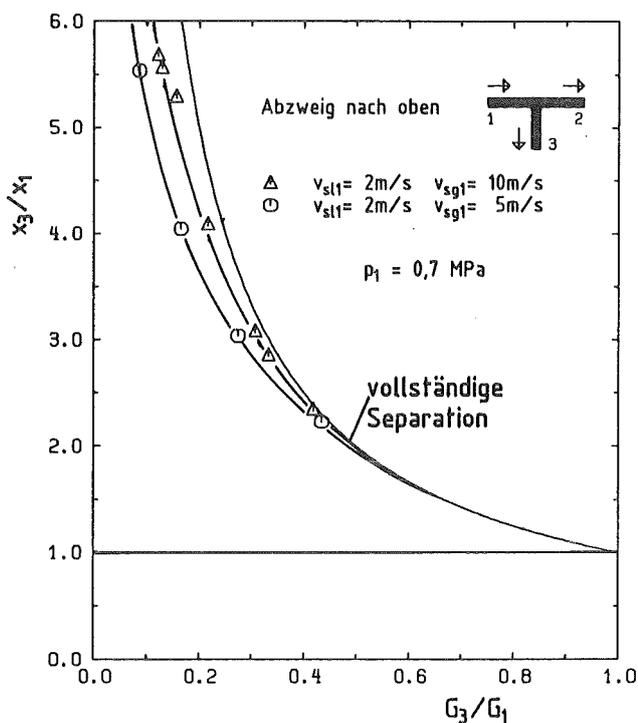


Abb. 47: Phasenseparation im T-Stück:
Luft-Wasser-Strömung
 $v_{s11} = 2 \text{ m/s} = \text{const.}$

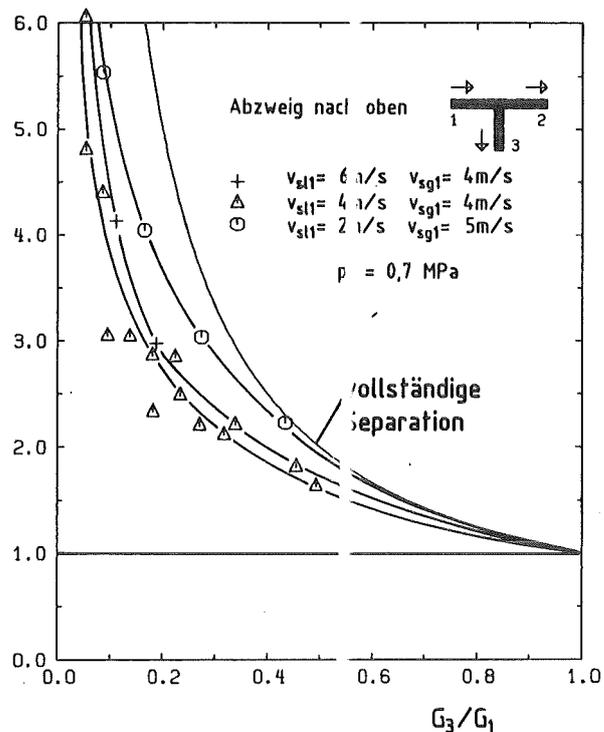


Abb. 48: Phasenseparation im T-Stück:
Luft-Wasser-Strömung
 $v_{sg1} = 4 \text{ m/s} = \text{const.}$

Dabei gelangt man vom Gebiet der Schwallströmung ($v_{s11} = 2 \text{ m/s}$; $v_{sg1} = 5 \text{ m/s}$) in den Bereich der dispersen Blasenströmung ($v_{s11} = 4 \text{ m/s}$; $v_{sg1} = 4 \text{ m/s}$ bzw. $v_{s11} = 6 \text{ m/s}$; $v_{sg1} = 4 \text{ m/s}$). Bei der Schwallströmung kommt zum Einfluß der Massenträgheit noch der Einfluß der geschichteten Strömung im Zustrom hinzu. Deshalb ist die Phasenseparation bei der Schwallströmung stärker ausgeprägt als bei der dispersen Blasenströmung.

Die Kurven der zwei untersuchten Versuchspunkte mit Blasenströmung im Zustrom liegen dicht beieinander. Einer weiteren Erhöhung von v_{s11} war aus versuchs-technischen Gründen Grenzen gesetzt, so daß nicht untersucht werden konnte, ob die weitere Erhöhung der Massenstromdichte im Zustrom eine große Auswirkung auf das Separationsverhalten für Betriebspunkte aus dem Bereich der Blasenströmung hat. Große Einflüsse sind jedoch nicht zu erwarten, da bei $G_3/G_1 \ll 1$ die Effekte im Abzweig dominieren, d.h. x_3 strebt gegen 1.

Die Versuche zeigten, daß im Bereich $0,5 < G_3/G_1 < 1,0$ die Phasenseparationskurven sehr nahe an der Kurve der vollständigen Phasenseparation verlaufen. Für eine ingenieurmäßige Auslegung kann die Phasenseparationskurve beschrieben werden durch die Beziehung:

$$(x_3/x_1) = 1/(G_3/G_1)^{0,8} \quad . \quad (6.11)$$

6.5 Einfluß der Abzweigorientierung auf die Phasenseparation

Für den Fall einer dispersen Blasenströmung im Zustrom wird der Einfluß der Abzweigorientierung in Abb. 49 dargestellt. Wegen der nahezu symmetrischen Geschwindigkeits- und α -Profile, die bei dieser Strömungsform im Zustrom vorliegen /53/, könnte man eine annähernd gleiche Umverteilung unabhängig von der Abzweigorientierung erwarten.

Ausgehend von $G_3/G_1 = 1$ ergibt sich für den nach oben gerichteten Abzweig zunächst die gleiche Phasenseparationsverteilung wie für die waagerechte Anordnung. Mit abnehmendem G_3/G_1 tritt zusätzlich zur Massenträgheit der schwerkraftbedingte Separationsmechanismus in der Abzweigleitung auf, der die Phasenseparation verstärkt (vergl. 6.3).

Bei der waagerechten Abzweiganordnung ist wieder das charakteristische Maximum vorhanden (vgl. Abb. 27). Bei nach unten gerichtetem Abzweig ergibt sich

- wieder ausgehend von $G_3/G_1 = 1$ - eine kleinere Phasenseparation. Die Phasenseparationskurve liegt jedoch bis zu einem Wert von $G_3/G_1 \approx 0,2$ oberhalb $x_3/x_1 = 1$. Für $G_3/G_1 \lesssim 0,2$ liegt die Kurve unterhalb $x_3/x_1 = 1$, d.h. mehr Wasser als Gas gelangt in den Abzweig. Eine Ursache hierfür ist wieder der Schwerkrafteinfluß, durch den die Flüssigkeit in Rohrwandnähe bevorzugt in den Abzweig gelangt.

In den Abb. 50 und 51 ist für zwei Versuchspunkte mit Schwallströmung im Zustrom der Verlauf der Phasenseparationskurven für alle drei untersuchten Abzweiganordnungen dargestellt. Ausgehend von $G_3/G_1 = 1$ liegen auch hier die Kurven für den nach oben und waagrecht orientierten Abzweig nahe zusammen und dicht bei der Kurve der vollständigen Phasenseparation. Bei dem nach unten gerichteten Abzweig fallen die Phasenseparationskurven sehr viel stärker ab (bereits bei höheren Werten G_3/G_1) als bei disperser Blasenströmung. Dies ist auf die stark separierte Phasenverteilung im Zustrom zurückzuführen, d.h. zwischen den Schwallen liegt näherungsweise eine geschichtete Strömung vor.

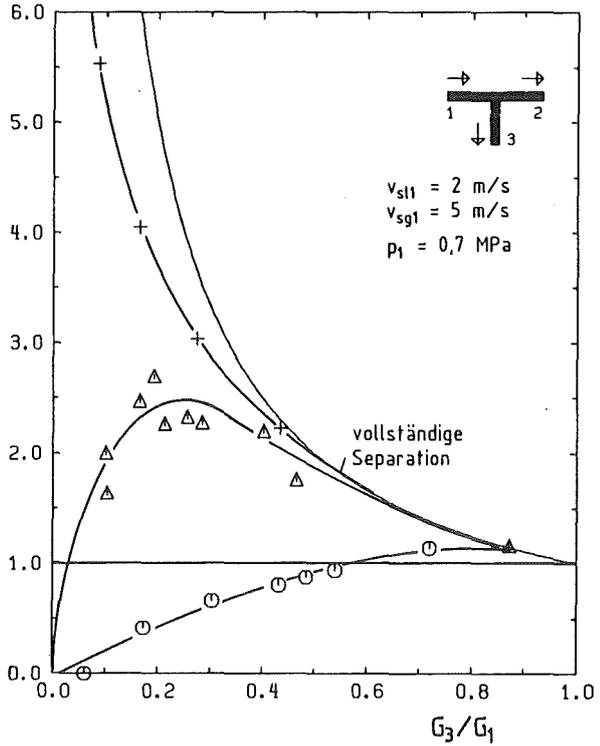
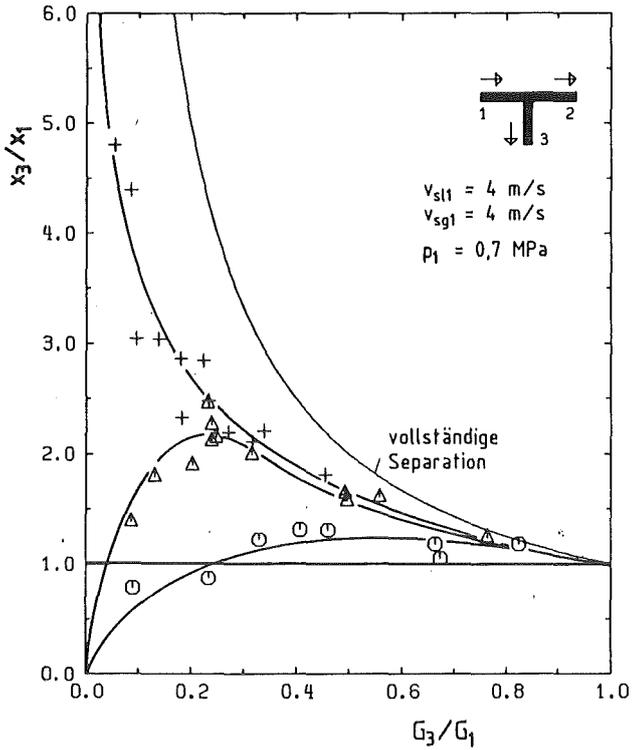


Abb. 49: Phasenseparation im T-Stück:
Variation des Abzweigs bei
Blasenströmung im Zustrom

Abb. 50: Phasenseparation im T-Stück:
Variation des Abzweigs bei
Schwallströmung im Zustrom

+ Abzweig nach oben
 Δ Abzweig waagrecht
 ⊖ Abzweig nach unten
 Luft- Wasser Strömung

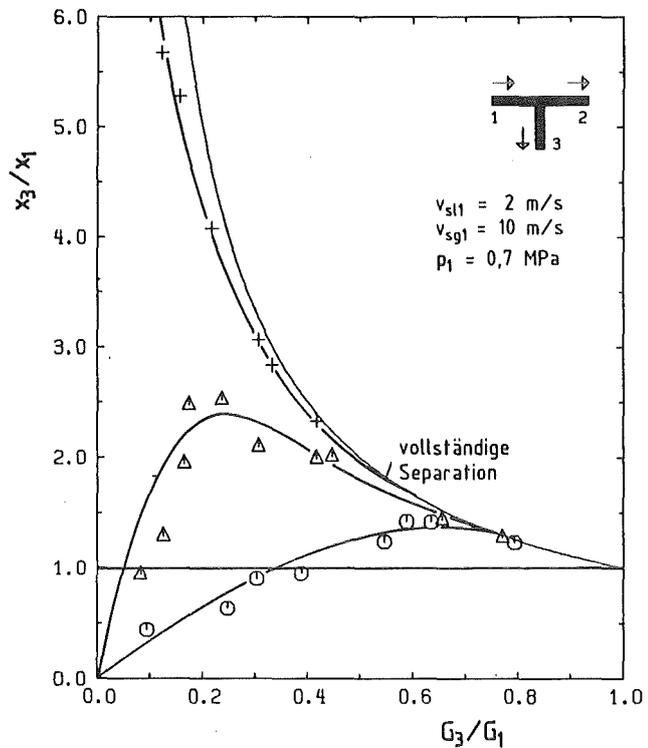


Abb. 51: Phasenseparation im T-Stück:
Variation des Abzweigs bei
Schwallströmung im Zustrom

6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Phasenseparation

Mit den in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen in Luft-Wasser-Strömung wurde erstmals der Einfluß der Abzweigorientierung auf die Massenstromumverteilung in einem T-Stück untersucht. Es wurde dabei ein breites Parameterfeld in Bezug auf Strömungsformen im Zustrom abgedeckt. Ferner wurden erstmalig Experimente zur Strömungsumverteilung in einer Dampf-Wasser-Strömung bei hohen Systemdrücken und waagrecht angeordnetem Abzweig durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei der Orientierung nach oben liegen die Phasenseparationskurven sehr nahe an der Kurve der vollständigen Phasenseparation. Der Grund dafür ist, daß die schon aufgrund der Massenträgheit auftretende Phasenseparation noch wesentlich durch die schwerkraftbedingte Phasenseparation in der Abzweigleitung verstärkt wird. Für eine ingenieurmäßige Auslegung von T-Stücken wird eine empirische Beziehung für die Phasenseparationskurve angegeben.

Bei waagrechtem Abzweig verlaufen die Phasenseparationskurven in einem weiten Bereich ($1 \leq G_3/G_1 < 0,5$) sehr nahe an der Kurve der vollständigen Phasenseparation. Die Kurven weisen sowohl für Luft-Wasser- als auch für Dampf-Wasser-Strömung im Bereich $G_3/G_1 \approx 0,3$ ein typisches Maximum auf, welches eine Funktion des Impulsstromdichteverhältnisses der Zustromgrößen ist und empirisch beschrieben werden kann. Darüberhinaus ist kein signifikanter Einfluß der Strömungsform im Zustrom zu erkennen. Ein Maximum der Phasenseparationskurven wurde bei vergleichbaren Experimenten von Saba und Lahey /34/ nicht beobachtet, ist jedoch von Zetzmann /25/, der vertikal aufwärts durchströmte Verzweigungen untersuchte, gefunden worden.

Aus der Literatur bekannte Modelle zur Beschreibung der Phasenseparation /34, 35/ sind nicht in der Lage, das für den horizontalen Abzweig charakteristische Maximum zu beschreiben.

Für die Abzweiganordnung nach unten ist in stärkerem Maße als für den waagrechteten Abzweig eine Abhängigkeit der Phasenseparation von der Strömungsform im Zustrom vorhanden: Diese Phasenseparation nimmt zu mit fallendem v_{s11} bei $v_{sg1} = \text{konst.}$ bzw. fallendem v_{sg1} bei $v_{s11} = \text{konst.}$ Eine erste empirische Beziehung für die Phasenseparationskurven wird angegeben.

7. Druckverluste im T-Stück

7.1 Modelle für zweiphasige Strömung

7.1.1 Druckdifferenz Δp_{1-3}

Die aus der Literatur bekannten Modelle teilen den Gesamtdruckverlust Δp_{1-3} analog zur Einphasenströmung in einen reversiblen und irreversiblen Term auf (vgl. Saba und Lahey /34/):

$$\Delta p_{1-3} = (\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} + (\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} \quad (7.13)$$

In sämtlichen Modellen wird dabei im reversiblen Term die homogene Dichte ρ_h als zweiphasige Dichte verwendet. Für eine homogene Strömung ist $(\Delta p_{1-3})_{\text{rev}}$ gegeben durch

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} = \frac{\rho_{h3}}{2} \left(\left(\frac{G_3}{\rho_{h3}} \right)^2 - \left(\frac{G_1}{\rho_{h1}} \right)^2 \right) \quad (7.14)$$

Für den irreversiblen Term des Gesamtdruckverlustes Δp_{1-3} werden unterschiedliche Beziehungen verwendet.

Im homogenen Modell (im folgenden HM genannt) wird eine Beziehung analog zur Einphasenströmung jedoch mit der homogenen Dichte verwendet (vgl. z.B. Saba und Lahey /34/)

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} = K_{13} \frac{G_1^2}{2\rho_{h1}} \quad (7.15)$$

Das Modell von Chisholm /55/ (im folgenden CM genannt) ergibt für den irreversiblen Druckverlust:

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} = K_{13} \frac{G_1^2}{2\rho_1} (1-x_1)^2 \cdot \left(1 + \frac{C_{1-3}}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2} \right), \quad (7.16)$$

mit
$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x_1}{1-x_1} \right) \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^{0,5}, \quad (7.17)$$

und
$$C_{1-3} = C_{1-2} \left(\left(\frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^{0,5} + \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} \right)^{0,5} \right) \quad (7.18)$$

$$C_{1-2} = (1 + 0,75 \left(\frac{\rho_1^{-\rho} g}{\rho_1}\right)^{0,5}) \quad (7.19)$$

Für den Fall, daß in Gl. (7.18) $C_{1-2} = 1$ wird, vereinfacht sich das Chisholm-Modell zum homogenen Modell HM. Durch eine Anpassung der Beziehung an die Druckverlustmessungen von Fitzsimmons /56/ entwickelte Chisholm die Beziehung, die durch Gl. (7.19) wiedergegeben ist. In den meisten praktischen Fällen (Luft-Wasser- und Dampf-Wasser-Strömung) nimmt C_{1-2} jedoch den Wert $C_{1-2} = 1,75$ an.

Das in /57/ von Reimann und Seeger vorgeschlagene Modell (RSM) für den Druckverlust in einem zweiphasig durchströmten T-Stück (Abb. 52) geht wie bei der einphasigen Strömung davon aus, daß sich Δp_{1-3} aus einem reversiblen Beschleunigungsdruckverlust Δp_{1-c3} und einem Stoßdiffusordruckverlust Δp_{c3-3} zusammensetzt (s. auch /54/). Das Modell wurde so formuliert, daß der Schlupf an den Stellen 1, c_3 , 3 als Parameter auftritt. Für die Beschreibung des Druckverlustes Δp_{1-3} wurde jedoch die Annahme homogener Strömung gemacht (s. Anhang).

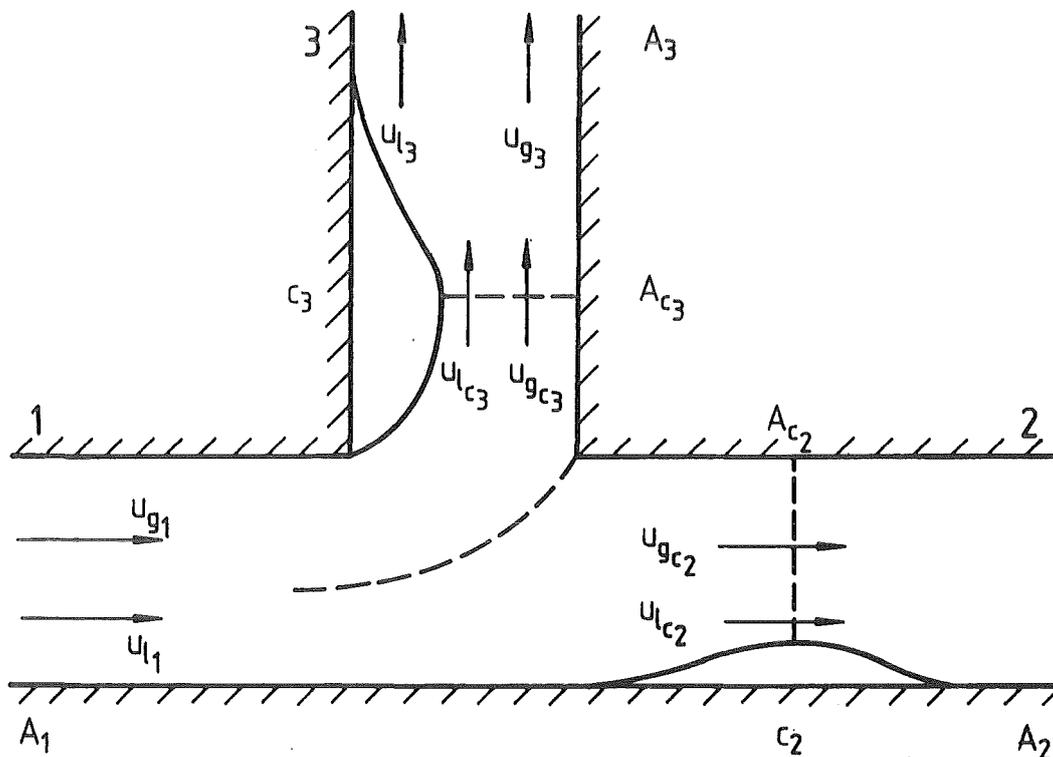


Abb. 52 Zweiphasig durchströmtes T-Stück

Es wird folgende Beziehung für den irreversiblen Druckverlust angegeben:

$$\text{RSM: } (\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} = \frac{\rho_{h_3}}{\rho_{h_1}} K_{13} \frac{G_1^2}{2\rho_{h_1}}, \quad (7.20)$$

mit $K_{13} = f(\dot{V}_3/\dot{V}_1)$ aus einphasigen Messungen (vgl. Gl. (7.30)).

Der Unterschied zum homogenen Modell HM liegt in der Abhängigkeit von K_{13} sowie in dem Faktor ρ_{h_3}/ρ_{h_1} . Für $G_3/G_1 = 1$ stimmen beide Modelle überein.

7.1.2 Druckdifferenz Δp_{1-2}

7.1.2.1 Homogene Modelle ($S = 1$)

Analog zu Kap. 7.1.1 ergibt sich bei homogener Strömung für das homogene Modell der Gesamtdruckverlust zu

$$\Delta p_{1-2} = K_{12} \frac{G_1^2}{\rho_{h_1}} + \frac{\rho_{h_2}}{2} \left[\left(\frac{G_2}{\rho_{h_2}} \right)^2 - \left(\frac{G_1}{\rho_{h_1}} \right)^2 \right]. \quad (7.21)$$

Alle homogenen Modelle auf dieser Basis versagen jedoch i.a., da der reversible Term in Gl. (7.21) dominiert und somit für Δp_{1-2} zu hohe Werte berechnet werden. In der Literatur finden sich daher nur Beziehungen, die den Gesamtdruckverlust Δp_{1-2} durch den reversiblen Anteil in Gl. (7.21), versehen mit einem Vorfaktor < 1 , beschreiben. Ausgehend von der einphasigen Druckverlustbeziehung nach Idel'chik /58/ verwenden Saba-Lahey /34/ erfolgreich folgende Beziehung für den gesamten Druckverlust Δp_{1-2} :

$$\Delta p_{1-2} = K_{12}^+ \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{G_2^2}{\rho_{h_2}} - \frac{G_1^2}{\rho_{h_1}} \right) \quad (7.22)$$

wobei für K_{12}^+ eine Beziehung angegeben wurde, die unabhängig ist vom Massenstromverhältnis, jedoch schwach abhängt von der Re-Zahl im Zustrom.

Für den Vergleich dieses Modells mit den eigenen Messungen wurde der einphasige Druckverlustkoeffizient K_{12}^+ dabei durch Gleichsetzen der einphasigen Gesamtdruckverluste Δp_{1-2} nach Gl. (1.26) und nach Idel'chik /58/ für die eigenen Messungen umgerechnet.

$$\frac{1}{2\rho} (G_2^2 - G_1^2) + K_{12} \frac{G_1^2}{2\rho} = K_{12}^+ \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{G_2^2}{\rho} - \frac{G_1^2}{\rho} \right). \quad (7.23)$$

7.1.2.2 Modelle mit $S > 1$

Werden verschiedene Phasengeschwindigkeiten in Betracht gezogen, d.h. $S > 1$, so tritt in Gl. (7.22) anstelle der homogenen Dichte ρ_h die Impulsdichte ρ_i auf:

$$\Delta p_{1-2} = K_{12}^+ \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{G_2^2}{\rho_{i_2}} \right) - \left(\frac{G_1^2}{\rho_{i_1}} \right) \quad (7.24)$$

Diese Beziehung wurde formal von Saba-Lahey angegeben, jedoch nicht für die Beschreibung der eigenen Versuche verwendet.

Das Modell von Reimann-Seeger (RSM) ergibt für den Gesamtdruckverlust Δp_{1-2} (s. Anhang):

$$\Delta p_{1-2} = \frac{\rho_{h_2}}{2\rho_1} \left\{ \frac{G_2^2}{C_2^2} [x_2 \cdot R + (1-x_2)]^2 - G_1^2 [x_1 \cdot R + S_1(1-x_1)]^2 \cdot \left(x_2 + \frac{1-x_2}{S_1} \right) \right\} +$$

$$\frac{G_2^2}{\rho_1} \left\{ [x_2 \cdot R + S_2(1-x_2)] \cdot \left(x_2 + \frac{1-x_2}{S_2} \right) - \frac{1}{C_2} (x_2 \cdot R + (1-x_2)) \right\} \quad (7.25)$$

$$C_2 = \left(1 + \left(\frac{\rho_h}{\rho_{h_2}} \right)^{0,5} \cdot \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \sqrt{K_{12}} \right)^{-1} \quad (7.26)$$

$R = \rho_1/\rho_g$ und S_1 bzw. S_2 nach Gl. (6.2).

Der Druckverlustkoeffizient $K_{12} = f(\dot{V}_3/\dot{V}_1)$ wurde dabei aus einphasigen Messungen experimentell bestimmt (s. Gl. (7.28)).

7.1.3 Meßergebnisse

Die Druckverlustkoeffizienten K_{12} und K_{13} des T-Stücks wurden für Wasserströmung bestimmt. In Abb. 3 ist der Verlauf von K_{12} und K_{13} über dem Massenstromdichteverhältnis aufgetragen. Der funktionale Zusammenhang zwischen den Druckverlustkoeffizienten und dem Massenstromdichte- bzw. dem Volumenstromverhältnis läßt sich nach der Methode der kleinsten Quadrate in Form eines Polynoms ausdrücken:

$$K_{12} = 0,1571 - 0,9197 \cdot \left(\frac{G_3}{G_1} \right) + 1,0901 \left(\frac{G_3}{G_1} \right)^2 \quad (7.27)$$

$$K_{12} = 0,1571 - 0,9197 \cdot \left(\frac{v_3}{v_1}\right) + 1,0901 \cdot \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 \quad (7.28)$$

$$K_{13} = 1,0369 - 0,9546 \cdot \left(\frac{G_3}{G_1}\right) + 1,2123 \cdot \left(\frac{G_3}{G_1}\right)^2 \quad (7.29)$$

$$K_{13} = 1,0369 - 0,9546 \cdot \left(\frac{v_3}{v_1}\right) + 1,2123 \cdot \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 \quad (7.30)$$

Die Koeffizienten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Korrelationen anderer Autoren /11, 12, 34/. In den Gleichungen (7.28) und (7.30) sind die Druckverlustkoeffizienten in Abhängigkeit vom Volumenstromverhältnis angegeben, wie sie im Modell von Reimann und Seeger zur Beschreibung der zweiphasigen Druckdifferenzen benötigt werden.

Aus den Differenzdruckmessungen, die für jeden Splitpunkt durchgeführt wurden, sind, wie schon in Kapitel 3.4.2 erwähnt, die Druckdifferenz Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom und der Druckverlust Δp_{1-3} zwischen Zustrom und Abzweig bestimmt worden. Hierbei ist zu beachten, daß i.a. Δp_{1-2} positiv ist, da aufgrund der Verzögerung der Strömung durch die Querschnittserweiterung der reversible Druckrückgewinn $(\Delta p_{1-2})_{rev}$ den irreversiblen Druckverlust $(\Delta p_{1-2})_{irr}$ überwiegt und somit insgesamt ein Druckanstieg Δp_{1-2} vorliegt.

In den Abbildungen 53 bis 58 sind die gemessenen Druckdifferenzen $\Delta p_{1-2,gem}$ und $\Delta p_{1-3,gem}$ für alle drei Abzweigorientierungen für Luft-Wasser Strömung über dem Massenstromdichteverhältnis G_3/G_1 aufgetragen und im Anhang nochmals tabellarisch aufgeführt. Die gemessenen Druckdifferenzen in Dampf-Wasser Strömung für das waagerechte T-Stück sind ebenfalls im Anhang in Tabellenform wiedergegeben. Auf eine Darstellung in Diagrammform wird verzichtet, da sie aufgrund der vielen variierten Zustromgrößen (p_1, v_{s11}, v_{sg1}) und der Anzahl der Meßpunkte zu unübersichtlich wäre.

Aus den o.g. Abbildungen ist zu ersehen, daß bei Erhöhung der bezogenen Gas- bzw. Flüssigkeitgeschwindigkeit im Zustrom und somit auch mit einer Erhöhung der Impulsstromdichte ρu^2 der beiden Phasen, die Druckdifferenz $\Delta p_{1-2,gem}$ zwischen Zustrom und Abstrom zunimmt (vgl. Abb. 53, 55, 57). Die gleiche Abhängigkeit gilt auch für den Druckverlust $\Delta p_{1-3,gem}$ zwischen Zustrom und Abzweig (vgl. Abb. 54, 56, 58) sowie für die Dampf-Wasser Versuche.

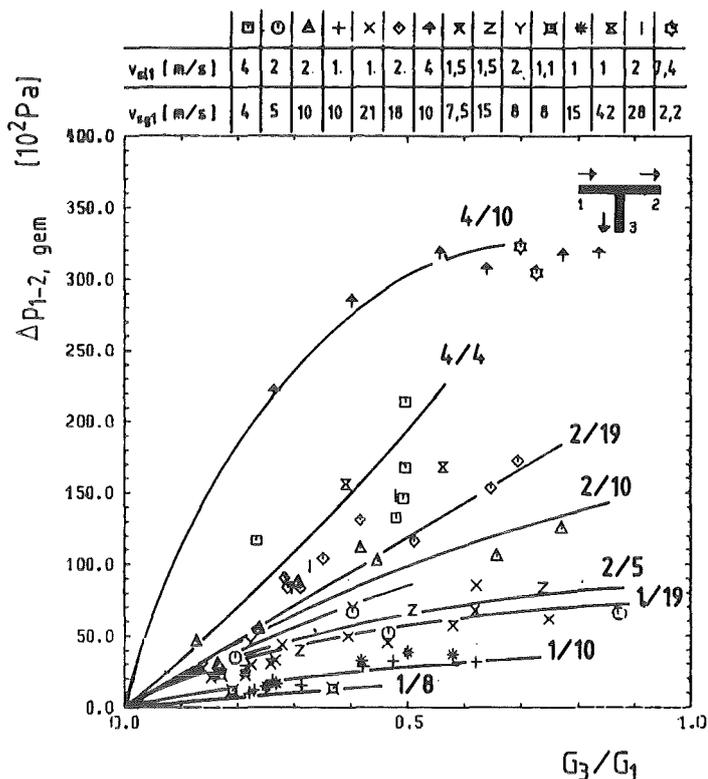


Abb. 53 Gemessene Druckdifferenz Δp_{1-2} in Luft-Wasser-Strömung; Abzweig waagrecht

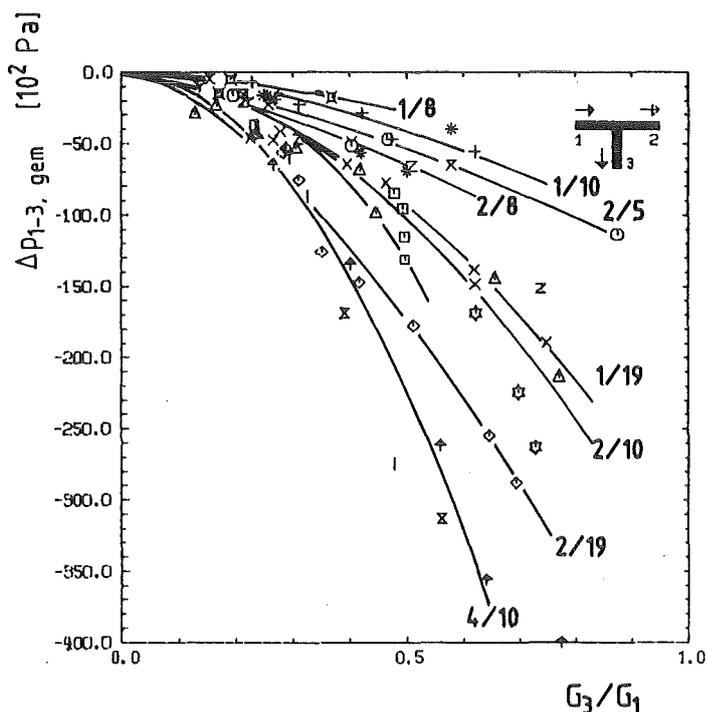


Abb. 54 Gemessene Druckdifferenz Δp_{1-3} in Luft-Wasser-Strömung; Abzweig waagrecht

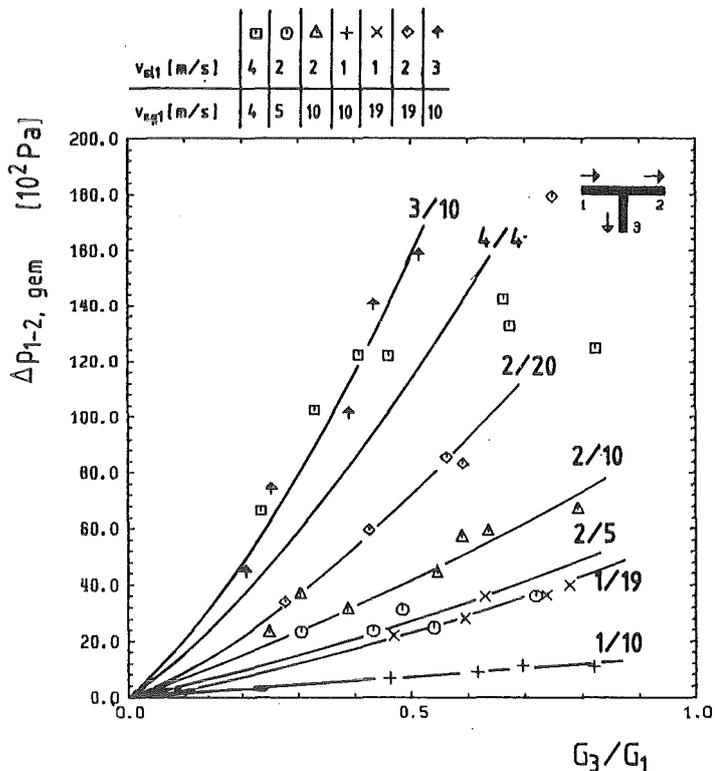


Abb. 55 Gemessene Druckdifferenz Δp_{1-2} in Luft-Wasser-Strömung; Abzweig nach unten

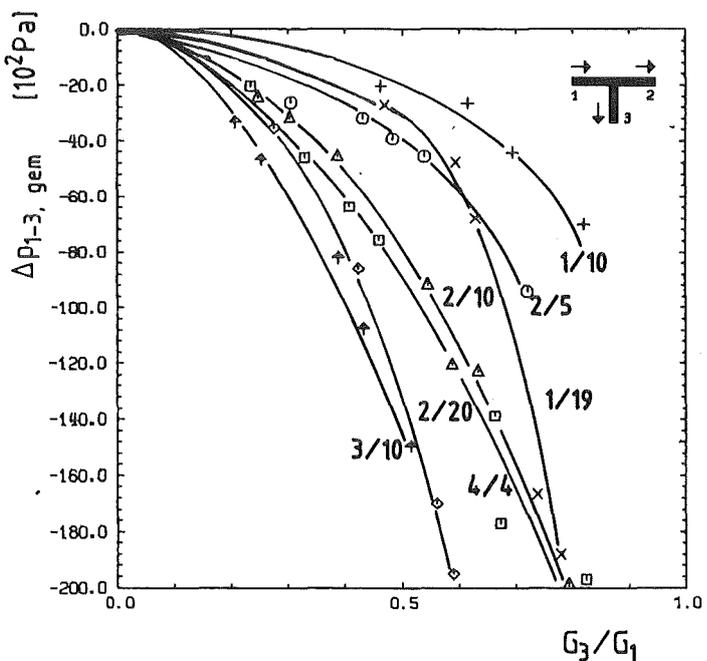


Abb. 56 Gemessene Druckdifferenz Δp_{1-3} in Luft-Wasser-Strömung; Abzweig nach unten

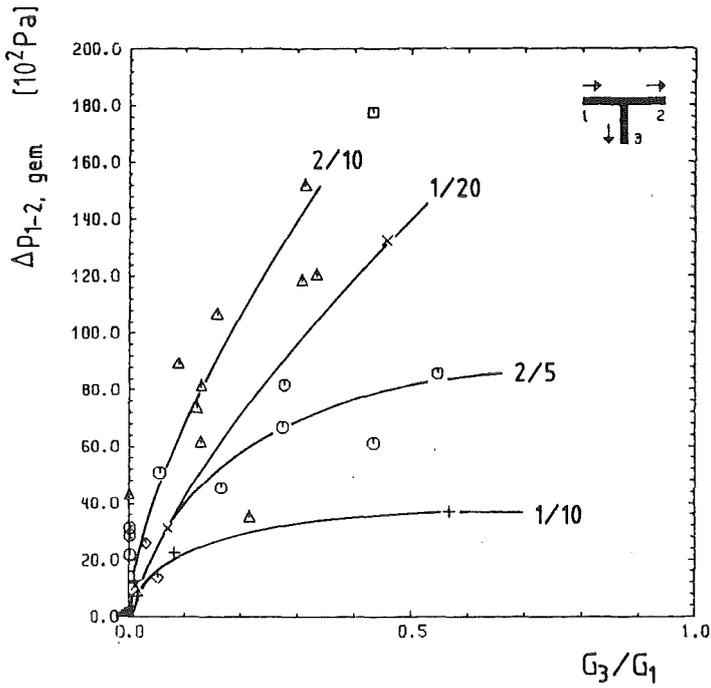


Abb. 57 Gemessene Druckdifferenz Δp_{1-2} in Luft-Wasser-Strömung; Abzweig nach oben

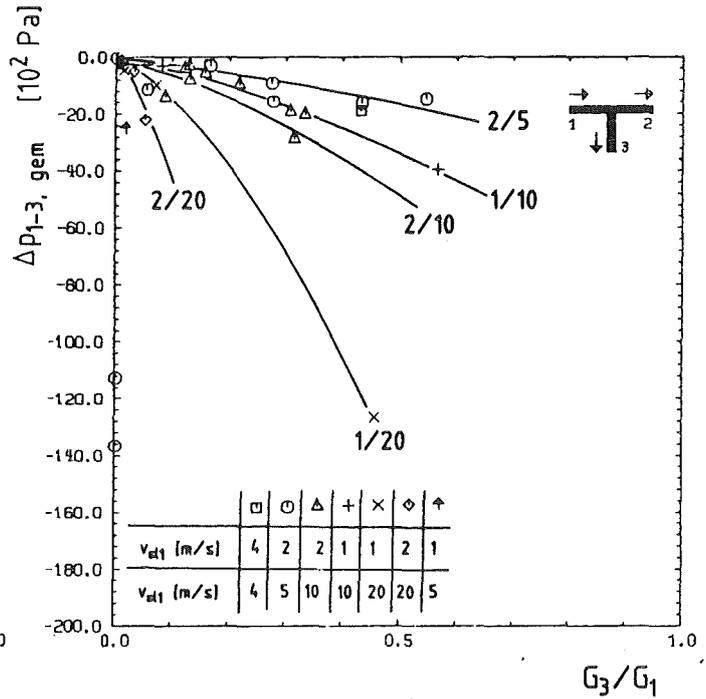


Abb. 58 Gemessene Druckdifferenz Δp_{1-3} in Luft-Wasser-Strömung; Abzweig nach oben

Im folgenden Kapitel werden die gemessenen Druckdifferenzen Δp_{1-2} und Δp_{1-3} für sämtliche in Luft-Wasser-Strömung untersuchten Abzweigorientierungen sowie für die Dampf-Wasser-Messungen mit den in Kapitel 7.1 vorgestellten Modellen verglichen.

7.1.4 Vergleich mit bekannten Modellen

7.1.4.1 Messungen bei vollem Durchsatz

Zum Vergleich der Rechenmodelle mit den gemessenen Druckdifferenzen Δp_{1-2} und Δp_{1-3} wird das Verhältnis der gerechneten zur gemessenen Druckdifferenz, d.h. $\Delta p_{\text{Modell}}/\Delta p_{\text{gemessen}}$ gebildet. Bei Full-Flow-Punkten, d.h. Massenstromdichteverhältnissen $G_3/G_1 = 1$ wird $\Delta p_{\text{Mod}}/\Delta p_{\text{gem}}$ über der Massenstromdichte bzw. dem Dampfgehalt im Zustrom, G_1 bzw. x_1 , bei Split-Punkten, d. h. Massenstromdichteverhältnissen $0 < G_3/G_1 < 1$ über G_3/G_1 aufgetragen.

Für Massenstromdichteverhältnisse $G_3/G_1 = 1$ entspricht der gesamte Druckabfall Δp_{1-3} dem irreversiblen Druckabfall $(\Delta p_{1-3})_{\text{irr}}$. Das Modell nach Gl.(7.16) entspricht dann dem homogenen Modell. Abb. 59 zeigt für diesen Fall und Luft-Wasser-Strömung das Verhältnis $\Delta p_{\text{Mod}}/\Delta p_{\text{gem}}$ als Funktion der Zustrommassenstromdichte G_1 und Dampfgehalt x_1 . Aufgetragen ist das Homogene und das Modell von Chisholm. Es zeigt sich, daß keines der Modelle die Meßergebnisse

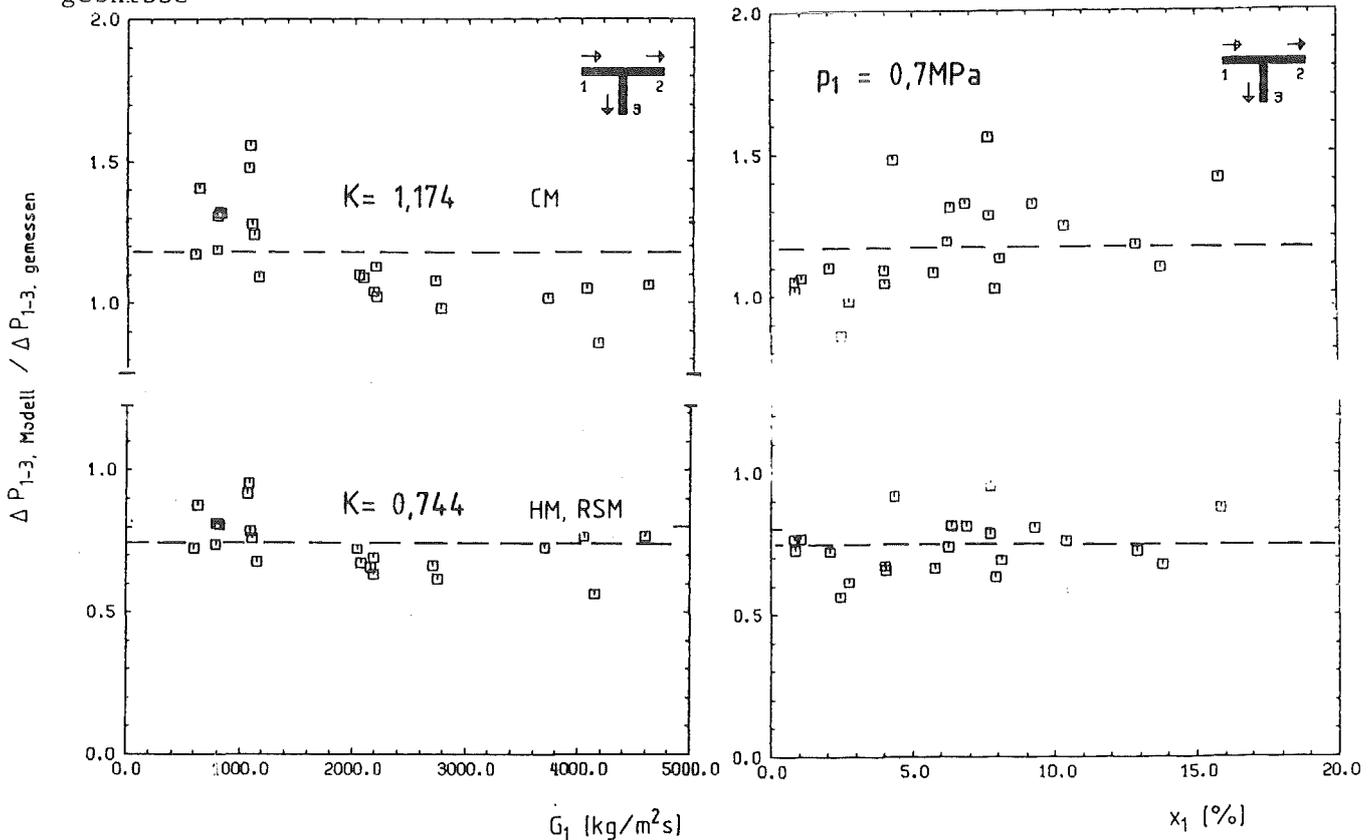


Abb. 59: Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust für $G_3/G_1 = 1$, Abzweig waagrecht, Luft-Wasser-Strömung

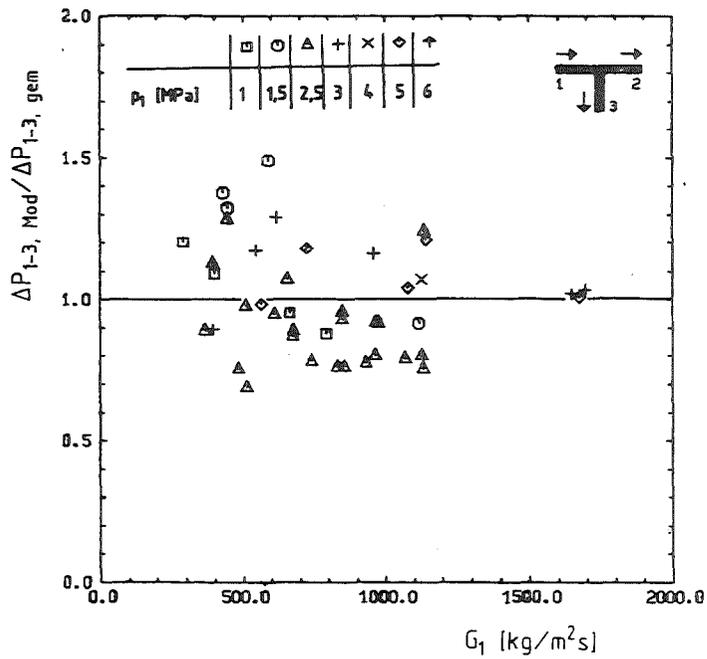
befriedigend wiedergibt. Die Streuung um den arithmetischen Mittelwert K ist jedoch in erster Näherung unabhängig von G_1 und x_1 .

Um das Verhältnis auf den Wert 1 anzuheben, wird der irreversible Druckanteil $(\Delta p_{1-3})_{irr}$ um den Faktor K^{-1} korrigiert. Diese Korrektur wurde durchgeführt, da die Modelle durch die Annahme einer homogenen Strömung die Druckdifferenz Δp_{1-3} i.a. zu nieder berechnen.

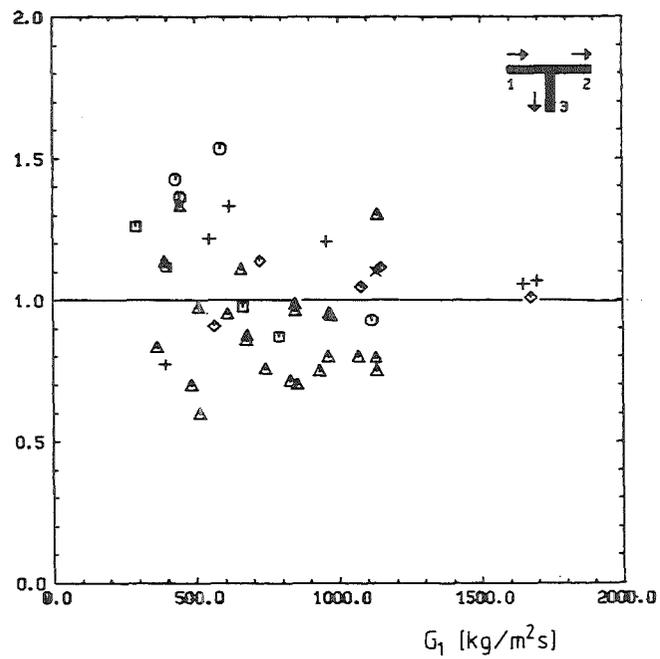
Für die Dampf-Wasser-Versuche, die bei kleineren Massenstromdichten durchgeführt wurden, ist das mit dem Faktor K^{-1} (aus den Luft-Wasser Messungen) korrigierte Verhältnis $\Delta p_{Modell} / \Delta p_{gemessen}$ in Abb. 60 für die drei Modelle über der Massenstromdichte G_1 aufgetragen. Die Streuung um den Mittelwert K bei kleinen Massenstromdichten G_1 ist etwas größer als bei den Luft-Wasser-Versuchen. Sie ist jedoch unabhängig von G_1 und der Strömungsform. Eine systematische Druckabhängigkeit ist aufgrund der zu geringen Anzahl von Versuchspunkten nicht zu erkennen.

Für den nach unten gerichteten Abzweig wurden nur vier Full-Flow-Messungen durchgeführt. Sie sind in Abb. 61 dargestellt und mit den Luft-Wasser-Korrekturfaktoren für den waagerechten Abzweig versehen. Bei allen drei Modellen liegt eine gute Übereinstimmung vor.

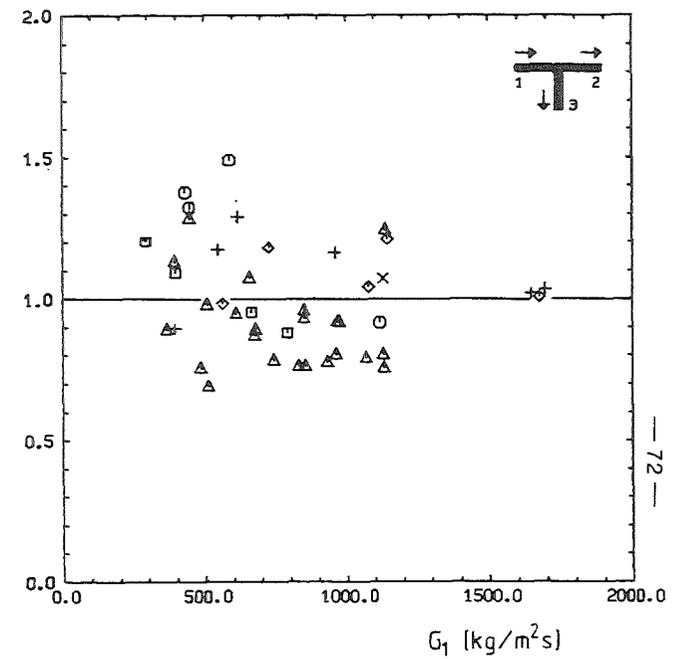
Die entsprechenden Ergebnisse für den nach oben gerichteten Abzweig sind in Abb. 62 dargestellt. Es zeigt sich, daß bei allen Modellen die errechneten Druckdifferenzen, besonders bei kleinen Massenstromdichten G_1 , nicht mit den gemessenen Druckdifferenzen $(\Delta p_{1-3})_{gemessen}$ übereinstimmen. Dies ist damit zu erklären, daß für die Strömung im nach oben orientierten Abzweig für kleine G_1 die Annahme einer homogenen Strömung, wie sie in den verwendeten Modellen getroffen wird, nicht mehr gerechtfertigt ist. Es treten stark unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten auf, die Strömungsvorgänge sind jedoch sehr schwer zu modellieren. Ab $G_1 > 2500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ werden von allen Modellen die Druckdifferenzen Δp_{1-3} besser berechnet.



RSM (S = 1)



Chisholm Modell



Homogenes Modell

Abb. 60 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust Δp_{1-3} für $G_3/G_1 = 1$, Abzweig waagrecht, Dampf-Wasser-Strömung, $1,0 < P_1 < 7,5$ MPa

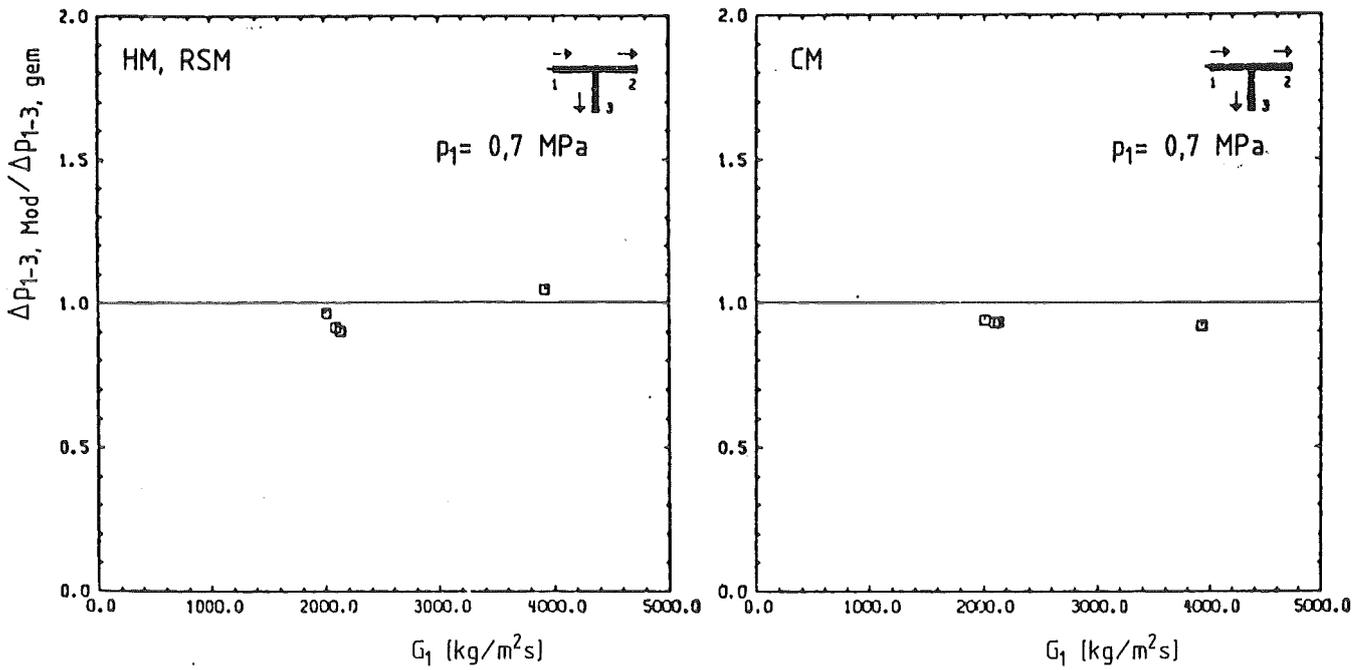


Abb. 61: Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust für $G_3/G_1 = 1$, Abzweig nach unten, Luft-Wasser-Strömung

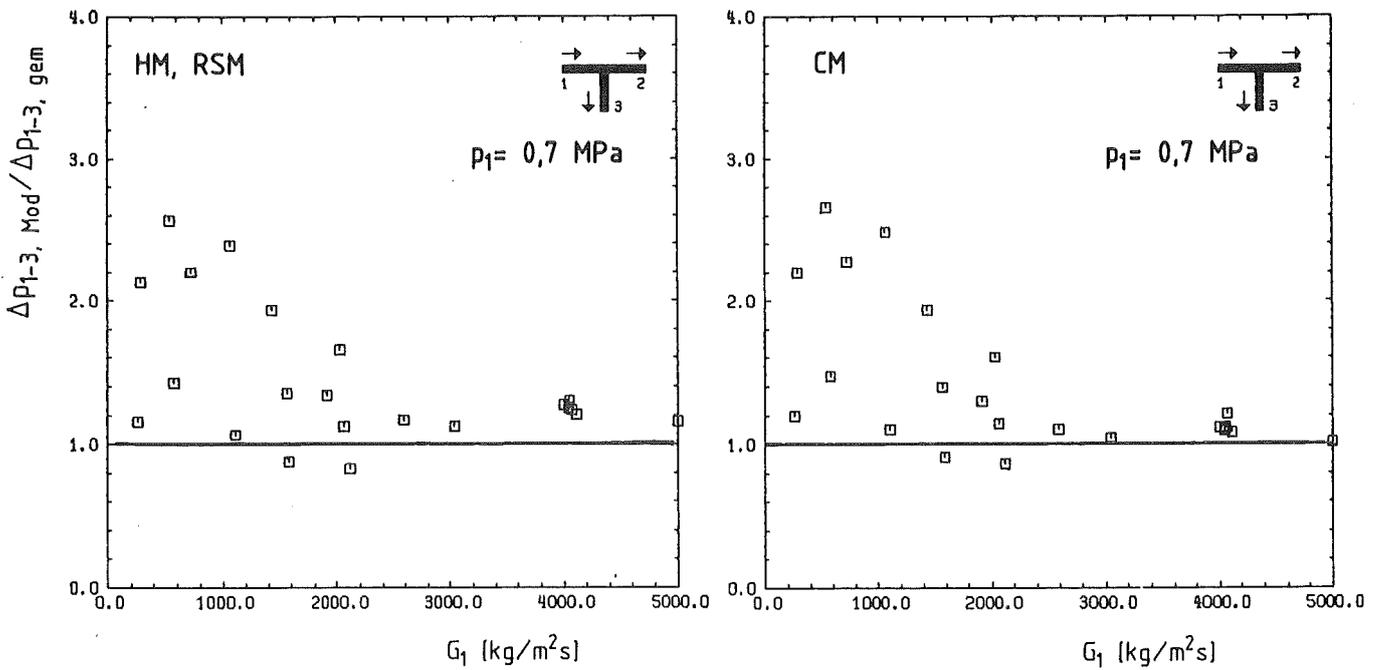


Abb. 62: Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust für $G_3/G_1 = 1$, Abzweig nach oben, Luft-Wasser-Strömung

7.1.4.2 Splitpunkte

Für Splitpunkte $0 < G_3/G_1 < 1$ wird der Gesamtdruckverlust Δp_{1-3} auf folgende Weise berechnet:

$$\Delta p_{1-3} = K^{-1} (\Delta p_{1-3})_{irr} + (\Delta p_{1-3})_{rev} \quad (7.38)$$

mit $(\Delta p_{1-3})_{rev}$ nach Gl. (7.9) und $(\Delta p_{1-3})_{irr}$ nach dem jeweiligen Modell. K ist der Korrekturfaktor, der aus den Luft-Wasser-Messungen mit vollem Durchsatz und waagerechtem Abzweig bestimmt wurde.

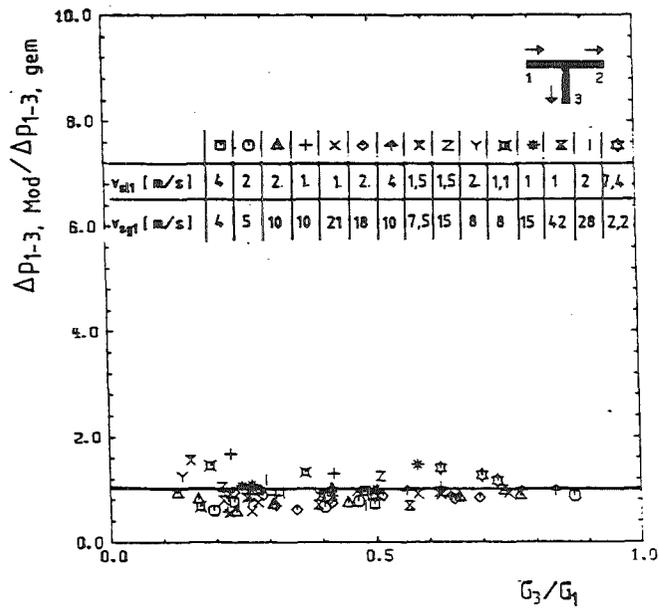
In den Abbn. 63 bis 66 ist das korrigierte Verhältnis $\Delta p_{1-3,Mod}/\Delta p_{1-3,gem}$ über G_3/G_1 aufgetragen.

Es werden das Homogene-, das Chisholm- sowie das Modell von Reimann-Seeger (RSM) miteinander verglichen. Eine Variation des Schlupfes S in letzterem Modell zeigte, daß die Annahme $S = 1$ die besten Ergebnisse für das RSM lieferte. Sie wurde für alle hier vorgestellten Rechnungen beibehalten.

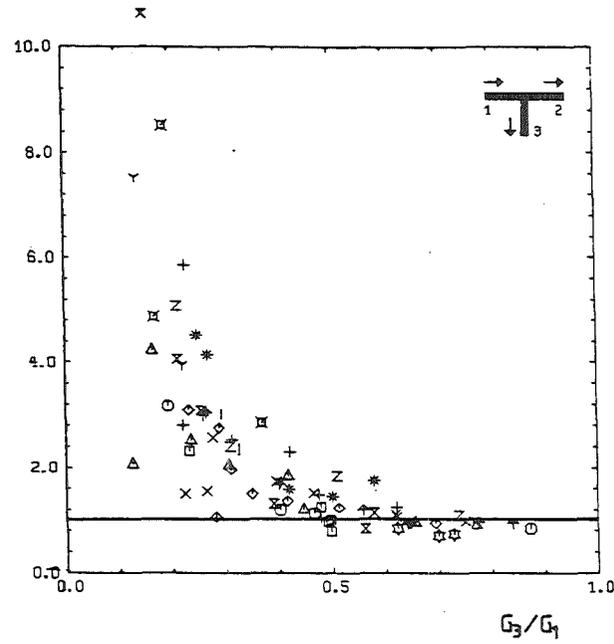
Die Ergebnisse für den waagerechten Abzweig und Luft-Wasser-Strömung sind in Abb. 63 dargestellt. Das Homogene- und das Chisholm-Modell zeigen im Bereich $0,6 < G_3/G_1 < 1$ eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Im Bereich $G_3/G_1 < 0,6$ ergeben sie jedoch zu hohe Werte. Das RSM liefert im ganzen Bereich $0 < G_3/G_1 < 1$ gute Ergebnisse.

Bei Dampf-Wasser-Strömung (Abb. 64) ist die gleiche Tendenz zu beobachten. Das Homogene- und das Chisholm-Modell liefern wieder für $G_3/G_1 < 0,6$ zu hohe Werte. Das Modell von Reimann und Seeger errechnet erst für $G_3/G_1 < 0,3$ zu hohe Werte, die nicht so stark nach oben abweichen wie beim HM und CM. Eine systematische Abhängigkeit vom Systemdruck ist nicht erkennbar.

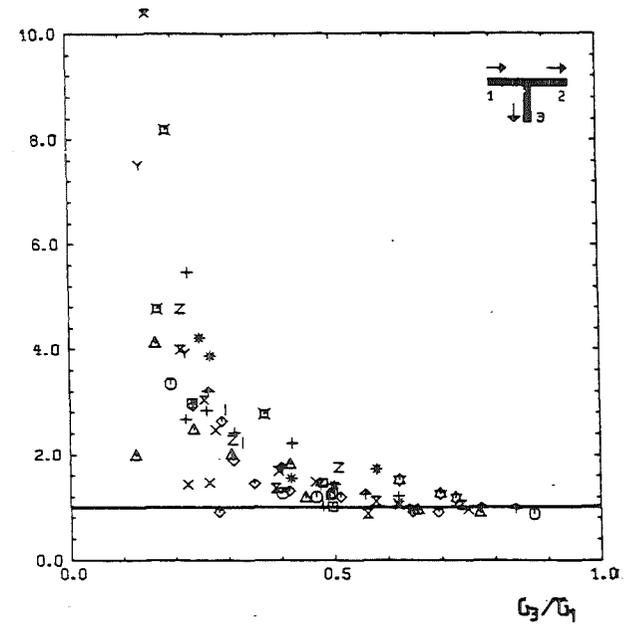
Vergleicht man das Druckdifferenzverhältnis $\Delta p_{1-3, Mod}/\Delta p_{1-3, gem}$ für den Abzweig nach unten und nach oben (Abbn. 65 und 66), so erkennt man, daß das RSM im gesamten Bereich $0 < G_3/G_1 < 1$ für beide Abzweigorientierungen bessere Ergebnisse liefert als das HM und CM, die teilweise negative Druckverluste Δp_{1-3} errechnen.



RSM (S = 1)

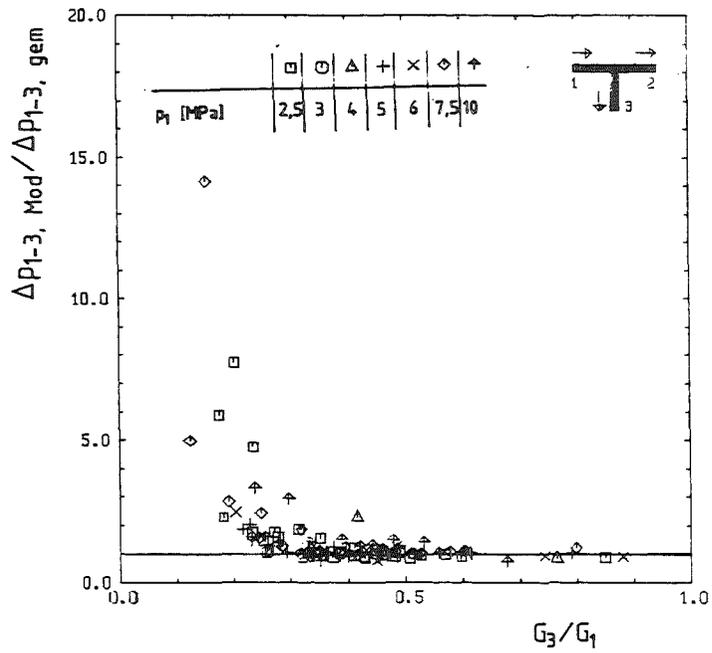


Chisholm Modell

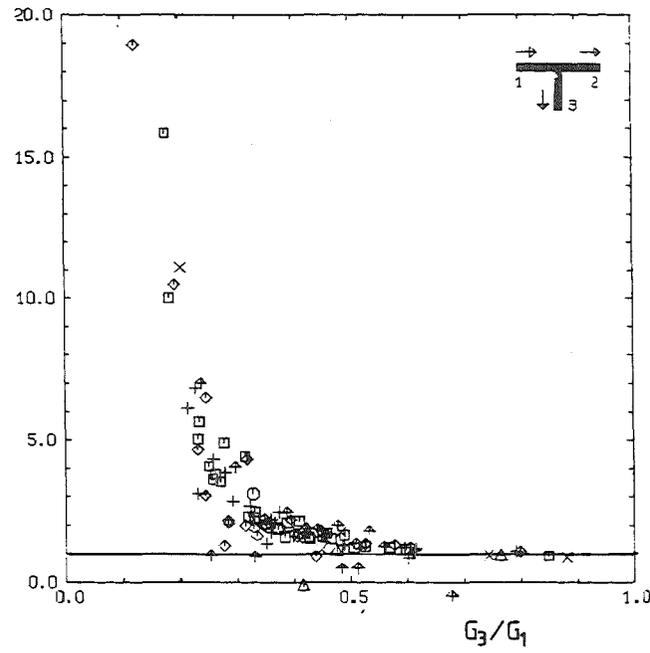


Homogenes Modell

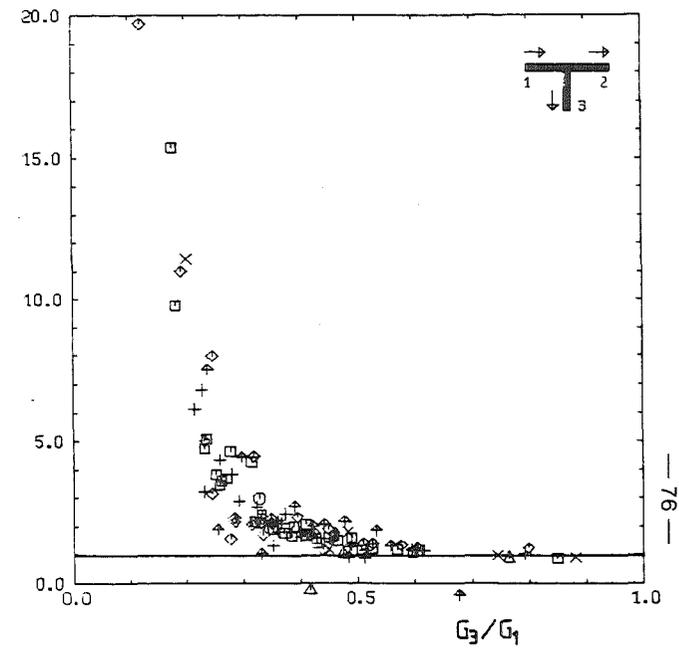
Abb. 63 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust Δp_{1-3} für $0 < G_3/G_1 < 1$,
Abzweig waagrecht, Luft-Wasser-Strömung



RSM (S = 1)

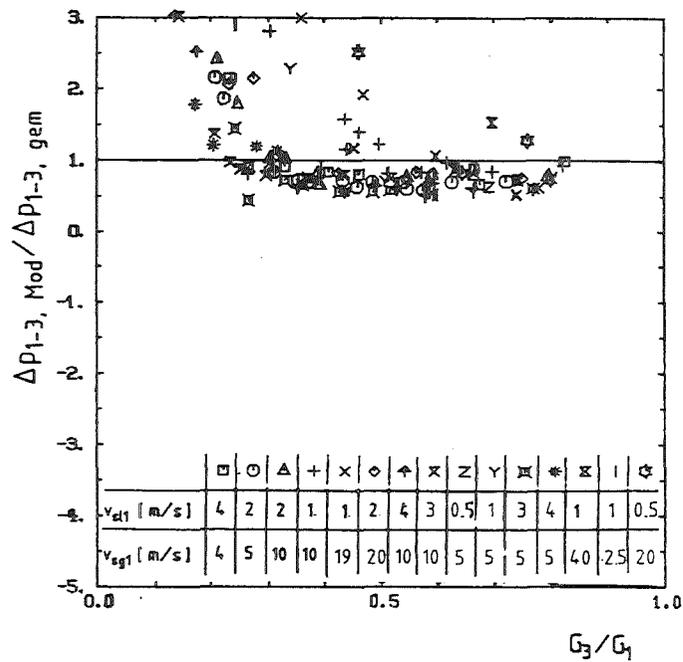


Chisholm Modell

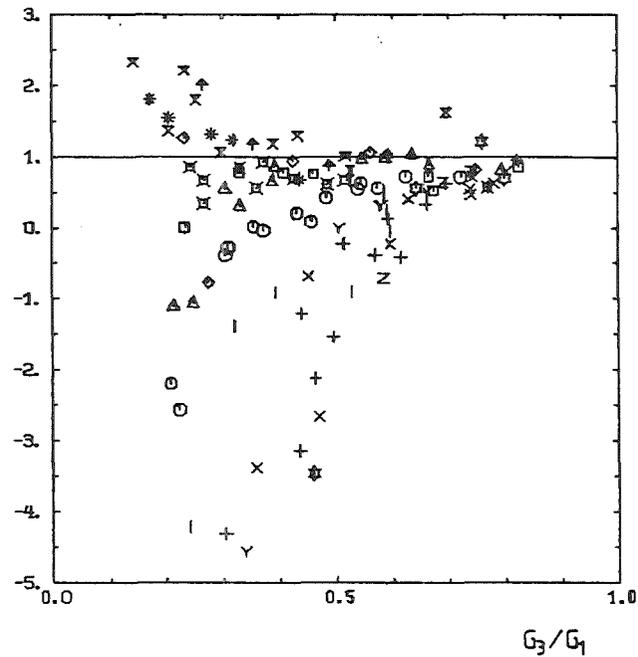


Homogenes Modell

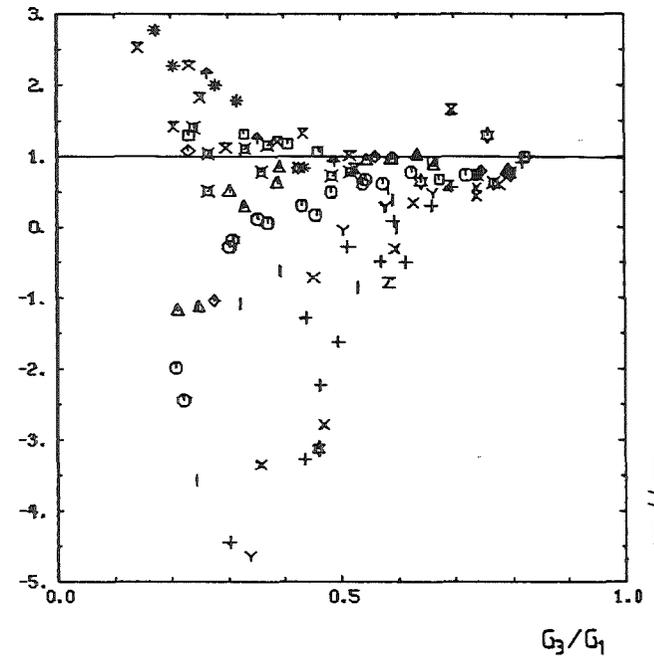
Abb. 64 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckabfall Δp_{1-3} für $0 < G_3/G_1 < 1$,
Abzweig waagrecht, Dampf-Wasser-Strömung, $2,5 < P_1 < 10$ MPa



RSM (S = 1)

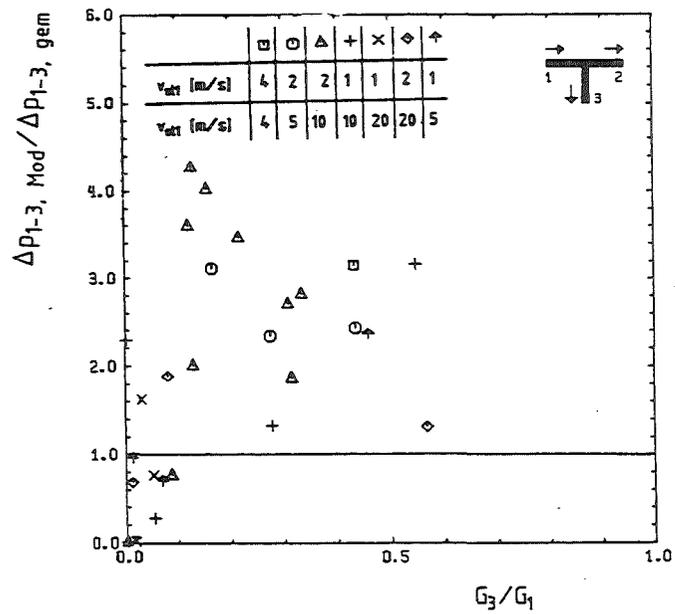


Chisholm Modell

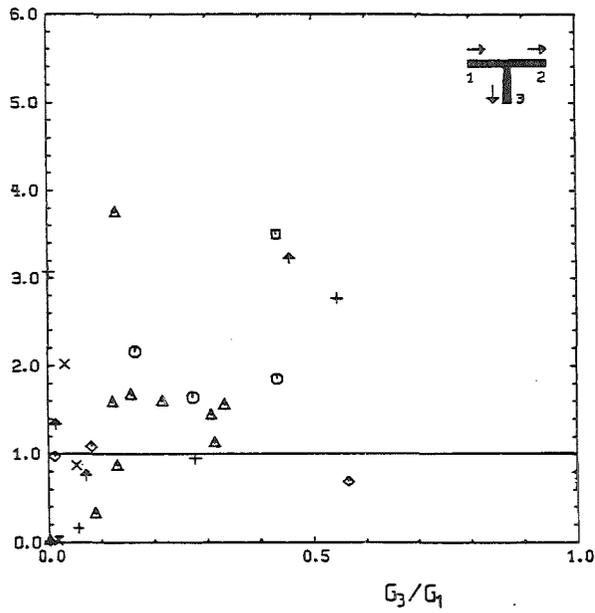


Homogenes Modell

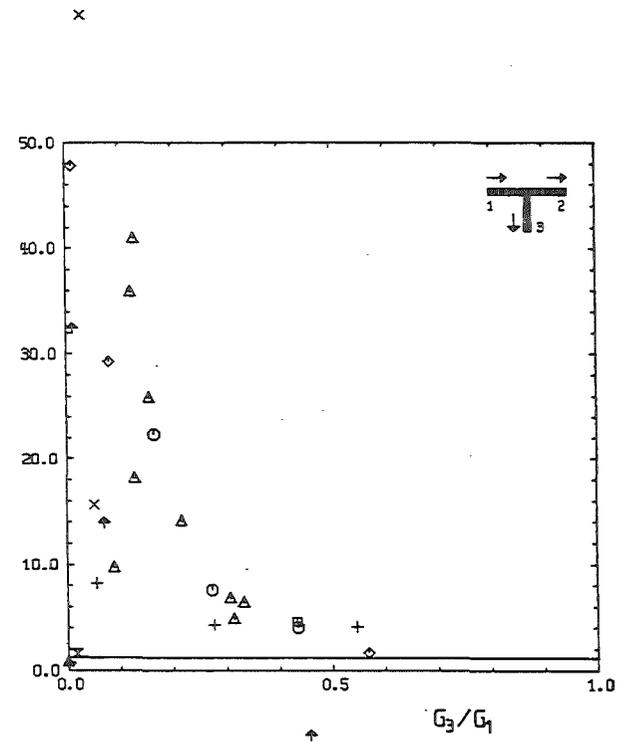
Abb. 65 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust Δp_{1-3} für $0 < G_3/G_1 < 1$,
Abzweig nach unten, Luft-Wasser-Strömung



RSM $S_1 = S_3 = 1$



RSM $S_1 = 1, S_3 > 1$



Homogenes Modell

Abb. 66 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust Δp_{1-3} für $0 < G_3/G_1 < 1$,
Abzweig nach oben, Luft-Wasser-Strömung

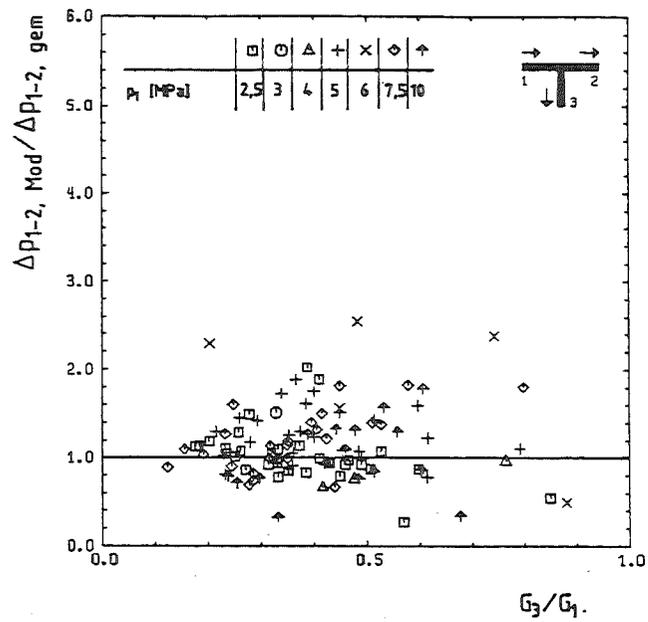
Für den Abzweig nach oben zeigen alle drei Modelle eine große Abweichung (Abb. 66, man beachte die verschiedenen Skalen der Ordinate). Das HM und CM errechnen über den gesamten Bereich $0 < G_3/G_1 < 1$ fast identische Werte, die vor allem im Bereich $G_3/G_1 < 0,2$ um bis zu 700 % höher liegen als die RSM-Werte. Die großen Abweichungen im Vergleich zu den anderen Abzweigorientierungen werden, wie schon erwähnt, durch die starke Phasenseparation ($S_3 > 1$) in der Abzweigleitung für den nach oben gerichteten Abzweig verursacht.

Die Annahme einer homogenen Strömung, wie sie die drei Modelle zur Berechnung von Δp_{1-3} voraussetzen, ist für die Abzweigorientierung nach oben deshalb nicht zutreffend. Da das RSM die Möglichkeit bietet, den Schlupf zu variieren, wurde dies für den Schlupf S_3 im Abzweig durchgeführt. Er wurde nach Rouhani I (Gl. 6.2) berechnet. Das Ergebnis der Rechnung zeigt Abb. 66b. Durch die Einführung des Schlupfes $S_3 > 1$ streuen die Werte nicht mehr so stark wie bei der Annahme einer homogenen Strömung im Abzweig, jedoch ist die Genauigkeit immer noch unbefriedigend.

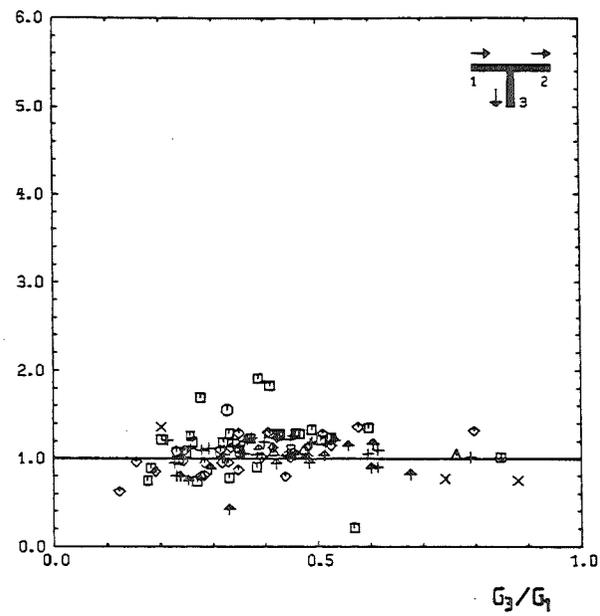
Im folgenden werden die Ergebnisse für die berechnete Druckdifferenz Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom vorgestellt. Die Abbn. 67-70 zeigen die analoge Auftragung für das Verhältnis $\Delta p_{1-2, \text{Mod}} / \Delta p_{1-2, \text{gem}}$ über G_3/G_1 . Die besten Ergebnisse ergaben die folgenden Modelle: das RSM nach Gl. (7.25), das Modell von Saba-Lahey nach Gl. (7.22) mit $S = 1$ sowie das Modell von Saba und Lahey nach Gl. (7.24) mit $S > 1$. Das RSM und das Modell von Saba-Lahey lieferten mit der Annahme $S > 1$ bessere Werte als mit $S = 1$. Der Schlupf im Zustrom und Abstrom wurde somit nach Rouhani I /5/ nach Gl. (6.2) berechnet.

Abb. 67 zeigt für den waagerechten Abzweig und für Luft-Wasser Strömung einen Vergleich der drei Modelle. Das RSM und das Modell von Saba-Lahey ($S > 1$) berechnen die gemessene Druckdifferenz Δp_{1-2} im gesamten untersuchten Bereich $0,1 < G_3/G_1 < 1$ gut, während das Modell von Saba-Lahey ($S = 1$) im Vergleich zu den beiden anderen Modellen zu hohe Werte liefert.

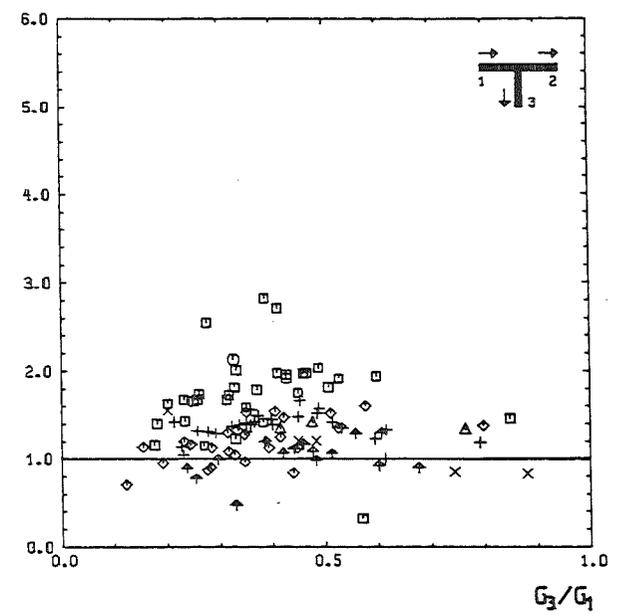
Für den Fall der Dampf-Wasser-Strömung und waagerechtem Abzweig, liefert das Modell von Saba-Lahey ($S > 1$) im untersuchten Bereich die besten Ergebnisse (Abb. 68b) Das RSM- und das Saba-Lahey-Modell ($S = 1$) ergeben eine größere Streuung.



RSM ($S > 1$)

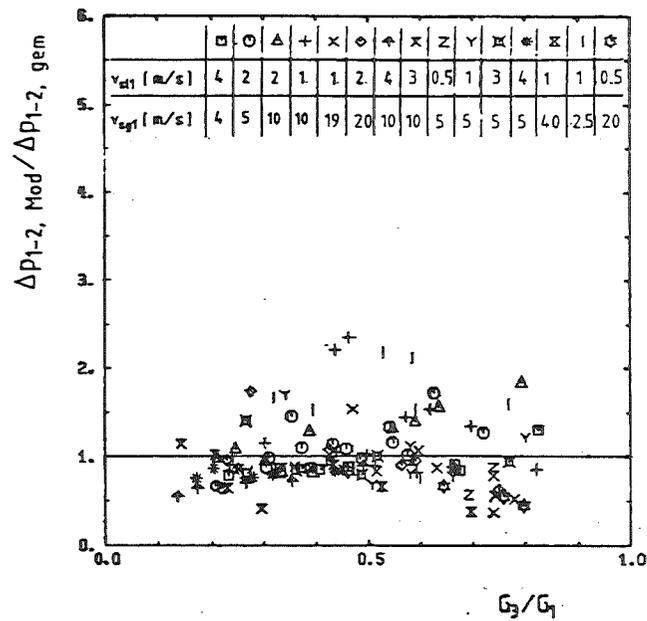


Saba-Lahey Modell ($S > 1$)

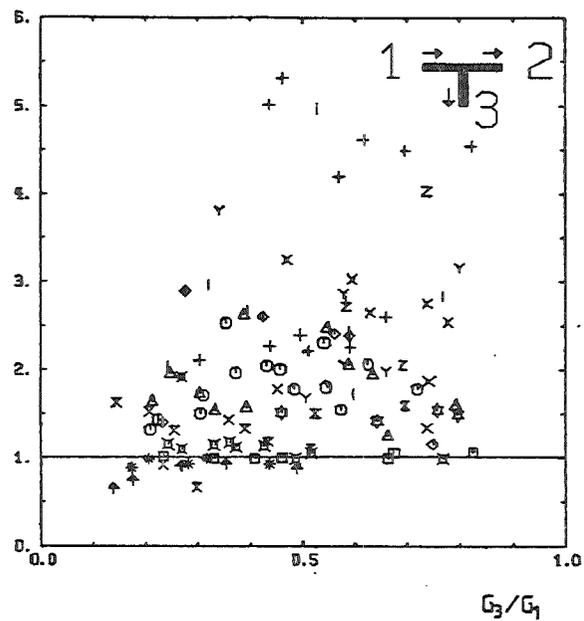


Saba-Lahey Modell ($S = 1$)

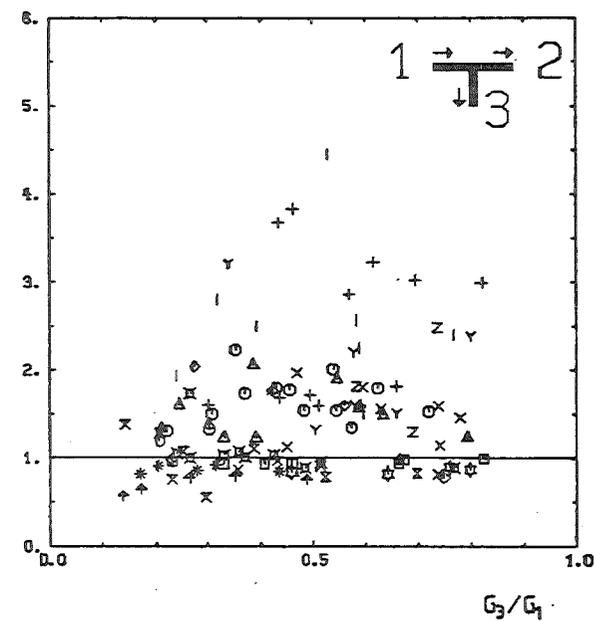
Abb. 68 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckabfall Δp_{1-2} für $0 < G_3 / G_1 < 1$,
 Abzweig waagrecht, Dampf-Wasser-Strömung, $2,5 < P_1 < 10$ MPa



RSM (S>1)

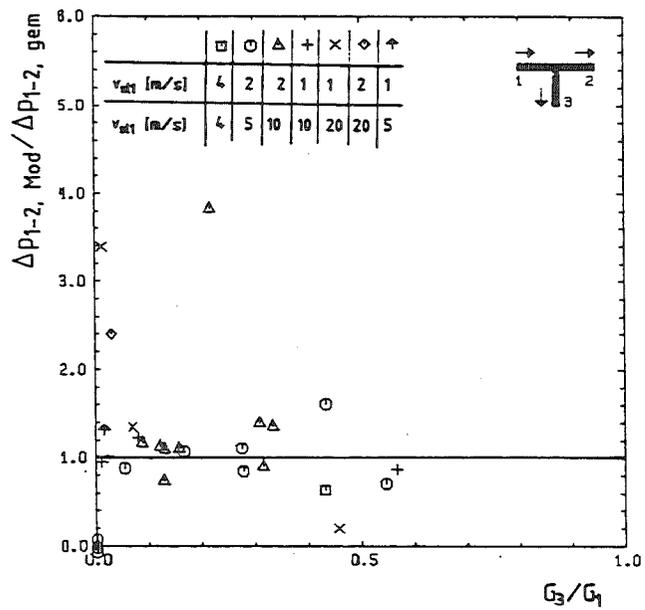


Saba-Lahey Modell (S>1)

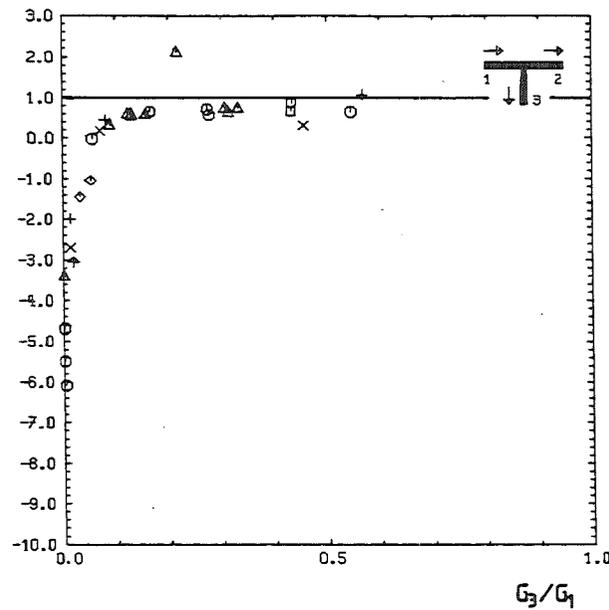


Saba-Lahey Modell (S=1)

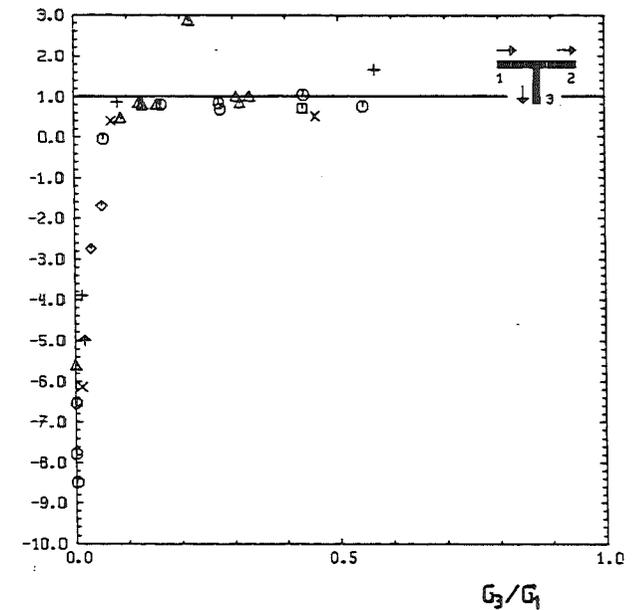
Abb. 69 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust Δp_{1-2} für $0 < G_3/G_1 < 1$,
Abzweig nach unten, Luft-Wasser-Strömung



RSM ($S > 1$)



Saba-Lahey Modell ($S > 1$)



Saba-Lahey Modell ($S = 1$)

Abb. 70 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckverlust Δp_{1-2} für $0 < G_3/G_1 < 1$,
Abzweig nach oben, Luft-Wasser-Strömung

In Abb. 69 sind die entsprechenden Verhältnisse für den nach unten gerichteten Abzweig aufgetragen. Im untersuchten Bereich ($0,2 < G_3/G_1 < 1$) werden die Druckdifferenzen $\Delta p_{1-2, \text{gem.}}$ am besten durch die Beziehung von Reimann-Seeger (RSM) für $S > 1$ wiedergegeben. Die Beziehungen von Saba-Lahey liefern hier um bis zu 400 % zu hohe Werte.

Für den waagerechten Abzweig und für den nach unten gerichteten Abzweig wurde das Massenstromdichteverhältnis zwischen $0,1 < G_3/G_1 < 1$ variiert, während bei nach oben gerichtetem Abzweig auch Werte bis $G_3/G_1 \approx 0$ untersucht wurden. Speziell bei sehr kleinen Werten G_3/G_1 ergibt das Saba-Lahey Modell große negative Druckdifferenzen, während das RSM im gesamten Bereich positive Werte für $\Delta p_{1-2, \text{gem.}}$ errechnet (Abb. 70).

7.1.5 Vergleich der Rechenmodelle mit den Experimenten von Saba und Lahey /34/

Die bereits in Kap. 2.2.3 erwähnten Experimente von Saba und Lahey /34/ mit einem waagerechten T-Stück wurden ebenfalls mit den hier beschriebenen Druckverlustmodellen ausgewertet. Dabei wurde für K_{12} die von den Autoren angegebene Beziehung benutzt. Für Δp_{1-3} ergaben sich ähnliche Tendenzen wie bei der Nachrechnung der eigenen Experimente (Abb. 71), d.h. das Homogene- und das Chisholm-Modell errechnen im Bereich $G_3/G_1 < 0,6$ wieder zu hohe Werte. Das RSM liefert im ganzen Bereich $0 < G_3/G_1 < 1$ Werte, die um $\Delta p_{1-3, \text{Mod}} / \Delta p_{1-3, \text{gem.}} = 1$ herum streuen.

Abb. 72 zeigt entsprechende Ergebnisse für die Bestimmung von Δp_{1-2} mit dem Modell von Reimann und Seeger und dem Saba-Lahey-Modell für $S > 1$ und $S = 1$. Hier ergibt das RSM relativ schlechte Ergebnisse, während die Beziehungen von Saba und Lahey eine geringere Streuung der Werte aufweisen.

7.2 Zusammenfassung

Die in Kapitel 7 "Druckverluste im T-Stück" gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Druckdifferenz $\Delta p_{1-2, \text{gem.}}$ zwischen Zustrom und Abstrom nimmt unabhängig von der Abzweigorientierung bei einer Erhöhung der Impulsstromdichte ρu^2 der beiden Phasen zu. Die gleiche Abhängigkeit gilt auch für den Druckverlust

$\Delta p_{1-3, \text{gem.}}$ zwischen Zustrom und Abzweig. Dies gilt sowohl für Luft-Wasser als auch für Dampf-Wasser-Strömung.

Bei der Modellierung des Abzweigdruckverlustes Δp_{1-3} wurde mit der homogenen Beziehung nach Reimann-Seeger (RSM) die besten Ergebnisse erzielt. Dies gilt für die Abzweigorientierung nach unten und für die waagerechte Abzweiganordnung. Bei der Orientierung des Abzweigs nach oben errechnen alle untersuchten Modelle zu hohe Werte Δp_{1-3} . Dies rührt daher, daß durch die starke Phasenseparation im Abzweigrohr die Phasengeschwindigkeiten sehr unterschiedlich sind und eine erfolgreiche Modellierung bisher nicht gelungen ist.

Die Bestimmung der Druckdifferenzen Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom gelingt am besten mit dem RSM ($S > 1$), wobei das Modell von Saba und Lahey ($S > 1$) für $G_3/G_1 > 0,1$ nur geringfügig schlechtere Werte errechnet.

Für Werte $G_3/G_1 < 0,1$ versagen jedoch die Modelle von Saba und Lahey /34/, da in diesem Bereich der zur Modellierung verwendete Druckverlustkoeffizient unendlich große Werte annimmt.

Bei einem Vergleich der Modelle für Δp_{1-2} und Δp_{1-3} mit den Messungen von Saba und Lahey werden für die Berechnung von Δp_{1-3} mit dem RSM ($S > 1$) die besten Ergebnisse erzielt. Bei der Modellierung von Δp_{1-2} wird mit dem homogenen Modell von Saba-Lahey ($S = 1$) die relativ beste Übereinstimmung erzielt.

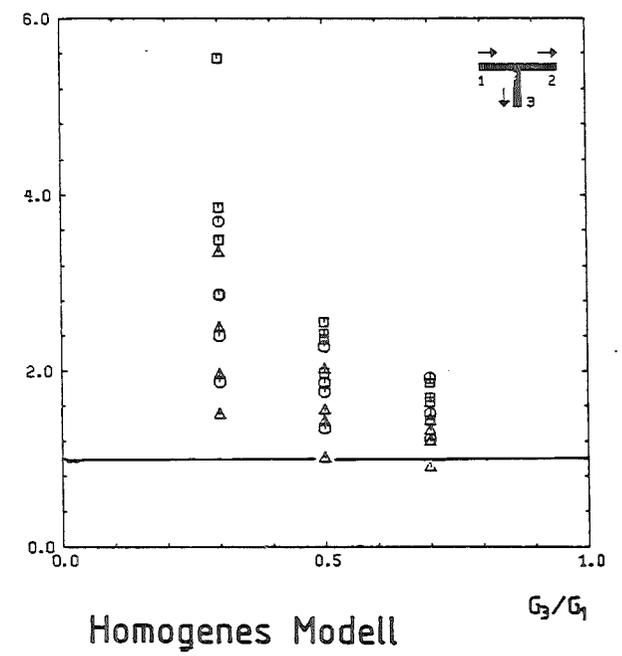
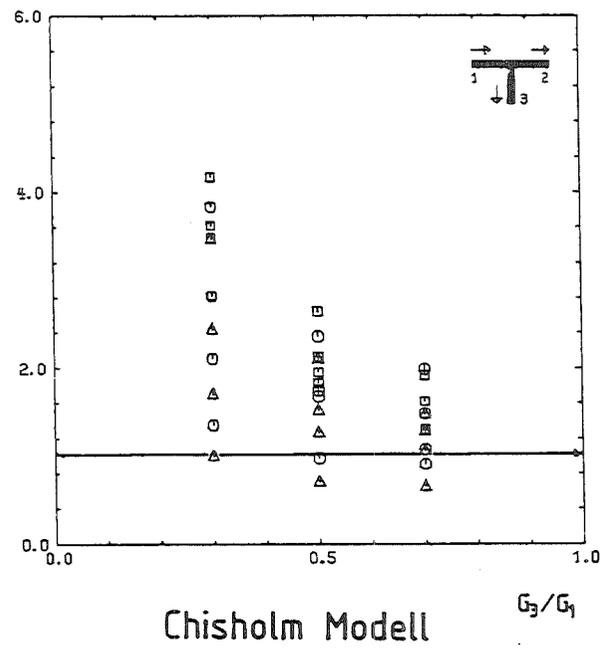
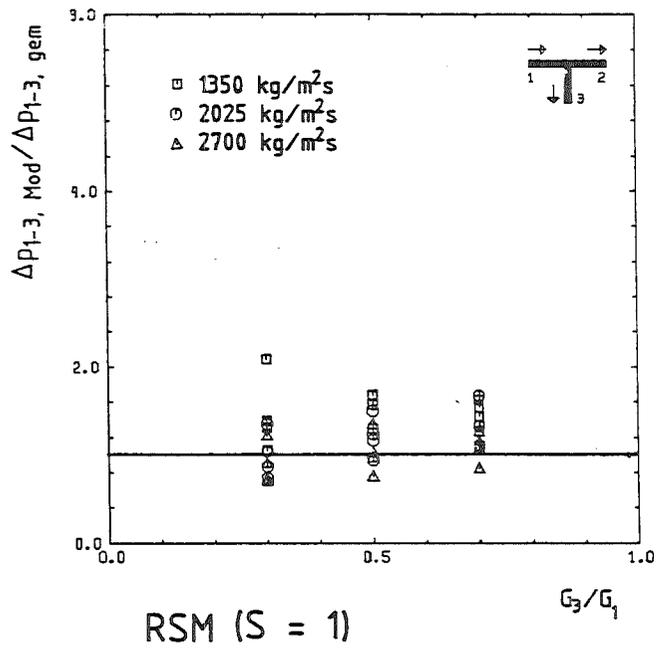
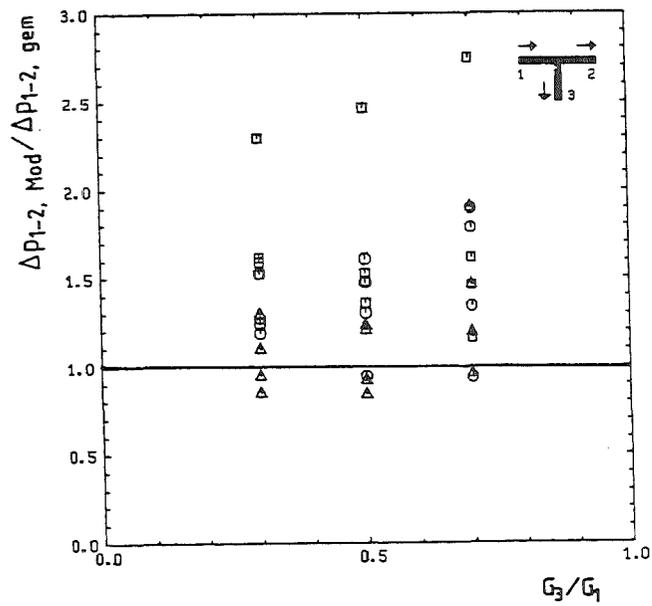
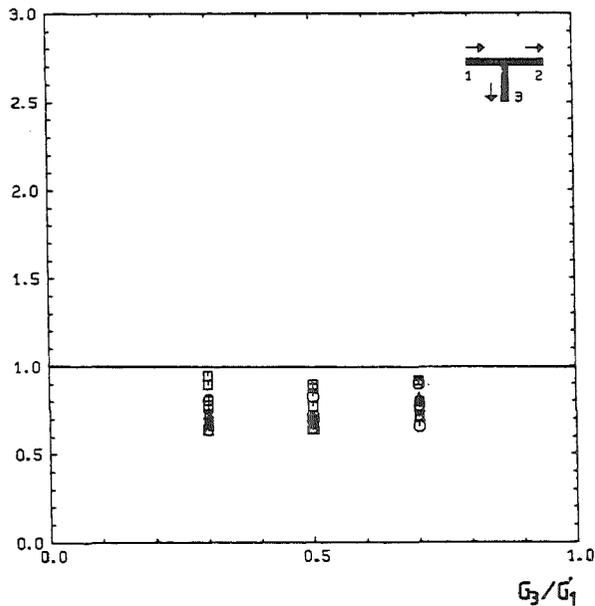


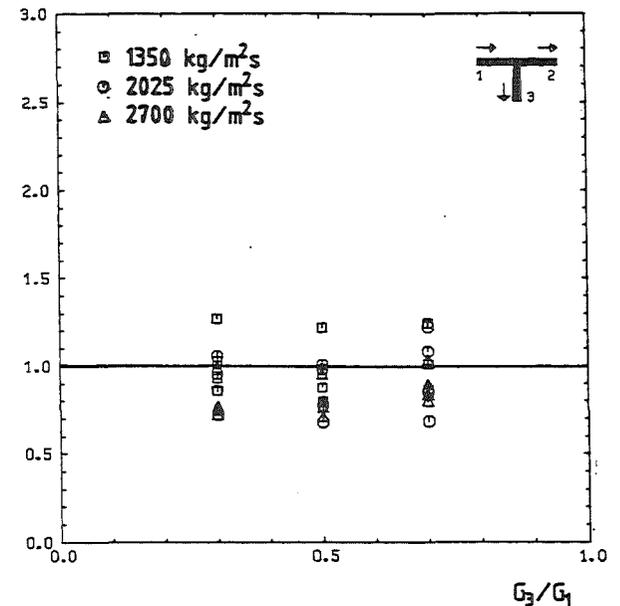
Abb. 71 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckabfall Δp_{1-3} für $0 < G_3 / G_1 < 1$ mit Messungen von Saba-Lahey, Abzweig waagrecht, Luft-Wasser-Strömung



RSM (S>1)



Saba-Lahey Modell (S>1)



Saba-Lahey Modell (S=1)

Abb. 72 Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Druckabfall Δp_{1-2} für $0 < G_3/G_1 < 1$ mit Messungen von Saba-Lahey, Abzweig waagrecht, Luft-Wasser-Strömung

8. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden in Gas-Flüssigkeits-Strömung Untersuchungen zur Phasenumverteilung und zum Druckverlust in einem T-Stück mit gleichen Durchmessern bei horizontalem Zustrom durchgeführt.

Im Vergleich zu aus der Literatur bekannten experimentellen Arbeiten, stellt diese Arbeit eine wesentliche Erweiterung in folgenden Bereichen dar:

- Variation von Massenstrom und Gasgehalt des Zustroms:

Diese Parameter wurden derart variiert, daß ein breites Spektrum von Strömungsformen überdeckt wurde (Schwall-, Ring-, disperse Strömung).

- Variation der Fluideigenschaften:

Es wurden Luft-Wasser Experimente bei 0,4 bis 1 MPa durchgeführt sowie Dampf-Wasser Experimente bei Drücken bis zu 10 MPa. Dadurch wurde speziell das Dichteverhältnis ρ_1/ρ_g in weiten Bereichen variiert ($13 < \rho_1/\rho_g < 200$)

- Variation der Abzweigorientierung:

Es wurde die waagerechte sowie die nach oben und nach unten orientierte Abzweiganordnung untersucht.

Die wesentlichen Ergebnisse zur Umverteilung sind:

Bei konstantem Systemdruck zeigt sich eine relativ schwach ausgeprägte Abhängigkeit von Massenstrom und Dampfgehalt (Strömungsform).

Eine Erhöhung des Systemdrucks (Erhöhung von ρ_g/ρ_1) ergibt eine Verringerung der Phasenumverteilung.

Bei vertikal nach oben gerichtetem Abzweig liegen die Phasenseparationskurven $x_3/x_1 = f(G_3/G_1)$ sehr nahe an der Grenzkurve der vollständigen Phasenseparation. Bei waagerechtem Abzweig liegen die Kurven, ausgehend von $G_3/G_1 = 1$, bei abnehmendem G_3/G_1 in der Nähe der vollständigen Phasenseparationskurve, zeigen bei $G_3/G_1 \approx 0,3$ ein typisches Maximum und fallen danach steil ab.

Für den nach unten gerichteten Abzweig wird eine starke Abhängigkeit von der Phasenverteilung im Zustrom (Strömungsform) beobachtet. Die Phasensepara-

tionskurven liegen deutlich unterhalb der Kurven für die waagerechte Abzweigorientierung.

Für alle drei Abzweigorientierungen wurden empirische Beziehungen für die Phasenseparation im T-Stück angegeben.

Bezüglich der Druckverluste im T-Stück wurden folgende Erkenntnisse gewonnen: (Es wurden verschiedene Modelle für den Druckverlust Δp_{1-3} zwischen Zustrom und Abzweig und die Druckänderung Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.)

Für die Modellierung von Δp_{1-3} ergibt bei allen Parametervariationen das Modell von Reimann-Seeger /57/ die besten Ergebnisse, allerdings sind die Ergebnisse für die Abzweigorientierung nach oben auch bei diesem Modell nicht befriedigend.

Bei der Modellierung von Δp_{1-2} liefert wiederum dieses Modell die besten Ergebnisse für alle Abzweigrichtungen. Nahezu ähnliche Ergebnisse liefert ein von Saba und Lahey /34/ aufgeführtes inhomogenes Modell.

Das in /57/ vorgestellte Modell ergibt auch die beste Übereinstimmung mit den von Saba und Lahey durchgeführten Experimenten für den Abzweigdruckverlust Δp_{1-3} .

Eine Erweiterung der Arbeiten könnte in Bezug auf die Verbesserung der Modellierung des Druckverlustes für den nach oben orientierten Abzweig erfolgen. Hierzu wären lokale Messungen von Phasenverteilung und Geschwindigkeit wünschenswert.

Eine Änderung des Durchmesserhältnisses D_3/D_1 bei waagerechter Zuströmung hat wahrscheinlich einen großen Einfluß auf die Phasenseparation. Hier spielt dann die Phasenverteilung im Zustrom eine größere Rolle, da für Abzweigdurchmesser $D_3/D_1 < 1$ nur aus einem begrenzten Bereich des Zustromquerschnitts Fluid entnommen wird. Eine Extrapolation der vorgestellten Ergebnisse zur Umverteilung auf andere Durchmesserhältnisse ist nur mit Vorsicht zu empfehlen.

9. Literatur

- /1/ Huhn, J., Wolf, J.:
Zweiphasenströmung gasförmig /flüssig,
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1975
- /2/ Bergles, A.E., Collier, J.G., Delhaye, J.M., Hewitt, G.F., Mayinger,
F.:
Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries,
Hemisphere Publ. Cor., 1981
- /3/ Müller, U.:
Zweiphasenströmung mit Wärmeübergang
Vorlesung an der Universität Karlsruhe, WS 83/84
- /4/ Friedel, L.:
Druckabfall bei der Strömung von Gas/Dampf-Flüssigkeitgemischen in
Rohren,
Chem. Ing. Techn. 50, Nr. 3, 167 ff, 1978
- /5/ Rouhani, Z.:
Modified Correlations for Void and Two-Phase Pressure Drop,
AE - RTV - 841, 1969
- /6/ Reimann, J., John, H., Seeger, W.:
Experiments on the Transition from Slug to Annular Flow in Horizontal
Air-Water and Steam-Water Flow.
Meeting of the European Two-Phase Flow Group, Eindhoven, NL, June 2-5,
1981
- /7/ Hewitt, G.F.:
Measurement of Two Phase Flow Parameters
Academic Press, London, 1978
- /8/ Zuber, N.; Findlay, J.A.:
Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems.
J. Heat Transfer (1965) S. 453-468

- /9/ Blaisdell, F.W.; Manson, P.W.:
Loss of Energy at Sharp-Edged Pipe Junctions in Water Conveyance
Systems
Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture,
Technical Bulletin No. 1283, Aug. 1963
- /10/ Vogel, G.:
Untersuchungen über den Verlust in rechtwinkligen Rohrverzweigungen,
Mitteilungen des hydr. Inst. der T.H. München, Heft 2, 61-64, 1928
- /11/ Gardel, A.:
Les pertes de charges dans les écoulements au travers de branchements
en té.
Bulletin Technique de la Suisse Romande,
No. 9, 122 - 130, und No. 10, 143 - 148, 1957
- /12/ Gardel, A.:
Les pertes de charge dans les branchements en T^e des conduites de
section circulaire,
Bulletin Technique de la Suisse Romande
No 25, 363 - 391, 1970
- /13/ Kinne, E.:
Beiträge zur Kenntnis der hydraulischen Verluste in Abzweigstücken,
Mitteilungen des hydr. Inst. der T.H. München,
Heft 1, 70 - 90, 1926
- /14/ Petermann, F.:
Der Verlust in schiefwinkligen Rohrverzweigungen,
Mitteilungen des hydr. Inst. der T.H. München,
Heft 1, 98 - 117, 1926
- /15/ Naramoto, I., Kasai, T.:
On the Loss of Energy at Impact of Two Confined Streams of Water.
Memoirs of the College of Engineering, Kyushu
Imperial University, Fukuoka, Japan, Vol. VI, 1931 - 1932

- /16/ Hoopes, J.W., Isakoff, S.E., Clarke, J.J., Drew, T.B.:
Friction Losses in Screwed Iron Tees,
Chemical Engineering Progress, Vol. 44, pp. 690 - 696, Sept. 1948
- /17/ Stach, E.:
Druckverlust in Formstücken für Preßluftleitungen
Glückauf, Berg- und Hüttenmännische Zeitschrift,
Nr. 45, 1400 - 1404, Nov. 1931
- /18/ Mc Nown, J.S.:
Mechanics of Manifold Flow,
Trans. of the American Society of Civil Engineers,
Vol. 119, pp. 1103 - 1143, 1954
- /19/ Zeisser, M.H.:
Summary Report of Single-Tube Branch and Multi-Tube Branch Water Flow
Tests Conducted by the University of Connecticut.
Pratt and Whitney Aircraft, May, 1963
- /20/ Colin, P.E.:
Mécanique des fluides. Les pertes de pression dans les jonctions à 3
et à 4 branches.
C.S.T.C. Revue, No. 3, Mai - Juin, 1969, 11 - 22
- /21/ Müller, W., Stratmann, H.:
Druckverluste in Abzweigrohren und Verteilleitungen.
Technische Rundschau Sulzer, 4/1971, 280 - 298
- /22/ Ito, H., Imai, K.:
Energy Losses at 90 ° Pipe Junctions
Journal of the Hydraulics Division, pp. 1353 - 1369, Sept. 1973
- /23/ Honan, T.J., Lahey, R.T.:
The Measurement of Phase Separation in Wyes and Tees,
NUREG/CR 0557, 1978

- /24/ Honan, T.J., Lahey, R.T.
The Measurement of Phase Separation in Wyes and Tees,
Nuclear Engineering and Design 64 (1981) 93 - 102
- /25/ Zetzmann, K.:
Phasenseparation und Druckabfall in zweiphasig durchströmten vertikalen Rohrabzweigungen,
Dissertation, Universität Hannover, 1982
- /26/ Collier, J.G.:
Single Phase and Two-Phase Flow Behavior in Primary Circuit Components,
Proc. NATO Advanced Institute on Two-phase Flow and Heat Transfer,
Bd. 1, 313 - 365, Hemisphere Corp. 1976
- /27/ Whalley, P.B., Azzopardi, B.J.:
Two-Phase Flow in a T-Junction,
UKAEA Report AERE-R 9699, 1980
- /28/ Butterworth, D., Pulling, D.J.:
Film Flow and Film Thickness Measurements for Horizontal, Annular Air-Water Flow,
AERE Report No. 7576, 1973
- /29/ Whalley, P.B., Fells, N.S.:
Further Measurements of Two-Phase Flow in a T-junction,
UKAEA Report AERE-M 3149, 1981
- /30/ Azzopardi, B.J., Baker, D.R.:
Two-Phase Flow in a T-Junction: The Effect of Flow Pattern in Vertical Upflow.
UKAEA Report AERE-R 10174, 1981
- /31/ Azzopardi, B.J., Whalley, P.B.:
The Effect of Flow Patterns on Two-Phase Flow in a T-Junction
Int. J. Multiphase Flow Vol. 8, No. 5, pp. 491 - 507, 1982

- /32/ Azzopardi, B.J., Freemann-Bell, G.:
The Effect of the Side Arm Diameter on the Two-Phase Flow Split at a
T-Junction
UKAEA Report AERE-M 3290, 1983
- /33/ Henry, J.A.R.:
Dividing Annular Flow in a Horizontal Tee,
Int. J. Multiphase Flow, Vol. 7, pp. 343 - 355, 1981
- /34/ Saba, N., Lahey, R.T.:
Phase Separation Phenomena in Branching Conduits,
Department of Nuclear Engineering,
Rensselaer Polytechnic Institute Troy, NY
- /35/ Mc Creery, G.E.:
A Correlation for Phase Separation in a Tee.
EG&G Idaho, Inc., Idaho Falls, Idaho, 1983
- /36/ Katsaounis, A., Aust, E., Fuerst, H.D., Schultheiss, G.F.:
Pressure Drop in T-Junctions with Liquid and Gas-Liquid Flow
Heat Exchangers for Two-Phase Applications, HTD-Vol. 27, published by
A.S.M.E., 1983
- /37/ Tsuyama, M., Taga, M.:
On the Flow of the Air-Water Mixture in the Branch Pipe,
Bull. JSME, Vol. 2, No. 5, 151 - 156, 1959
- /38/ Hewitt, G.F., Shires, G.F.:
1964, unveröffentlicht
- /39/ Fouda, A.E., Rhodes, E.:
Two-Phase Annular Flow Stream Division,
Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 50, 353 - 363, 1972
- /40/ Fouda, E.A., Rhodes, E.:
Two-Phase Annular Flow Stream Division in Simple Tee,
Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 52, 354 - 360, 1974

- /41/ Fouda, A.E.:
Two-Phase Flow Behaviour in Manifolds and Networks,
Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Canada, 1975
- /42/ Hong, K.C.:
Two-Phase Flow Splitting at a Pipe Tee,
J. Petr. Technol., 290 - 296, 1978
- /43/ Zuber, N.:
Problems in Modeling of Small Break LOCA
NUREG - 0724, 1981
- /44/ Reimann, J., John, H., Brinkmann, B., Demski, A., Pawlak, L., Seeger,
W., Wanner, E., Weinbrecht, R.:
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener
Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren.
In: Projekt Nukleare Sicherheit
Jahresbericht 1981. KfK-3250 (Juni 1982)
S. 4100/86 - 4100/99
- /45/ Reimann, J., John, H., Seeger, W., Smoglie, C.:
Zweiphasenströmungen in Rohrverzweigungen (T-Stücken)
In: Beiträge zu thermo- und fluiddynamischen Problemen der Kerntechnik
Herausgeber: Müller, U., Krebs, L., Rust, K.
KfK 3630, Februar 1984
- /46/ Reimann, J., Khan, M.:
Flow Through a Small Break at the Bottom of a Large Pipe with Strati-
fied Flow,
Second International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohy-
draulics, Jan. 11-14, 1983, Santa Barbara, California
- /47/ Reimann, J., Smoglie, C.:
Flow Through a Small Pipe at the Top of a Large Pipe with Stratified
Flow.
Annual meeting of the european two-phase flow group, Zürich, Switzer-
land, June 14-16, 1983

- /48/ Smoglie, C., Reimann, J.:
Two-Phase Flow Through a Small Horizontal Branch in a Pipe with Stratified Flow
KTG Jahrestagung 1984, Tagungsber. S. 73
- /49/ John, H., Reimann, J.:
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren, Anlagenbeschreibung
KfK 2731B, Febr. 1979
- /50/ Reimann, J., John, H., Demski, A., Hassenpflug, H., Mülli, R., Neeb, B., Pawlak, L., Sallet, D., Seeger, W., Weinbrecht, R.:
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren
In: Projekt Nukleare Sicherheit
Jahresbericht 1980. KfK 2950, 1981
- /51/ Reimann, J., John, H., Seeger, W.:
Transition from Slug to Annular Flow in Horizontal Air-Water and- Steam-Water Flow
KfK 3189, November 1981
- /52/ Reimann, J.; Brinkman, H.J.; Demski, A.; John, H.; Pawlak, L.; Seeger, W.; Smoglie, C.; Wanner, E.; Weinbrecht, E.:
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren; In: Projekt Nukleare Sicherheit; Jahresbericht 1982, KfK 3350, 1983, Seite 4100/94
- /53/ Reimann, J.; Kusterer, H.; John, H.:
Two-Phase Mass Flow Rate Measurements with Pitot Tubes and Density Measurements.
I.U.T.A.M. Symposium, Nancy, 1983
- /54/ Sallet, D.W.; Popp, M.:
Experimental Investigation of One- and Two-phase Flow Through a Tee-Junction; Physical Modelling of Multiphase Flow, Coventry, England, April 19-21, 1983; sowie persönliche Mitteilung

- /55/ Chisholm, D:
Pressure Losses in Bends and Tees during Steam-Water Flow.
NEL Report 318, 1967.
- /56/ Fitzsimmons, D.E.:
Two-Phase Pressure Drop in Piping Components.
HW 80970 REV1, Richland, Washington, General Electric Hanford Laboratories, 1964.
- /57/ Reimann, J.; Seeger, W.:
Two-Phase Pressure Drop in a Dividing T-Junction; The Mechanics of Gas Liquid Flow Systems, Euromech Colloquium 176, Villard de Lans, France, Sept. 21-23, 1983.
- /58/ Idel'chik I. Ye.; Shteinberg, M.E.:
Formulae, Tabular Data and Recommendations for the Choice of Gas-Air and Water-Distribution Headers, Teploenergetica 21, 1974.
- /59/ Weber, M.:
Strömungsfördertechnik, Krausskopf-Verlag, 1973
- /60/ VDI-Wärmeatlas, 1984
- /61/ Hackeschmidt, M.:
Grundlagen der Strömungstechnik, Band I und II, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1970
- /62/ Reimann, J.; Seeger, W.; John, H.:
Kernforschungszentrum Karlsruhe, August 1980, unveröffentlicht.
- /63/ Smoglie, C.:
Zweiphasenströmungen durch kleine Abzweige in einem horizontalen Rohr mit geschichteter Gas-Flüssigkeits-Strömung; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1984, KfK 3862.
- /64/ Wallis, G.B.:
One-dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill Book Company, 1969.

10 Anhang

10.1 Modell für die Druckverluste im T-Stück

10.1.1 Einphasige Strömung

Die Druckdifferenz Δp_{1-2} zwischen Zustrom und Abstrom bzw. Δp_{1-3} zwischen Zustrom und Abzweig wird üblicherweise als Summe aus einem reversiblen Anteil und aus einem irreversiblen Anteil aufgefaßt (vgl. /60/).

$$\Delta p_{1-2} = (\Delta p_{1-2})_{\text{rev}} + (\Delta p_{1-2})_{\text{irr}} \quad (10.1)$$

bzw.

$$\Delta p_{1-3} = (\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} + (\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} \quad , \quad (10.2)$$

mit

$$(\Delta p_{1-2})_{\text{rev}} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_2^2}{\rho_2} - \frac{G_1^2}{\rho_1} \right) \quad (10.3)$$

bzw.

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_3^2}{\rho_3} - \frac{G_1^2}{\rho_1} \right) \quad . \quad (10.4)$$

Der irreversible Druckverlust wird folgendermaßen gebildet:

$$(\Delta p_{1-2})_{\text{irr}} = K_{12} \cdot \frac{G_1^2}{2\rho_1} \quad (10.5)$$

bzw.

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} = K_{13} \cdot \frac{G_1^2}{2\rho_1} \quad . \quad (10.6)$$

Dabei sind K_{12} und K_{13} Druckverlustkoeffizienten, die experimentell bestimmt werden (Abb. 3). Sie hängen von der T-Stück Geometrie und vom Massenstromdichteverhältnis ab, welches bei einphasiger Strömung gleich dem Volumenstromverhältnis \dot{V}_3/\dot{V}_1 ist.

Am Beispiel der Druckdifferenz Δp_{1-3} zwischen Zustrom 1 und Abzweig 3 wird ein anderer Weg gezeigt, den Druckverlust Δp_{1-3} zu beschreiben. Der Gesamtdruckverlust setzt sich dabei aus dem mit Hilfe der Energiegleichung bestimmten reversiblen Beschleunigungsdruckabfalls Δp_{1-c3} zwischen Zustrom 1 und vena contracta c_3 und aus dem unter Verwendung des Impulssatzes gewonne-

nen Stoßdiffusordruckverlust p_{c_3-3} zwischen c_3 und dem Abzweig 3 zusammen (Abb. 73):

$$\Delta p_{1-c_3} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_{c_3}^2}{\rho_{c_3}} - \frac{G_1^2}{\rho_1} \right), \quad (10.7)$$

$$\Delta p_{c_3-3} = \frac{G_3^2}{\rho_3} - \frac{G_3 \cdot G_{c_3}}{\rho_3}. \quad (10.8)$$

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und durch Einführen einer Kontraktionszahl $C_3 = A_{c_3}/A_3$ folgt für den Gesamtdruckverlust unter Annahme von $\rho_{c_3} = \rho_3$

$$\Delta p_{1-3} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_3^2}{\rho_3} - \frac{G_1^2}{\rho_1} \right) + \left(\frac{1}{C_3} - 1 \right)^2 \cdot \frac{G_3^2}{2\rho_3}. \quad (10.9)$$

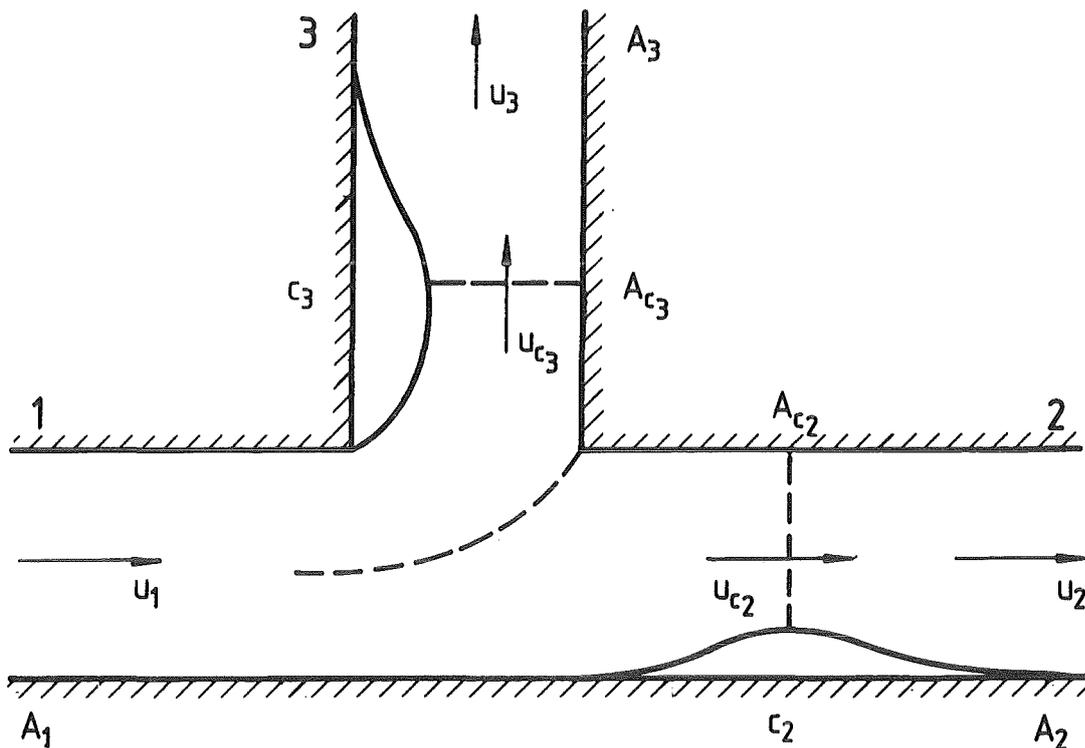


Abb. 73 Einphasig durchströmtes T-Stück

Ein Vergleich der Gleichungen (10.2) und (10.9) ergibt eine Beziehung zwischen C_3 und K_{13} :

$$C_3 = \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_1}} \frac{G_1}{G_3} \sqrt{K_{13}} \right)^{-1} \quad (10.10)$$

Bei Annahme einer inkompressiblen Strömung ($\rho = \text{konst.}$) reduziert sich Gl. (10.10) auf

$$C_3 = \left(1 + \frac{G_1}{G_3} \sqrt{K_{13}} \right)^{-1} \quad (10.11)$$

In diesem Zusammenhang ist es interessant festzustellen, daß die aus der Potentialtheorie für ebene Strömung bestimmte Kontraktionszahl C_3 (vgl. Sallet und Popp /54/) im Vergleich mit dem experimentell bestimmten K_{13} von Gardel /11/ eine gute Übereinstimmung liefert (vgl. Abb. 74). Daraus läßt sich schließen, daß die Vorstellung, die zur Modellierung des Druckverlustes Δp_{1-3} nach Gl. (10.9) führte, im wesentlichen physikalisch realistisch ist.

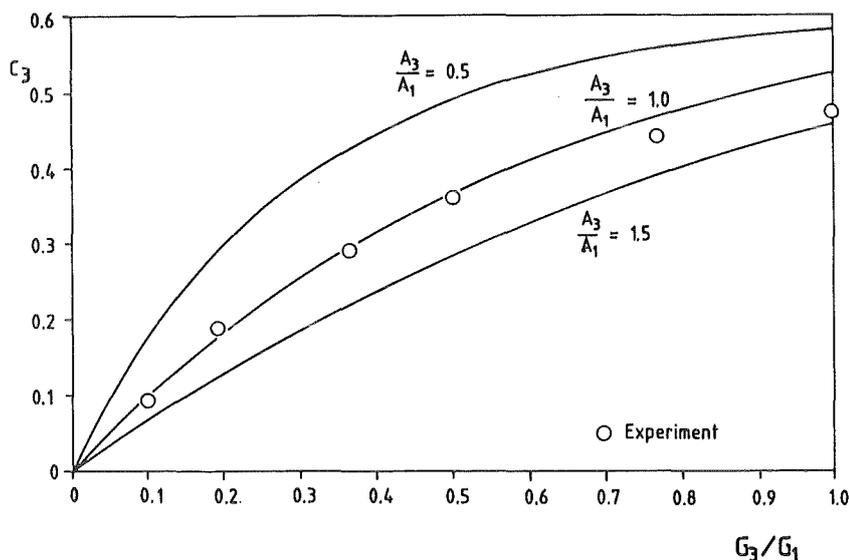


Abb. 74 Kontraktionszahl C_3 im Vergleich mit Experimenten von Gardel /11/

In analoger Vorgehensweise ergibt sich für den Fluidstrom von 1 nach 2 die Gesamtdruckdifferenz zu

$$\Delta p_{1-2} = \frac{1}{2\rho} (G_2^2 - G_1^2) + \left(\frac{1}{C_2} - 1 \right)^2 \cdot \frac{G_2^2}{2\rho} \quad (10.12)$$

mit

$$C_2 = \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \frac{G_1}{G_2} \sqrt{K_{12}} \right)^{-1} \quad (10.13)$$

wobei C_2 die aus dem Druckverlustkoeffizient K_{12} berechnete Kontraktionszahl

für den Abstrom ist. Das Auftreten einer Strömungsablösung im Abstrom und damit einer vena contracta wurde in Kap. 5 diskutiert; ein eindrucksvolles Bild dieser Strömungsablösung bei einphasiger Strömung enthält der Einband des Lehrbuches von Hackeschmidt /61/.

10.1.2 Zweiphasige Strömung

10.1.2.1 Modell von Reimann-Seeger (RSM)

Im folgenden wird das von Reimann-Seeger /57/ vorgeschlagene Modell (RSM) für den Druckverlust in einem zweiphasig durchströmten T-Stück am Beispiel für den Gesamtdruckverlust Δp_{1-3} zwischen Zustrom 1 und Abzweig 3 detailliert beschrieben. Wie bei der einphasigen Strömung wird davon ausgegangen, daß sich Δp_{1-3} aus einem reversiblen Beschleunigungsdruckverlust Δp_{1-c_3} und einem Stoßdiffusordruckverlust Δp_{c_3-3} zusammensetzt.

$$\Delta p_{1-3} = \Delta p_{1-c_3} + \Delta p_{c_3-3} \quad (10.14)$$

Zur Berechnung des reversiblen Beschleunigungsdruckverlustes $\Delta p_{1-c_3} = p_1 - p_{c_3}$ wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Es findet kein Phasenübergang zwischen der vena contracta c_3 und dem Abzweig 3 statt, d.h. $x_{c_3} = x_3$.
- Die beiden Phasen werden getrennt betrachtet (Abb. 75). Nach dem Energiesatz gilt für den Fluidstrom zwischen 1 und c_3 :

$$(p_1 - p_{c_3}) \cdot \dot{V}_3 = \frac{1}{2} \dot{m}_{g_3} (u_{g_3}^2 - u_{g_1}^2) + \frac{1}{2} \dot{m}_{l_3} (u_{l_3}^2 - u_{l_1}^2), \quad (10.15)$$

mit

$$\dot{V}_3 = \frac{\dot{m}_{g_3}}{\rho_g} + \frac{\dot{m}_{l_3}}{\rho_l} = \dot{m}_3 \left(\frac{x_3}{\rho_g} + \frac{1-x_3}{\rho_l} \right) = \frac{\dot{m}_3}{\rho_{h_3}} \quad (10.16)$$

und

$$u_{g_i} = \frac{G_i}{\alpha_i \rho_g} = \frac{x_i \cdot G_i}{\alpha_i \rho_g} \quad (10.17)$$

sowie

$$u_{l_i} = \frac{G_i}{(1-\alpha_i) \rho_l} = \frac{1-x_i}{1-\alpha_i} \cdot \frac{G_i}{\rho_l} \quad (10.18)$$

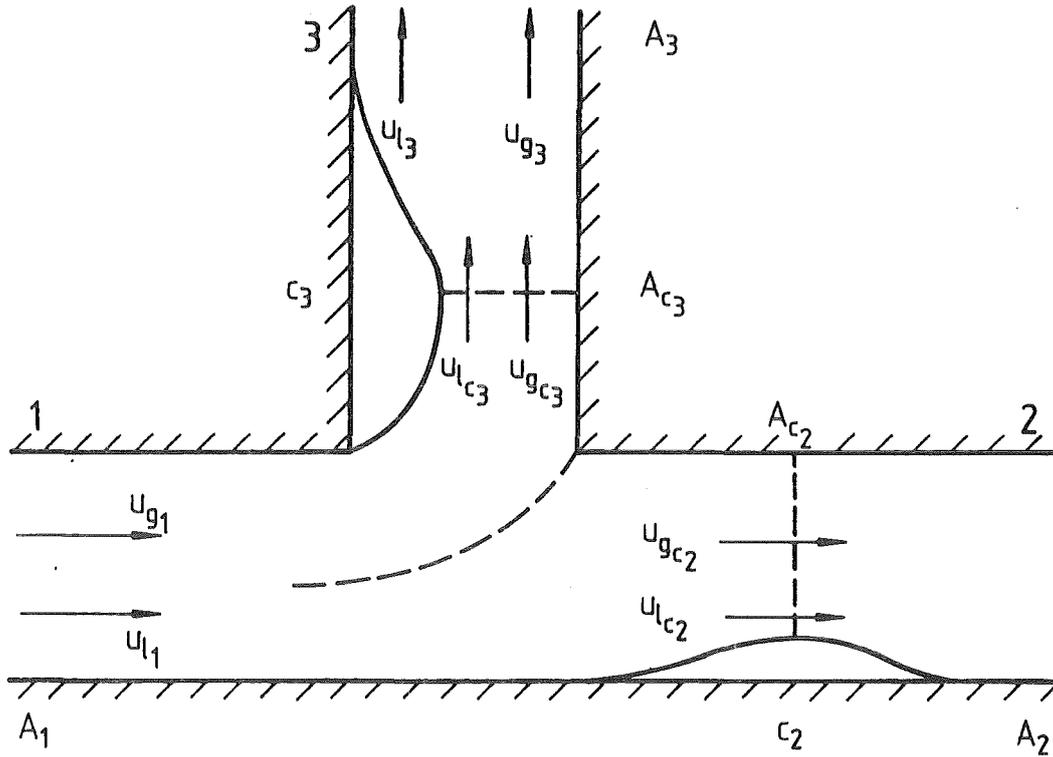


Abb. 75 Zweiphasig durchströmtes T-Stück

und unter Elimination von α durch den Schlupf S

$$\alpha_i = \frac{x_i}{x_i + \frac{S_i}{R} (1-x_i)} \quad (10.19)$$

wobei $R = \rho_l/\rho_g$ und $C_3 = A_{c3}/A_3$ ist, folgt

$$\Delta p_{1-c_3} = \frac{\rho_{h3}}{2\rho_l^2} \left\{ \frac{G_3^2}{C_3^2} (x_3 \cdot R + S_{c_3} (1-x_3))^2 \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_{c_3}^2} \right) - G_1^2 (x_1 \cdot R + S_1 (1-x_1))^2 \cdot \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_1^2} \right) \right\} \quad (10.20)$$

Für den Stoßdiffusordruckverlust $\Delta p_{c_3-3} = p_{c_3} - p_3$ ergibt sich analog zur Einphasenströmung nach dem Impulssatz:

$$(p_{c_3} - p_3) \cdot A_3 = \dot{m}_{g_3} (u_{g_3} - u_{g_{c_3}}) + \dot{m}_{l_3} (u_{l_3} - u_{l_c}) \quad (10.21)$$

Mit den Gleichungen (10.17) und (10.18) sowie mit der Annahme $x_{c_3} = x_3$ folgt:

$$\begin{aligned} \Delta p_{c_3-3} &= G_3^2 \left(x_3 \left(\frac{x_3}{\alpha_3 \rho_g} - \frac{1}{C_3} \cdot \frac{x_c}{\alpha_{c_3} \rho_g} \right) + (1-x_3) \cdot \frac{(1-x_3)}{(1-\alpha_3) \cdot \rho_1} - \frac{(1-x_{c_3})}{C_3 (1-\alpha_{c_3}) \cdot \rho_1} \right) \\ &= G_3^2 \left(\left(\frac{x_3^2}{\alpha_3 \cdot \rho_g} + \frac{(1-x_3)^2}{(1-\alpha_3) \cdot \rho_1} - \frac{1}{C_3} \left(\frac{x_3^2}{\alpha_{c_3} \cdot \rho_g} + \frac{(1-x_3)^2}{(1-\alpha_{c_3}) \cdot \rho_1} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (10.22)$$

Die Elimination des Dampfvolumentanteils α_i durch den Schlupf S_i nach Gl. (10.19) führt zu

$$\begin{aligned} \Delta p_{c_3-3} &= \frac{G_3^2}{\rho_1} \left[(x_3(x_3 \cdot R + S_3(1-x_3))) + (1-x_3) \cdot \left(x_3 \frac{R}{S_3} + (1-x_3) \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{C_3} (x_3(x_3 \cdot R + S_{c_3}(1-x_3)) + (1-x_3) \left(x_3 \cdot \frac{R}{S_{c_3}} + (1-x_3) \right)) \right] \\ \Delta p_{c_3-3} &= \frac{G_3^2}{\rho_1} \left[(x_3 \cdot R + S_3(1-x_3)) \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_3} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{C_3} (x_3 \cdot R + S_{c_3}(1-x_3)) \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_{c_3}} \right) \right] \end{aligned} \quad (10.23)$$

Der Gesamtdruckverlust ergibt sich somit nach Gl. (10.14) zu

$$\begin{aligned} \Delta p_{1-3} &= \frac{\rho_h}{2\rho_1^2} \left\{ \frac{G_3^2}{C_3^2} (x_3 \cdot R + S_{c_3}(1-x_3))^2 \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_{c_3}^2} \right) - G_1^2 (x_1 \cdot R + S_1(1-x_1))^2 \right. \\ &\quad \cdot \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_1^2} \right) \left. \right\} + \frac{G_3^2}{\rho_1} \left\{ (x_3 \cdot R + S_3(1-x_3)) \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_3} \right) - \frac{1}{C_3} (x_3 \cdot R + S_{c_3}(1-x_3)) \right. \\ &\quad \cdot \left. \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_{c_3}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10.24)$$

Analog zum reversiblen Beschleunigungsdruckverlust zwischen 1 und c_3 ergibt sich der reversible Term zu

$$\begin{aligned} (\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} &= \frac{\rho_h}{2\rho_1^2} \left\{ G_3^2 (x_3 \cdot R + S_3(1-x_3))^2 \cdot \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_3^2} \right) - \right. \\ &\quad \left. G_1^2 (x_1 \cdot R + S_1(1-x_1))^2 \cdot \left(x_3 + \frac{1-x_3}{S_1^2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10.25)$$

wobei die Kontraktionszahl C_3 aus dem Druckverlustkoeffizienten K_{13} auf folgende Weise bestimmt wird

$$C_3 = \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_{h_3}}{\rho_{h_1}}} \cdot \frac{G_1}{G_3} \sqrt{K_{13}}\right)^{-1} \quad (10.26)$$

oder durch Elimination von G_1/G_3 durch $\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_3} \cdot \frac{\rho_{h_1}}{\rho_{h_3}}$:

$$C_3 = \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_{h_1}}{\rho_{h_3}}} \cdot \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_3} \sqrt{K_{13}}\right)^{-1} \quad (10.27)$$

Wie bereits bei einphasiger Strömung gezeigt, ergeben sich die entsprechenden Ausdrücke zur Berechnung von Δp_{1-2} durch Ersetzen des Index 3 durch den Index 2.

10.1.3 Vereinfachte Beziehung für den Abzweigdruckverlust Δp_{1-3}

In den Gln. (10.24) und (10.25) treten der Schlupf S_1 , S_{c3} und S_3 als Parameter auf. Die Schwierigkeit ist, sinnvolle Annahmen für diese Parameter zu machen. Eine plausible Annahme ist es, den Schlupf S_1 und S_3 für den Zustand ausgebildeter Strömung mit entsprechenden Korrelationen (z.B. Rouhani /5/) zu berechnen. Eine plausible Annahme für den Schlupf S_{c3} zu machen ist schwieriger, da aufgrund der Umlenkung einerseits eine Phasenseparation auftreten kann, andererseits aufgrund der Sekundärströmung auch Durchmischungseffekte bestehen.

Es wurde eine Vielzahl von Annahmen durchgerechnet. Die beste Übereinstimmung wurde erhalten für die Annahme homogener Strömung $S_1 = S_{c3} = S_3 = 1$, allerdings bei Verwendung eines modifizierten Ausdruckes für die Kontraktionszahl C_3 :

$$C_3 = \left(1 + \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_3} \sqrt{K_{13}}\right)^{-1} \quad (10.28)$$

wobei K_{13} als Funktion des Volumenstromverhältnisses \dot{V}_3/\dot{V}_1 nach Gl. (7.30) gebildet wird.

Mit der Annahme homogener Strömung und Benutzung der Gl. (10.28) ergibt sich folgender Ausdruck für den irreversiblen Druckverlust:

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{irr}} = \frac{\rho_{h_3}}{\rho_{h_1}} K_{13} \frac{G_1^2}{2\rho_{h_1}}, \quad (10.29)$$

sowie für den reversiblen Druckverlust

$$(\Delta p_{1-3})_{\text{rev}} = \frac{\rho_{h_3}}{2} \left(\left(\frac{G_3}{\rho_{h_3}} \right)^2 - \left(\frac{G_1}{\rho_{h_1}} \right)^2 \right). \quad (10.30)$$

Der Unterschied zum homogenen Modell (siehe Gl. (7.15)) besteht daher im Faktor ρ_{h_3}/ρ_{h_1} und der Verwendung von $K_{13} = f(\dot{V}_3/\dot{V}_1)$ anstelle von $K_{13} = f(G_3/G_1)$. Für $G_3/G_1 = 1$ stimmen beide Modelle überein. Die weitere Vorgehensweise (Einführung eines Koeffizienten K mit Hilfe der Messungen bei $G_3/G_1=1$) wurde in Kap. 7.1.4.1 beschrieben.

10.1.4 Beziehung für die Druckänderung zwischen Zustrom und Abstrom Δp_{1-2}

Hier treten analog zu Kap. 10.1.3 der Schlupf S_1 , S_{c2} und S_2 als Parameter auf. Hier ergibt, wie schon von Saba und Lahey beobachtet, das homogene Modell keine befriedigenden Ergebnisse. Die Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen ist sehr viel besser, falls in den entsprechenden Beziehungen des Kap. 10.1.2 für den Schlupf $S_{c2} = 1$ angenommen wird und S_1 und S_2 mit der von Friedel /4/ empfohlenen Beziehung von Rouhani /5/ berechnet wird.

Die Gleichungen reduzieren sich dann zu:

$$\begin{aligned} \Delta p_{1-2} = & \frac{\rho_{h_2}}{2\rho_1^2} \left\{ \frac{G_2^2}{C_2} (x_2 \cdot R + (1-x_2))^2 - G_1^2 (x_1 \cdot R + S_1(1-x_1))^2 \left(x_2 + \frac{1-x_2}{S_1^2} \right) \right\} + \\ & \frac{G_2^2}{\rho_1} \left\{ (x_2 \cdot R + S_2(1-x_2)) \left(x_2 + \frac{1-x_2}{S_2} \right) - \frac{1}{C_2} (x_2 \cdot R + (1-x_2)) \right\} \end{aligned} \quad (10.31)$$

$$\begin{aligned} (\Delta p_{1-2})_{\text{rev}} = & \frac{\rho_{h_2}}{2\rho_1} \left\{ G_2^2 (x_2 \cdot R + S_2(1-x_2))^2 \cdot \left(x_2 + \frac{1-x_2}{S_2} \right) \right. \\ & \left. - G_1^2 (x_1 \cdot R + S_1(1-x_1))^2 \cdot \left(x_2 + \frac{1-x_2}{S_1} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10.32)$$

wobei für die Beziehung von Rouhani für den Schlupf S_1 und S_2 gilt:

$$S_i = \rho_1 \frac{1}{1-x_i} \left(\frac{C^*}{\rho_{h_i}} + \frac{W_{rel}}{G_i} - \frac{x_i}{\rho_g} \right) , \quad (10.33)$$

mit $W_{rel} = (1,18/\sqrt{\rho_1}) (g \cdot \sigma(\rho_1 - \rho_g))^{1/4}$ und (10.34)

$$C^* = 1 + 0,12 (1-x_i) \quad (10.35)$$

Die Kontraktionszahl C_2 wird dabei analog zu Gl. (10.27) berechnet

$$C_2 = \left(1 + \left(\frac{\rho_{h_1}}{\rho_{h_2}} \right)^{0,5} \cdot \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \sqrt{K_{12}} \right)^{-1}$$

mit K_{12} wiederum als Funktion von \dot{V}_3/\dot{V}_1 nach Gl. (7.28).

10.2 Korrelation von McCreery /35/ zur Beschreibung der Phasenseparation im T-Stück

Das Modell von McCreery /35/ gibt eine Beziehung für den Dampfvolumenteil α_3 im Abzweig in Abhängigkeit von den Zustromgrößen x_1 , ρ_1 , ρ_g an.

Ziel ist die Berechnung derjenigen Teilchenbahn für jede Phase, unterhalb der das jeweilige Fluid in den Abzweig umgelenkt wird.

McCreery betrachtet zunächst die ebene Strömung und geht von den zweidimensionalen stationären Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls für jede Phase aus. Diese Beziehungen werden weitgehend vereinfacht und die Impulsgleichungen reduzieren sich zu

$$(1-\alpha)\rho_1 \cdot u_1 \frac{du_1}{dz} = (1-\alpha) \frac{dp}{dz} + \alpha F_d \quad (10.36)$$

$$\alpha \cdot \rho_g \cdot u_g \frac{du_g}{dz} = \alpha \frac{dp}{dz} - \alpha \cdot F_d \quad (10.37)$$

mit F_d als Widerstandskraft für die Zwischenphasenreibung.

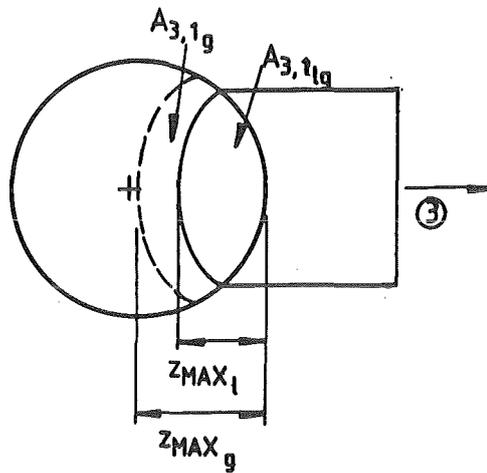
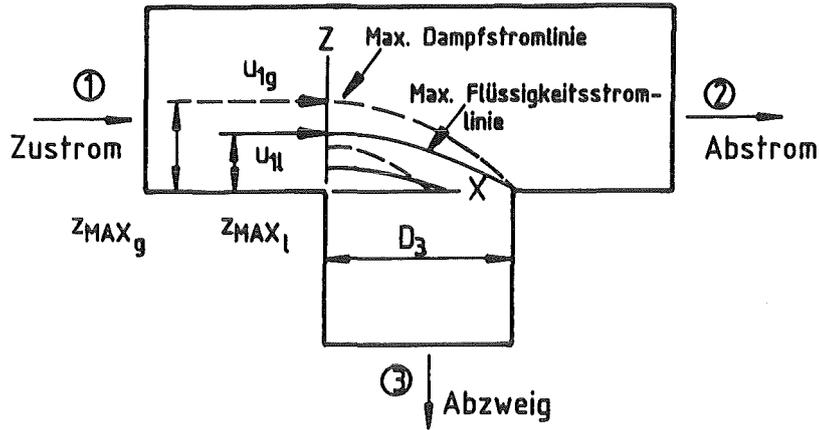


Abb. 76 Strömungsgeometrie und T-Stück von McCreedy /35/

Diese Gleichungen in Verbindung mit einem geeigneten Ansatz für die Zwischenphasenreibung ergeben jedoch keine befriedigenden Ergebnisse. Deshalb wird in einer heuristischen Vorgehensweise der Reibungseinfluß nicht im Term F_d berücksichtigt sondern durch sogenannte modifizierte Dichten ρ_g^* und ρ_l^* anstelle der Dichten ρ_g und ρ_l . Folgende Ausdrücke wurden für die modifizierten Dichten gewählt:

$$\rho_g^* = \rho_g + (1 - \alpha_{1h})^\eta \cdot (\rho_l - \rho_g) \quad (10.38)$$

$$\rho_l^* = \rho_l - \alpha_{1h}^\eta (\rho_l - \rho_g) \quad (10.39)$$

wobei aus den experimentellen Ergebnissen von Honan und Lahey /23/ und Reimann, Seeger und John /62/ folgende Beziehungen für η gewonnen wurden:

$$\eta = 1,15 \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right)^{0,096} \quad \text{für} \quad \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} \geq \frac{30}{70} \quad (10.40)$$

und

$$\eta = 1,0 + \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3}\right) \cdot 0,14038 \quad \text{für} \quad \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} < \frac{30}{70} \quad (10.41)$$

Die Integration der Gln. (10.36) und (10.37) ergibt dann

$$z_g = \frac{-1}{2\rho_g^*} \frac{dp}{dz} t^2 + z_{\max g} \quad (10.42)$$

$$z_1 = \frac{-1}{2\rho_1^*} \frac{dp}{dz} t^2 + z_{\max 1} \quad (10.43)$$

Diese Gleichungen gehen über in die Bewegungsgleichungen im Schwerfeld bei waagerechter Anfangsgeschwindigkeit, falls die Druckkraft durch die Schwerkraft ersetzt wird. Es ergibt sich folgender Ausdruck für das Verhältnis

$z_{\max g}/z_{\max 1}$

$$\frac{z_{\max g}}{z_{\max 1}} = \frac{\rho_1^*}{\rho_g^*} \left(\frac{t_{\max g}}{t_{\max 1}}\right)^2 \quad (10.45)$$

wobei t_{\max} die Zeit ist, die ein Teilchen benötigt, um von $x = 0$ bis $x = D_3$ zu gelangen. Bei homogener Strömung, d.h. $u_{11} = u_{g1}$ ist $t_{\max g} = t_{\max 1}$.

Benötigt wird nun eine Beziehung zwischen dem Verhältnis $z_{\max g}/z_{\max 1}$ und dem entsprechenden Flächenverhältnis α^* .

Nimmt man eine Beziehung der Form $\alpha^* = \left(\frac{z_{\max g}}{z_{\max 1}}\right)^n$ an, so gilt für ebene Strömung $n = 1$; für einen kreisförmigen Querschnitt $n = 2$. Die beste Übereinstimmung in der endgültigen Korrelation wurde mit dem Wert $n = 1,5$ erzielt.

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung für das Gemisch und der Annahme homogener Strömung ergibt sich schließlich

$$\alpha_{3h} = 1 - \alpha^*(1 - \alpha_{1h}) \quad (10.46)$$

mit

$$\alpha_{1h} = \left(1 + \frac{1-x_1}{x_1} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_1}\right)^{-1}$$

unter Verwendung der Gln. (10.45), (10.39), (10.40) und (10.41).

Autoren	Jahr	Zustrom ϕ [mm]	Abzweig ϕ [mm]	Abstrom [mm]	\leftarrow Zustrom-Abzweig	A_1/A_3	Strömungsform	Ausbildung der Verzweigung	Medium	L/D (Zustrom - 1. Abzweig)	Abzweiganordnung	Re-Zustrom
Kinne [13]	1926	43 43 43 43	25 15 25 43	43 43 43 43	45 60,120 60,120 60,120	2,96 8,22 2,96 1,0		r=2,5mm scharf, r=1,5 } scharf, r=2,5 } kegelig scharf, r=4,3, r=8,5	Wasser	46,5	waagrecht	
Vogel [10]	1926	43 43 43	15 25 43	43 43 43	90 90 90	8,22 2,96 1,0		scharf, r=1,5 scharf, r=2,5 scharf, r=2,55	Wasser	46,5	waagrecht	$4 \times 10^3 \dots 9 \times 10^4$
Petermann [14]	1929	43 43 43	15 25 43	43 43 43	45 45 45	8,22 2,96 1,0		scharf, r=1,5 konisch scharf, r=2,5 konisch scharf, r=4,25 r=8,5	Wasser	46,5	waagrecht	
Naramoto, Kasai [15]	1931	25 30 30 30 30 30 30	25 15 17,32 20 24,5 30 20	25 30 30 30 30 36	90,75,60,45,30 90,85,80,75,70,60,45,30,15 90,60 90,75,6,45,30,15 90 90 90	1,0 4,0 3,0 2,25 1,5 1,0 2,25			Wasser	$29 \leftarrow L/D \leftarrow 34,8$	waagrecht	$3 \times 10^3 \dots 10^5$
Stack [17]	1931	51,5	51,5	51,5	90	1,0		grobe Schweifnähte	Luft	42,8	waagrecht	$2,5 \times 10^5$
Hoopes [16]	1948	25,4 25,4	25,4 25,4	25,4 25,4	90 90	1,0 1,0		nicht definiert	Wasser Wasser, Öl	121,7 121,2	waagrecht	$2,9 \times 10^3 \dots 4,1 \times 10^3$
McNown [18]	1954	52,32	52,32 25,4 12,7	52,32	90	1,0 4,0 16,0		scharfkantig	Wasser	75...100	waagrecht	
Gardel [11]	1957	150 150 150 150	150 100 60 150	150 150 150	90 90 90 45,60...120,135	1,0 2,25 6,25 1,0		1,5...6 12...18 18	Wasser		waagrecht	$Re_{max} = 4 \times 10^5$
Blaisdell	1963	50,8 50,8 50,8 50,8 50,8	50,8 34,8 25,4 19,0 12,7	50,8 50,8 50,8 50,8	15,30...150,165	1,0 2,12 4,0 7,11 16,0		scharfkantig	Wasser	125	waagrecht	$3 \times 10^4 \dots 25 \times 10^4$
Zeisser [19]	1963	26 26 26 26 26 26	4,83 10,8 13,9 4,83 10,8 13,9	26 26 26 26 26	90 90 90 90 90	29 5,8 3,5 29 5,8 3,5		scharf scharf, 1,6...9,5 scharf scharf scharf, 1,6...9,5 scharf	Wasser Wasser	48,85 48,85	waagrecht waagrecht	$14 \times 10^3 \dots 173 \times 10^3$ $2,58 \times 10^3 \dots 173 \times 10^3$
Colin	1969	150 80 50	150 80 50	150 80 50	90	1,0 1,0 1,0			Wasser		waagrecht	kleine Re-Zahlen 6×10^3
Gardel [12]	1970	150	150 125 100		45,60...120,135	1,0 1,44 2,25		r=0, 15, 30	Wasser	29	waagrecht	
Müller, Stratmann [21]	1970	82...200	82	141	35,45,55,65	1,2,3,4,5,6		r < 0, 1 = D _{Abzweig}	Luft	10...20	waagrecht	$3,5 \times 10^3 \dots 3,6 \times 10^5$
Ito [22]	1973	34,97 34,99 35,00 34,94	34,97 34,99 35,00 34,94	34,97 34,99 35,00 34,94	90 90 90 90	1,0 1,0 1,0 1,0		r=0 r=3,17 r=6,59 r=17,55	Wasser	74 74 74 74	waagrecht	$10^5, 2 \times 10^5$

Tabelle 1: Literaturübersicht über einphasig durchströmte Abzweigungen

Autoren	Jahr	Geometrie				Strömungsparameter				Messungen		
		Zustrom- richtung	Abzweig- richtung	D ₁ [mm]	D ₁ /D ₃	P [MPa]	G ₁ [kg/m ² s]	x ₁ [%]	Strömungsform	\dot{m}_3/\dot{m}_1	x ₃ /x ₁	ΔP_T
Tsuyama, Taga	[37] 1959	horizontal	horizontal	23,4	1,0		50...1000	0,1...12	Blasenströmung	0,05...0,9	ja	ja
Hewitt, Shires	[38] 1964	vertikal	horizontal	50,8	1,0	0,3	760...2290	< 3%	Blasenströmung Schaumströmung	0...1	ja	ja
Fouda, Rhodes	[39, 40] 1974	horizontal	vertikal	50,8	2,0		360...684	35...67	Ringströmung		ja	ja
Fouda	[41] 1975	vertikal	horizontal	25,4	1,34		900...7000	0,012...39,4	Ringströmung		ja	ja
Collier	[26] 1976	horizontal	horizontal		1,52		135	2...50	Ringströmung	0,05...0,95	ja	nein
Honan, Lahey	[23, 24] 1978-1981	vertikal	horizontal andere	38,1	1,0	0,28...1,0	1350...2700	0,1...1	Blasenströmung Schaumströmung	0,3 0,5 0,7	ja	nein
Hong	[42] 1978	horizontal	variabel	9,525	1,0	0,15			Ringströmung Wellenströmung		ja	nein
Whalley, Azzopardi	[27] 1980	vertikal horizontal	horizontal variabel	31,8	2,5	0,15 0,25	83...178 145	37...80 56	Ringströmung	0,03...0,25 0,006...0,21 (0,4)	ja	nein
Azzopardi, Baker	[30] 1981	vertikal	horizontal	31,8	2,5	0,15	86...110	9...29	Schaumströmung	0,06...0,92	ja	nein
Henry	[33] 1981	horizontal	horizontal	100	5,0	0,1	200...850	5...50	Ringströmung	0,07...0,525	ja	nein
Whalley, Fells	[29] 1981	vertikal	horizontal	31,8		0,15	83...178	37...80	Ringströmung	0,02...0,13	ja	nein
Saba, Lahey	[34] 1982	horizontal	horizontal	38,1	1,0	0,4...0,7	1350...2700	0,1...1	Schwallströmung	0,3 0,5 0,7	ja	ja
Zetzmann	[25] 1982	vertikal	horizontal andere	24...100	1,0 2,0	<0,3	500...2900	0,06...10	Blasenströmung Schaumströmung	0,1...0,3 (0,05...0,9)	ja	(nein)
Azzopardi, Freemann-Bell	[32] 1983	vertikal	horizontal	31,8	1,0 1,25	0,15	82...176	35...81	Ringströmung	0,125...0,5	ja	nein
Katsaounis	[36] 1983	horizontal horizontal	vertikal horizontal	98, 205	1,96...3,5		200...6000 100...1600	0...0,16	Schwallströmung Propfenströmung	0,1...0,7	ja	ja
Reimann, Khan	[46] 1983	horizontal	vertikal	206	34,3 17,2 10,3	0,5	6...340	< 62	Schichten- strömung	0...1	ja	ja
Reimann, Smoglie	[47, 48] 1983	horizontal	variabel	206	34,3 17,2 10,3	0,5	6...180	1,5...35	Schichten- strömung	0...1	ja	ja
Seeger	1984	horizontal	variabel	50	1	0,5...1,0	500...7000	0,1...26	Blasenströmung Schwallströmung Ringströmung	0...1	ja	ja

Tabelle 2: Literaturübersicht über zweiphasig durchströmte Abzweigungen

Run	G_1 [kg/m ² s]	G_3	v_{sl_1}	v_{sg_1}	T_1 [K]	p_1 [MPa]	x_3 [%]	$\Delta p_{1-3, \text{gem.}}$ [10 ² Pa]
a) 1.0	1067.9	1067.9	1.0	5.8	290.0	0.7	4.3	-51.36
2.0	562.6	562.6	0.5	6.0	291.0	0.6	8.1	-16.76
3.0	599.3	599.3	0.5	10.1	292.0	0.6	12.9	-56.80
4.0	631.0	631.0	0.5	13.1	292.5	0.6	15.8	-63.63
5.0	825.5	825.5	0.8	9.6	293.0	0.7	9.2	-68.49
6.0	806.7	806.7	0.8	7.0	293.0	0.7	6.8	-49.70
7.0	1157.9	1157.9	1.0	21.0	293.0	0.6	13.8	-244.57
8.0	1114.4	1114.4	1.0	15.0	293.0	0.6	10.4	-151.81
15.2	4602.2	4602.2	4.6	4.9	294.0	0.8	1.1	-365.69
15.7	3707.8	3707.8	3.7	4.3	288.0	0.6	0.8	-265.35
16.2	2164.8	2164.8	2.1	9.2	294.5	0.8	4.0	-240.61
16.5	2714.1	2714.1	2.6	19.2	291.0	0.7	5.7	-569.17
17.0	1096.9	1096.9	1.0	10.2	291.0	0.7	7.7	-102.98
17.1	793.0	793.0	0.7	5.0	291.0	0.8	6.3	-36.55
17.2	787.7	787.7	0.7	4.8	291.0	0.9	6.2	-38.33
18.1	2076.9	2076.9	2.0	10.2	295.0	0.7	3.9	-238.11
20.5	2756.9	2756.9	2.7	10.1	290.0	0.6	2.7	-358.65
25.1	2046.5	2046.5	2.0	4.9	289.0	0.7	2.1	-128.24
29.2	4055.5	4055.5	4.0	4.0	292.0	0.7	0.8	-276.56
30.3	2192.0	2192.0	2.0	20.8	296.0	0.7	8.1	-472.72
31.2	1083.9	1083.9	1.0	10.1	291.0	0.7	7.7	-81.91
36.4	2187.8	2187.8	2.0	16.6	290.0	0.9	7.9	-423.12
36.7	4155.9	4155.9	4.1	10.3	291.0	0.8	2.4	-687.54
b) 53.0	3923.8	3923.8	3.9	4.3	296.0	0.6	0.7	-272.00
64.0	2009.6	2009.6	2.0	5.1	307.0	0.6	1.7	-131.21
73.0	2093.1	2093.1	2.0	9.6	299.0	0.6	3.3	-236.64
83.0	2132.3	2132.3	2.0	19.7	294.0	0.6	6.4	-455.00

a) Abzweig waagrecht

b) Abzweig nach unten

Tab. 3 Versuchsergebnisse für $G_3/G_1 = 1,0$;

Luft-Wasser Strömung

Run	G_1 [kg/m ² s]	G_3	v_{sl1} [m/s]	v_{sg1}	T_1 [K]	p_1 [MPa]	x_3 [%]	$\Delta p_{1-3, \text{gem.}}$ [10 ² Pa]
2.0	4041.3	4041.3	4.0	4.1	291.0	0.6	0.7	-225.65
8.0	4049.9	4049.9	4.0	3.8	288.0	0.8	0.8	-197.58
37.0	4001.7	4001.7	4.0	4.3	300.0	0.6	0.7	-221.84
38.0	2027.8	2027.8	2.0	5.1	289.0	0.6	1.8	-75.06
204.0	5001.1	5001.1	5.0	5.3	287.0	0.6	0.7	-374.37
205.0	4115.1	4115.1	4.1	5.2	287.0	0.6	0.9	-269.28
206.0	3042.6	3042.6	3.0	5.1	287.0	0.6	1.2	-185.43
207.0	2589.7	2589.7	2.6	5.1	287.0	0.6	1.4	-144.73
208.0	1432.6	1432.6	1.4	5.1	287.0	0.6	2.5	-41.28
209.0	4069.3	4069.3	4.0	10.8	287.0	0.6	1.8	-399.48
210.0	2065.7	2065.7	2.0	9.9	286.0	0.6	3.4	-185.90
211.0	1067.5	1067.5	1.0	10.3	286.0	0.6	6.8	-43.41
215.0	1564.5	1564.5	1.5	10.1	294.0	0.6	4.5	-114.43
216.0	1583.7	1583.7	1.4	20.0	295.0	0.6	8.6	-328.19
217.0	1107.7	1107.7	1.0	20.9	305.0	0.6	12.6	-194.47
218.0	2118.9	2118.9	2.0	19.4	296.0	0.6	6.3	-456.73
223.0	1909.3	1909.3	1.9	4.8	289.0	0.6	1.8	-81.85
246.0	283.7	283.7	0.3	5.1	299.0	0.6	12.4	-6.17
247.0	262.6	262.6	0.3	1.8	299.0	0.6	4.7	-4.05
248.0	577.1	577.1	0.5	10.1	299.0	0.6	11.9	-37.11
249.0	541.1	541.1	0.5	5.1	299.0	0.6	6.5	-10.34
250.0	727.9	727.9	0.7	5.0	299.0	0.6	4.7	-16.26

Tab. 4 Versuchsergebnisse für $G_3/G_1 = 1,0$;
Luft-Wasser Strömung; Abzweig nach oben

Run	G_1 [kg/m ² s]	G_3	v_{sl_1} [m/s]	v_{sg_1}	T_1 [K]	p_1 [MPa]	x_3 [%]	$\Delta p_{1-3, \text{gem.}}$ [10 ² Pa]
79.0	791.4	791.4	0.6	47.3	452.0	1.0	30.5	-431.62
80.0	665.1	665.1	0.6	27.8	458.0	1.1	23.5	-197.19
81.0	398.8	398.8	0.3	19.0	453.0	1.0	24.1	-70.11
82.0	291.8	291.8	0.3	9.3	457.0	1.1	17.7	-23.22
24.0	1115.4	1115.4	1.0	36.7	471.0	1.5	24.8	-456.42
50.1	588.7	588.7	0.5	16.7	470.5	1.5	21.3	-67.76
51.1	430.4	430.4	0.4	11.3	471.0	1.5	19.8	-36.51
61.0	447.1	447.1	0.4	14.2	467.0	1.3	21.6	-49.21
3.1	1137.8	1137.8	1.2	11.6	495.0	2.4	12.4	-117.44
76.0	657.5	657.5	0.6	9.8	500.0	2.6	19.3	-63.74
78.0	447.2	447.2	0.4	6.1	497.0	2.5	16.9	-22.65
109.0	855.1	855.1	0.6	31.6	498.0	2.5	46.1	-357.79
110.0	677.9	677.9	0.6	17.0	499.0	2.6	32.1	-132.77
111.0	485.4	485.4	0.3	16.9	499.0	2.6	44.8	-110.65
112.0	392.7	392.7	0.3	8.2	499.0	2.6	26.8	-29.67
113.0	365.7	365.7	0.3	11.9	500.0	2.6	42.3	-50.08
114.0	509.8	509.8	0.4	11.1	501.0	2.7	29.3	-60.29
116.0	850.0	850.0	0.8	11.7	501.0	2.7	18.1	-114.18
117.0	932.5	932.5	0.7	26.9	498.0	2.5	36.0	-330.54
118.0	1128.1	1128.1	1.0	25.2	501.0	2.7	29.5	-366.69
119.0	974.3	974.3	1.0	13.3	502.0	2.8	18.7	-151.65
145.0	612.6	612.6	0.5	13.3	498.0	2.5	27.3	-89.64
146.0	675.3	675.3	0.6	17.1	497.0	2.5	31.4	-136.79
147.0	742.6	742.6	0.6	21.4	498.0	2.5	36.1	-208.34
148.0	832.0	832.0	0.6	27.8	498.0	2.5	42.5	-310.50
149.0	1133.0	1133.0	1.0	26.8	498.0	2.5	29.7	-417.73
150.0	1069.7	1069.7	1.0	21.6	498.0	2.5	25.4	-304.76
151.0	965.5	965.5	0.9	13.6	498.0	2.5	17.8	-152.81
152.0	850.0	850.0	0.8	12.5	501.0	2.7	19.5	-118.47
153.0	964.6	964.6	0.8	21.6	498.0	2.5	28.1	-270.33
154.0	513.4	513.4	0.3	23.5	498.0	2.5	57.5	-177.39
14.0	958.5	958.5	1.0	9.2	507.0	3.0	14.2	-83.57

Tab. 5 a Versuchsergebnisse für $G_3/G_1 = 1,0$;
Dampf-Wasser Strömung; Abzweig waagrecht

Run	G_1 [kg/m ² s]	G_3	v_{sl_1} [m/s]	v_{sg_1}	T_1 [K]	P_1 [MPa]	x_3 [%]	$\Delta P_{1-3, gem.}$ [10 ² Pa]
47.1	1694.9	1694.9	1.9	9.1	502.6	2.8	7.5	-179.20
48.1	1648.6	1648.6	1.8	14.3	506.0	3.0	13.1	-258.33
49.1	617.8	617.8	0.7	5.4	511.3	3.3	14.2	-28.58
77.0	546.0	546.0	0.6	6.3	504.0	2.8	16.2	-31.80
115.0	393.2	393.2	0.2	14.5	509.0	3.1	57.3	-64.90
23.0	1128.6	1128.6	1.2	7.6	524.0	4.0	13.5	-92.98
20.0	1676.1	1676.1	1.9	7.3	542.0	5.3	11.8	-153.55
45.0	1079.2	1079.2	1.2	4.6	537.0	5.0	10.8	-60.89
53.1	564.8	564.8	0.7	0.9	537.0	5.0	4.0	-9.10
70.0	724.9	724.9	0.9	1.7	537.0	5.0	5.8	-15.74
29.0	1145.9	1145.9	1.4	1.9	550.0	6.1	5.1	-31.20

Tab. 5 b

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	p_1 [MPa]	$\Delta p_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta p_{1-3,gem}$
		[%]			[kg/s]							[10 ² Pa]	
15.1	3714.	0.87	0.23	1.57	0.06374	0.00892	0.05482	0.47876	1.79634	289.	0.6	132.40	-84.87
15.1	4753.	1.04	0.39	1.69	0.09664	0.01831	0.07833	0.49652	1.63240	289.	0.8	213.97	-131.02
26.2	4022.	0.84	0.35	1.35	0.06655	0.01405	0.05250	0.49243	1.60203	293.	0.7	146.34	-95.24
29.1	4018.	0.83	0.48	2.00	0.06576	0.02910	0.03667	0.23247	2.39840	292.	0.7	116.65	-37.35
56.1	4046.	0.84	0.40	1.28	0.06640	0.01592	0.05048	0.49630	1.53171	297.	0.7	167.75	-115.01
24.1	2006.	2.02	0.70	3.51	0.07935	0.01482	0.06453	0.46742	1.73977	292.	0.7	52.07	-46.67
24.6	1981.	1.98	1.20	5.29	0.07760	0.03768	0.03992	0.19292	2.66649	296.	0.7	34.77	-16.34
24.9	1983.	2.06	0.20	2.33	0.08023	0.00098	0.07925	0.87308	1.13132	296.	0.7	65.27	-113.42
44.0	2067.	2.03	0.41	4.41	0.08199	0.00996	0.07203	0.40358	2.17684	296.	0.7	66.52	-51.50
18.1	2146.	4.07	3.34	7.76	0.17143	0.11740	0.05403	0.16520	1.90781	295.	0.7	29.71	-23.47
19.0	2267.	3.81	0.64	4.76	0.16988	0.00657	0.16331	0.76996	1.24854	289.	0.6	125.37	-213.75
19.1	2091.	3.95	0.83	5.58	0.16216	0.01174	0.15042	0.65609	1.41384	289.	0.7	105.55	-145.08
38.1	2082.	3.91	3.76	4.94	0.15982	0.13432	0.02550	0.12619	1.26443	296.	0.7	45.52	-29.23
39.1	2056.	3.97	2.16	9.83	0.16028	0.06656	0.09373	0.23594	2.47838	293.	0.7	54.74	-43.15
39.5	2059.	3.94	0.85	7.79	0.15944	0.01897	0.14047	0.44582	1.97619	296.	0.7	102.13	-99.13
100.1	2155.	4.05	1.32	7.88	0.17147	0.03246	0.13901	0.41672	1.94548	295.	0.7	111.00	-68.88
100.4	2128.	4.06	2.18	8.33	0.16995	0.06326	0.10669	0.30628	2.04963	296.	0.7	87.01	-53.75
101.1	1129.	7.65	1.40	14.59	0.16970	0.01635	0.15335	0.47402	1.90641	293.	0.7	32.62	-46.55
101.2	1128.	7.56	1.81	15.48	0.16768	0.02328	0.14441	0.42072	2.04694	295.	0.7	28.63	-28.69
101.1	1120.	7.78	5.37	14.68	0.17128	0.08735	0.08392	0.25965	1.88710	297.	0.7	19.05	-17.41
101.6	1120.	7.75	6.59	11.73	0.17061	0.11187	0.05873	0.22752	1.51305	297.	0.7	12.09	-7.01
32.1	1110.	7.50	3.17	17.09	0.16373	0.04756	0.11617	0.31153	2.27760	290.	0.7	15.41	-22.53
33.1	1076.	7.65	0.60	11.96	0.16170	0.00485	0.15685	0.62033	1.56373	290.	0.7	31.28	-55.70
69.0	1091.	7.26	4.71	16.28	0.15550	0.07863	0.07688	0.22041	2.24301	300.	0.7	9.91	-17.93
33.5	1183.	14.23	1.80	21.91	0.33084	0.01593	0.31491	0.61802	1.54018	292.	0.7	67.63	-137.92
11.1	1175.	15.12	6.34	25.31	0.34928	0.07829	0.27099	0.46334	1.67447	287.	0.7	45.29	-77.00
12.1	1204.	14.64	7.52	25.61	0.34656	0.10752	0.23904	0.39431	1.74928	290.	0.7	49.61	-64.22
102.1	1215.	14.41	2.97	21.39	0.34376	0.02687	0.31689	0.62132	1.48368	295.	0.7	85.17	-148.33
34.1	1230.	13.98	1.59	18.11	0.33735	0.00967	0.32768	0.74956	1.29589	292.	0.7	61.76	-189.14
34.1	1204.	14.25	9.87	25.75	0.33743	0.16873	0.16870	0.27673	1.80663	295.	0.7	43.84	-41.08
79.0	1182.	14.67	3.32	19.42	0.34083	0.23994	0.10090	0.22357	1.32410	305.	0.7	29.66	-45.78
80.0	1197.	14.41	2.68	19.31	0.33921	0.21898	0.12023	0.26454	1.33982	305.	0.7	33.11	-47.16

Tab. 6 a Versuchsergebnisse für $0 < G_3/G_1 < 1,0$;
Luft-Wasser Strömung; Abzweig waagrecht

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g} [kg/s]	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3,gem}$
90.0	2256.	6.80	1.60	9.11	0.30187	0.02175	0.28012	0.69258	1.33985	301.	0.7	172.25	-287.88
90.6	2259.	6.51	4.74	10.93	0.28945	0.14984	0.13961	0.28753	1.67747	296.	0.8	83.63	-52.99
40.4	2212.	8.24	4.43	15.35	0.35838	0.12506	0.23333	0.34921	1.86434	298.	0.8	103.90	-125.60
40.1	2188.	8.03	2.09	13.71	0.34533	0.04374	0.30159	0.51127	1.70816	298.	0.8	116.55	-177.33
41.1	2178.	8.39	7.18	12.40	0.35932	0.23547	0.12386	0.23324	1.47783	296.	0.8	54.32	-43.12
35.1	2159.	8.08	5.53	13.79	0.34301	0.16152	0.18149	0.31008	1.70641	292.	0.9	83.38	-75.44
35.4	2213.	7.86	1.58	11.31	0.34206	0.02425	0.31781	0.64556	1.43921	293.	0.9	153.72	-254.64
35.7	2249.	7.82	2.84	14.85	0.34581	0.07335	0.27246	0.41503	1.89836	294.	0.9	130.87	-147.18
90.3	2245.	6.82	6.88	6.70	0.30119	0.21796	0.08323	0.28131	0.98236	301.	0.7	90.35	-55.87
37.3	4383.	2.34	0.21	3.55	0.20192	0.00643	0.19549	0.63942	1.51413	292.	0.8	307.10	-355.82
37.6	4476.	2.43	0.59	3.89	0.21364	0.02282	0.19081	0.55725	1.60281	292.	0.8	318.60	-261.55
89.4	4497.	2.14	0.60	2.59	0.18872	0.01197	0.17675	0.77650	1.20615	301.	0.8	317.20	-399.83
88.4	3995.	1.80	0.43	3.80	0.13965	0.02042	0.11922	0.40410	2.11273	306.	0.6	284.96	-134.08
89.1	4474.	2.11	0.55	2.41	0.18565	0.00773	0.17791	0.83725	1.14463	301.	0.8	318.51	-440.09
88.1	4025.	1.87	1.14	3.90	0.14805	0.06646	0.08159	0.26442	2.08420	303.	0.6	222.24	-64.37
167.0	1486.	4.17	3.19	9.64	0.12173	0.07874	0.04299	0.15265	2.31330	288.	0.7	20.99	-4.94
169.0	1574.	3.98	2.23	10.49	0.12328	0.05426	0.06902	0.21233	2.63681	288.	0.7	22.30	-15.46
170.0	1599.	3.93	1.47	11.01	0.12329	0.03433	0.08896	0.25748	2.80222	288.	0.7	30.05	-22.11
171.0	1562.	4.10	1.35	6.09	0.12545	0.01742	0.10804	0.57939	1.48634	293.	0.7	57.18	-65.06
174.0	1600.	6.88	5.21	13.21	0.21699	0.12901	0.08798	0.21121	1.91973	288.	0.6	25.70	-20.79
175.0	1572.	6.96	3.61	14.48	0.21512	0.07712	0.13801	0.30816	2.08179	289.	0.6	39.87	-46.78
176.0	1563.	6.96	2.72	11.08	0.21396	0.04100	0.17296	0.50812	1.59089	289.	0.6	68.12	-65.45
177.0	1575.	6.85	1.08	8.90	0.21175	0.00875	0.20301	0.73832	1.29848	293.	0.6	84.05	-151.31
178.0	2027.	3.99	1.54	7.63	0.15875	0.03667	0.12208	0.40242	1.91099	296.	0.9	70.17	-48.40
179.0	2063.	3.97	2.57	8.91	0.16113	0.08112	0.08000	0.22134	2.24333	297.	0.9	45.55	-20.66
180.0	2036.	3.96	3.25	8.39	0.15807	0.11210	0.04598	0.13718	2.12040	298.	0.9	27.57	-10.18
181.2	1097.	7.36	5.30	16.22	0.15854	0.09252	0.06602	0.18885	2.20505	299.	0.8	12.17	-4.99
182.0	1143.	7.05	2.39	15.13	0.15890	0.03392	0.12498	0.36655	2.14576	299.	0.8	13.50	-17.51
183.0	1577.	5.00	2.94	15.11	0.15459	0.07555	0.07904	0.16923	3.02123	300.	0.8	23.05	-14.79
184.0	1083.	6.49	3.77	14.04	0.13866	0.05864	0.08003	0.26693	2.16215	290.	0.4	16.49	-18.67
185.0	1083.	6.49	4.17	13.61	0.13870	0.06670	0.07199	0.24771	2.09549	288.	0.4	14.92	-16.39
188.0	1264.	4.08	3.77	24.42	0.34979	0.04675	0.30304	0.49965	1.73387	291.	1.0	38.36	-69.03
189.1	1252.	4.18	5.97	25.66	0.34930	0.08524	0.26406	0.41772	1.80973	292.	1.0	32.96	-56.01

Tab. 6 b

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	p_1 [MPa]	$\Delta p_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta p_{1-3,gem}$ [10 ² Pa]
		[%]			[kg/s]								
190.1	1211.	14.37	11.04	16.78	0.34154	0.11048	0.23106	0.57919	1.16805	294.	1.0	37.18	-39.59
94.5	1465.	26.35	15.15	35.45	0.76340	0.19103	0.57237	0.55729	1.34537	299.	0.8	168.48	-312.81
94.1	1460.	26.74	17.55	41.53	0.77164	0.30634	0.46529	0.38823	1.55319	297.	0.8	156.36	-168.48
91.1	2114.	12.52	5.43	20.33	0.52148	0.11763	0.40385	0.47699	1.62359	296.	0.8	148.36	-274.32
92.1	2109.	12.32	9.53	18.18	0.51176	0.26570	0.24606	0.32590	1.47531	299.	0.8	98.41	-86.40
93.1	2122.	12.07	10.19	16.70	0.50450	0.29949	0.20501	0.29375	1.38331	299.	0.8	83.80	-59.27
98.8	7287.	0.26	0.22	0.28	0.03759	0.00843	0.02916	0.72795	1.06574	295.	0.7	304.50	-263.00
99.1	7439.	0.23	0.11	0.31	0.03401	0.00584	0.02817	0.62198	1.33160	294.	0.7	481.00	-168.70
99.4	7534.	0.23	0.25	0.22	0.03392	0.01117	0.02275	0.69886	0.95979	294.	0.7	323.00	-224.00
87.1	4083.	2.86	1.47	5.92	0.22995	0.08074	0.14922	0.31377	2.06804	303.	0.6	362.95	-172.81
23.3	2011.	0.49	0.01	1.20	0.01934	0.00034	0.01900	0.40078	2.45127	292.	0.7	24.37	-12.13
20.9	2749.	2.68	0.75	4.75	0.14501	0.02093	0.12407	0.48359	1.76932	293.	0.6	148.21	-105.90

Tab. 6 c

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3,gem}$
		[%]			[kg/s]								
57.0	4126.	0.93	0.97	0.79	0.07499	0.06005	0.01494	0.23340	0.85347	301.	0.8	66.40	-20.34
58.0	4088.	0.93	0.84	1.12	0.07484	0.04517	0.02967	0.33016	1.20069	306.	0.8	102.35	-46.03
59.0	3953.	0.93	0.71	1.20	0.07251	0.02963	0.04288	0.46008	1.28523	309.	0.8	121.90	-75.60
60.0	3996.	0.93	0.88	0.96	0.07333	0.02261	0.05072	0.67342	1.02704	309.	0.8	132.60	-176.88
61.0	4142.	0.91	0.74	1.17	0.07427	0.03553	0.03874	0.40676	1.28228	298.	0.8	122.26	-63.71
62.0	4117.	0.88	0.61	1.02	0.07119	0.01651	0.05468	0.66369	1.15738	301.	0.8	142.40	-138.71
63.0	3957.	0.98	0.25	1.13	0.07578	0.00340	0.07238	0.82445	1.15843	303.	0.8	124.73	-196.92
115.0	2016.	2.04	1.82	2.23	0.08090	0.03282	0.04808	0.54489	1.09077	295.	0.7	32.87	-58.87
68.0	2050.	1.76	2.03	1.15	0.07081	0.05674	0.01407	0.30395	0.65371	301.	0.6	23.24	-26.25
69.0	2075.	1.74	1.96	1.50	0.07086	0.04127	0.02959	0.48309	0.86448	303.	0.6	31.15	-39.21
70.0	2069.	1.73	2.00	1.37	0.07015	0.04612	0.02403	0.43168	0.79359	303.	0.6	23.61	-31.93
71.0	2062.	1.72	1.87	1.59	0.06967	0.03492	0.03474	0.54040	0.92287	307.	0.6	24.68	-45.49
72.1	2075.	1.70	1.15	1.92	0.06939	0.01306	0.05633	0.71860	1.12959	309.	0.6	36.00	-94.36
184.0	2089.	2.78	3.19	1.25	0.11436	0.10368	0.01068	0.20807	0.44900	294.	1.0	16.64	-15.13
185.0	2070.	2.74	3.34	2.02	0.11125	0.07376	0.03749	0.45649	0.73823	294.	1.0	24.45	-38.58
186.0	2126.	2.70	2.51	2.85	0.11299	0.04468	0.06831	0.57275	1.05553	294.	1.0	40.20	-68.83
198.0	2062.	1.43	1.71	0.47	0.05803	0.05379	0.00423	0.22240	0.32816	294.	0.5	15.98	-21.57
199.0	2028.	1.48	1.69	1.01	0.05889	0.04645	0.01244	0.30998	0.68155	294.	0.5	21.17	-26.81
200.0	2056.	1.46	1.68	1.07	0.05869	0.04260	0.01609	0.37287	0.73522	291.	0.5	21.59	-30.72
201.0	2341.	1.39	1.33	1.06	0.05670	0.03944	0.01725	0.39804	0.76452	293.	0.5	21.27	-38.07
202.0	2065.	1.18	0.68	1.49	0.04808	0.01034	0.03774	0.62374	1.25852	294.	0.5	28.06	-68.85
75.0	2093.	3.39	3.57	2.98	0.13938	0.10221	0.03717	0.30326	0.87942	299.	0.6	36.44	-31.76
76.0	2076.	3.36	3.77	2.08	0.13669	0.11571	0.02098	0.24773	0.61956	303.	0.6	23.12	-24.49
78.0	2098.	3.44	3.58	3.20	0.14146	0.09034	0.05113	0.38822	0.93094	289.	0.6	31.11	-45.69
79.0	2097.	3.39	1.47	4.73	0.13955	0.02495	0.11460	0.58898	1.39425	293.	0.6	57.04	-120.77
80.0	2087.	3.41	2.54	4.12	0.13949	0.04733	0.09216	0.54638	1.20919	294.	0.6	44.16	-91.86
81.1	2064.	3.41	1.09	4.74	0.13817	0.01617	0.12201	0.63501	1.39051	299.	0.6	58.77	-122.97
82.0	2061.	3.38	0.63	4.10	0.13694	0.00528	0.13166	0.79244	1.21324	302.	0.6	66.82	-198.97
123.0	2097.	5.69	6.22	3.70	0.23404	0.20173	0.03231	0.21249	0.64977	292.	1.0	24.89	-19.19
125.0	2162.	5.58	6.07	4.62	0.23738	0.17243	0.06495	0.33075	0.82724	293.	1.0	47.54	-36.85
126.0	2172.	5.58	5.26	6.09	0.23816	0.13619	0.10198	0.39207	1.09208	293.	1.0	59.38	-61.36
127.0	2215.	5.48	2.36	7.06	0.23829	0.03443	0.20386	0.66391	1.28859	293.	1.0	102.33	-159.12

Tab. 7 a Versuchsergebnisse für $0 < G_3/G_1 < 1,0$;
Luft-Wasser Strömung; Abweig nach unten

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	p_1 [MPa]	$\Delta p_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta p_{1-3,gem}$ [10 ² Pa]
96.0	1066.	6.75	11.72	3.69	0.14173	0.09415	0.04759	0.61430	0.54656	303.	0.7	8.99	-26.40
97.0	1100.	6.79	10.40	5.22	0.14686	0.06841	0.07845	0.69474	0.76889	297.	0.6	11.19	-44.09
98.0	1100.	6.71	7.97	6.44	0.14496	0.03083	0.11413	0.82000	0.96018	300.	0.6	11.11	-70.01
99.0	1099.	6.67	9.93	2.91	0.14418	0.11514	0.02904	0.46195	0.43605	301.	0.6	6.84	-20.42
187.0	1327.	9.19	11.51	3.88	0.23975	0.20917	0.03058	0.30215	0.42214	290.	1.0	15.40	-14.60
188.0	1299.	9.31	12.68	4.96	0.23705	0.18155	0.05550	0.43933	0.53293	292.	1.0	20.10	-25.95
189.0	1312.	9.48	13.05	6.06	0.24401	0.16416	0.07985	0.51201	0.63914	294.	1.0	25.17	-37.59
190.0	1236.	9.75	14.26	6.66	0.23694	0.14140	0.09554	0.59047	0.68288	294.	1.0	24.23	-46.46
228.0	1112.	10.62	16.09	5.11	0.23256	0.17733	0.05523	0.49353	0.48123	292.	1.0	16.93	-22.47
229.0	1142.	10.23	15.61	7.49	0.22976	0.11894	0.11083	0.65878	0.73220	293.	1.0	19.41	-55.41
230.0	1088.	5.44	8.55	3.09	0.11599	0.07834	0.03765	0.57146	0.56804	295.	0.5	10.85	-32.77
231.0	1048.	5.28	8.07	1.73	0.10913	0.09359	0.01554	0.43465	0.32763	289.	0.5	6.08	-21.62
102.0	1157.	13.02	18.95	6.35	0.29593	0.22822	0.06771	0.46913	0.48776	289.	0.7	21.89	-27.12
103.0	1167.	12.76	19.90	7.88	0.29216	0.18473	0.10742	0.59559	0.61736	292.	0.7	28.12	-47.65
104.0	1193.	12.57	13.99	12.22	0.29547	0.07230	0.22317	0.77681	0.97230	294.	0.7	40.08	-187.99
105.0	1193.	12.53	18.66	10.42	0.29447	0.11418	0.18029	0.73628	0.83155	295.	0.7	36.37	-166.59
106.0	1193.	12.57	18.34	9.23	0.29544	0.15936	0.13609	0.62715	0.73446	296.	0.7	35.89	-67.87
131.0	1183.	20.69	25.54	11.95	0.47999	0.38055	0.09944	0.35866	0.57763	292.	1.0	47.55	-17.25
132.0	1307.	17.97	13.11	19.79	0.46307	0.08809	0.37498	0.73518	1.10145	292.	1.0	90.57	-256.73
133.0	1270.	18.02	18.97	17.81	0.45167	0.12211	0.32956	0.73805	0.98861	289.	1.0	59.61	-156.93
134.0	1303.	17.60	22.88	11.29	0.45155	0.32127	0.13028	0.44975	0.64151	291.	1.0	48.96	-42.51
86.0	2125.	6.59	7.36	4.57	0.27498	0.22232	0.05265	0.27626	0.69314	298.	0.6	33.90	-35.35
87.0	2165.	6.59	4.84	7.96	0.28023	0.09010	0.19013	0.56147	1.20839	295.	0.6	85.50	-169.89
88.0	2196.	6.45	1.93	7.97	0.27795	0.02096	0.25699	0.74803	1.23604	296.	0.6	179.39	-350.61
89.0	2103.	6.67	6.67	6.69	0.27567	0.15827	0.11741	0.42471	1.00278	300.	0.6	59.45	-85.87
90.0	2100.	6.68	3.56	8.87	0.27597	0.06025	0.21572	0.58851	1.32823	300.	0.6	83.32	-195.05
192.0	2434.	10.58	10.94	9.54	0.50718	0.40187	0.10531	0.23025	0.90182	289.	1.0	80.80	-36.72
118.0	4216.	2.76	2.63	3.59	0.22866	0.18775	0.04091	0.13738	1.30218	292.	1.0	101.68	-20.46
119.0	4167.	2.78	2.51	4.11	0.22809	0.16947	0.05862	0.17403	1.47675	293.	1.0	130.31	-20.66
120.0	4086.	2.86	2.31	4.39	0.22975	0.13628	0.09346	0.26543	1.53266	295.	1.0	172.95	-71.70
121.0	4062.	2.92	2.09	4.45	0.23315	0.10755	0.12560	0.35347	1.52412	295.	1.0	218.42	-134.80
122.0	4314.	2.65	1.05	4.34	0.22519	0.04542	0.17977	0.48810	1.63552	295.	1.0	307.94	-263.75
91.0	3063.	2.48	1.46	3.82	0.14924	0.04965	0.09958	0.43290	1.54145	294.	0.6	140.49	-107.39

Tab. 7 b

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g} [kg/s]	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3,gem}$
92.0	3041.	2.55	1.41	3.62	0.15212	0.04071	0.11141	0.51584	1.41977	297.	0.6	158.59	-149.48
93.0	2993.	2.45	1.92	3.28	0.14393	0.06890	0.07503	0.38904	1.33990	298.	0.7	101.48	-81.90
94.0	2995.	2.59	2.35	3.29	0.15230	0.10339	0.04891	0.25247	1.27198	299.	0.6	74.32	-46.55
95.0	2980.	2.44	2.44	2.46	0.14295	0.11320	0.02974	0.20636	1.00831	302.	0.6	44.80	-33.18
193.0	3160.	3.88	3.49	5.19	0.24130	0.16639	0.07491	0.23235	1.33609	290.	1.0	105.31	-42.76
194.0	2092.	3.82	6.25	4.25	0.23224	0.18040	0.05184	0.20043	1.11366	293.	1.0	76.07	-27.70
195.0	3121.	3.75	3.78	3.59	0.23013	0.19858	0.03155	0.14309	0.95817	289.	1.0	26.77	-18.36
223.0	529.	5.67	5.60	5.68	0.05878	0.01521	0.04357	0.73935	1.00262	299.	0.5	3.26	-18.22
224.0	525.	5.57	6.57	5.18	0.05777	0.02094	0.03683	0.68590	0.92952	294.	0.5	5.90	-15.91
225.0	525.	5.58	9.91	2.55	0.05787	0.04250	0.01537	0.58128	0.45683	294.	0.5	3.83	-11.10
216.0	1054.	2.83	3.80	1.90	0.05875	0.03886	0.01989	0.50443	0.67109	293.	0.5	13.84	-17.30
217.0	1059.	2.83	3.76	2.15	0.05878	0.03285	0.02593	0.58116	0.75900	293.	0.5	12.30	-24.29
219.0	1042.	2.89	4.03	0.71	0.05937	0.05443	0.00494	0.33834	0.24588	291.	0.5	3.76	-10.26
220.0	1039.	2.93	3.71	2.35	0.05966	0.03191	0.02775	0.57984	0.80232	292.	0.5	8.90	-31.48
221.0	1047.	2.88	3.56	2.53	0.05919	0.02484	0.03435	0.66031	0.87883	292.	0.5	13.66	-36.31
222.0	1033.	2.89	2.28	3.06	0.05890	0.00925	0.04965	0.79694	1.05783	293.	0.5	8.36	-44.85
177.0	3036.	1.88	1.88	1.86	0.11196	0.08515	0.02681	0.24160	0.99103	294.	1.0	43.80	-19.65
178.0	3064.	1.83	1.81	1.91	0.11036	0.07966	0.03069	0.26683	1.04231	294.	1.0	52.22	-30.74
179.0	3109.	1.81	1.62	2.19	0.11033	0.06616	0.04417	0.33061	1.21089	295.	1.0	65.40	-42.56
180.0	3070.	1.87	1.65	2.35	0.11532	0.06260	0.05273	0.36398	1.25615	295.	1.0	74.42	-46.52
181.0	3271.	1.80	1.34	2.42	0.11564	0.04933	0.06631	0.42686	1.34333	291.	1.0	90.51	-85.80
182.0	3305.	1.80	0.97	2.59	0.11716	0.03033	0.08683	0.51585	1.43675	292.	1.0	113.88	-127.54
183.0	3007.	1.97	0.96	2.27	0.11622	0.01315	0.10307	0.76819	1.15450	293.	1.0	105.67	-213.89
203.0	3017.	0.98	0.75	1.22	0.05799	0.02291	0.03508	0.48485	1.24774	297.	0.5	98.23	-92.96
205.0	2974.	0.94	0.90	1.01	0.05498	0.03371	0.02127	0.36001	1.07454	298.	0.5	60.61	-46.11
206.0	3045.	0.93	0.91	0.97	0.05555	0.04009	0.01547	0.26630	1.04542	299.	0.5	30.36	-64.15
110.0	4001.	1.49	1.39	1.91	0.11733	0.08651	0.03082	0.20556	1.27788	294.	1.0	69.81	-30.70
111.0	3971.	1.51	1.45	1.78	0.11754	0.09364	0.02390	0.17235	1.17991	295.	1.0	60.51	-22.65
112.0	4090.	1.43	1.29	1.79	0.11509	0.07480	0.04029	0.27985	1.25100	291.	1.0	103.64	-34.10
113.0	3932.	1.54	1.38	1.88	0.11854	0.07253	0.04601	0.31723	1.22343	291.	1.0	104.43	-37.50
114.0	3944.	1.51	1.05	2.10	0.11682	0.04591	0.07091	0.43564	1.39340	293.	1.0	147.90	-117.32
139.0	1338.	25.12	21.11	29.02	0.66343	0.26377	0.39966	0.52154	1.15507	297.	0.7	158.84	-208.75
140.0	1336.	25.06	12.38	30.79	0.66117	0.09850	0.56267	0.69264	1.22866	297.	0.7	161.60	-182.00

Tab. 7 c

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3,gem}$ [10 ² Pa]
213.0	1017.	2.92	4.83	1.63	0.05829	0.03885	0.01944	0.59741	0.55827	291.	1.0	7.93	-15.46
214.0	983.	2.93	5.21	0.92	0.05679	0.04740	0.00939	0.52716	0.31366	291.	1.0	2.27	-12.51
215.0	1029.	2.85	2.46	2.95	0.05734	0.01148	0.04586	0.77148	1.03663	292.	1.0	5.45	-30.16
207.0	1969.	1.57	2.15	0.66	0.06041	0.05036	0.01005	0.39472	0.42149	292.	1.0	9.90	-17.50
208.0	1990.	1.56	2.06	0.53	0.06128	0.05465	0.00663	0.31940	0.33885	292.	1.0	7.41	-16.42
209.0	1991.	1.59	1.99	0.35	0.06235	0.05903	0.00331	0.24160	0.22000	293.	1.0	7.96	-7.93
210.0	2086.	1.42	1.88	1.10	0.05814	0.03159	0.02655	0.59008	0.77400	294.	1.0	16.08	-45.98
211.0	2283.	1.40	0.99	1.42	0.05570	0.01850	0.03720	0.65649	1.01737	294.	1.0	17.22	-57.22
207.0	1969.	1.57	2.15	0.66	0.06041	0.05036	0.01005	0.39472	0.42149	292.	1.0	9.90	-17.50
208.0	1990.	1.56	2.06	0.53	0.06128	0.05465	0.00663	0.31940	0.33885	292.	1.0	7.41	-16.42
209.0	1991.	1.59	1.99	0.35	0.06235	0.05903	0.00331	0.24160	0.22000	293.	1.0	7.96	-7.93
210.0	2086.	1.42	1.88	1.10	0.05814	0.03159	0.02655	0.59008	0.77400	294.	1.0	16.08	-45.98
211.0	2283.	1.40	0.99	1.42	0.05570	0.01850	0.03720	0.65649	1.01737	294.	1.0	17.22	-57.22
141.0	733.	32.31	21.44	35.28	0.46726	0.06222	0.40503	0.79392	1.09184	292.	1.0	44.00	-121.31
142.0	741.	31.41	27.81	32.56	0.45726	0.09758	0.35968	0.75889	1.03652	293.	1.0	42.82	-58.62
143.0	737.	31.40	39.84	27.00	0.45705	0.20587	0.25118	0.63919	0.85978	294.	1.0	44.36	-52.47
144.0	734.	31.86	44.14	17.26	0.45775	0.34317	0.11458	0.46212	0.54167	295.	1.0	31.92	-12.93

Tab. 7 d

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2 [%]	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g} [kg/s]	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2, gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3, gem}$
3.0	3933.	1.06	0.78	1.44	0.08211	0.03406	0.04805	0.43243	1.35331	295.	0.8	177.59	-19.05
41.0	2030.	1.75	0.72	6.97	0.06985	0.02389	0.04596	0.16545	3.97675	294.	0.6	45.44	-3.08
42.0	2062.	1.73	0.44	5.17	0.07016	0.01283	0.05732	0.27417	2.98008	295.	0.6	67.06	-9.07
43.0	1964.	1.75	0.14	3.86	0.06760	0.00307	0.06454	0.43254	2.20700	299.	0.6	61.19	-16.14
224.0	1839.	1.83	1.70	100.00	0.06604	0.06113	0.00491	0.00136	54.65137	289.	0.6	28.65	-136.62
224.1	1839.	1.80	1.70	100.00	0.06604	0.06113	0.00491	0.00134	55.54060	289.	0.6	28.65	-136.62
225.0	1843.	1.82	1.63	100.00	0.06587	0.05880	0.00707	0.00196	54.79565	291.	0.6	22.03	-112.69
236.0	2063.	1.74	0.73	2.58	0.07054	0.01349	0.05705	0.54674	1.47921	292.	0.6	85.77	-14.80
237.0	2063.	1.75	0.51	4.97	0.07063	0.01494	0.05569	0.27705	2.84587	298.	0.6	81.78	-15.68
238.0	2101.	1.72	0.74	18.67	0.07094	0.02893	0.04201	0.05457	10.85153	298.	0.6	50.65	-11.50
239.0	2060.	1.90	1.80	100.00	0.07688	0.07276	0.00412	0.00102	52.68712	298.	0.6	31.31	-0.31
15.0	2192.	3.34	2.30	10.45	0.14423	0.08622	0.05801	0.12867	3.12570	297.	0.6	61.15	-3.16
16.0	2099.	3.51	1.19	19.14	0.14465	0.04262	0.10203	0.12943	5.44964	290.	0.6	80.98	-8.05
17.0	2119.	3.39	1.25	18.82	0.14134	0.04567	0.09567	0.12179	5.55777	291.	0.6	73.51	-4.05
18.0	2129.	3.38	0.76	17.40	0.14086	0.02688	0.11397	0.15695	5.15549	292.	0.6	106.33	-5.65
19.0	2091.	3.43	0.60	13.71	0.14121	0.01919	0.12203	0.21629	3.99526	293.	0.6	34.84	-9.62
20.0	2084.	3.42	0.37	9.54	0.14018	0.01023	0.12994	0.33266	2.78665	294.	0.6	120.01	-20.15
21.0	2091.	3.41	0.37	10.26	0.14012	0.01064	0.12948	0.30674	3.01248	295.	0.6	118.01	-19.31
214.0	2347.	2.91	0.71	7.72	0.13418	0.02232	0.11185	0.31380	2.65649	301.	0.6	151.68	-28.79
233.0	2033.	3.48	3.42	100.00	0.13916	0.13642	0.00275	0.00069	28.71181	296.	0.6	42.75	-217.66
234.0	1932.	3.66	0.73	33.95	0.13901	0.02542	0.11359	0.08805	9.28007	296.	0.6	88.79	-14.18
231.0	1096.	6.43	2.38	52.41	0.13856	0.04708	0.09148	0.08100	8.15075	295.	0.5	22.56	-2.97
232.0	1058.	6.66	5.52	100.00	0.13822	0.11328	0.02494	0.01201	15.02182	295.	0.6	12.88	-1.54
239.0	1127.	6.27	1.74	9.72	0.13873	0.01668	0.12205	0.56720	1.55110	293.	0.6	37.27	-39.56
243.0	1199.	11.95	21.10	1.11	0.28175	0.26981	0.01194	0.45638	0.09285	296.	0.6	132.65	-126.51
244.0	1174.	12.15	8.91	56.12	0.28159	0.19113	0.09047	0.06956	4.61866	296.	0.6	31.20	-10.08
245.0	1173.	12.05	10.99	100.00	0.27901	0.24995	0.02906	0.01255	8.29696	296.	0.6	10.94	-4.85
227.0	2350.	6.17	1.03	100.00	0.28437	0.04502	0.23935	0.05191	16.21350	289.	0.6	13.61	-22.13
229.0	2169.	6.68	5.17	53.72	0.28439	0.21340	0.07099	0.03103	8.04377	292.	0.6	25.83	-4.93
240.0	950.	3.78	2.10	100.00	0.07084	0.03844	0.03240	0.01731	26.42468	299.	0.6	7.32	-24.67

Tab. 8 Versuchsergebnisse für $0 < G_3/G_1 < 1,0$;
Luft-Wasser Strömung; Abzweig nach oben

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	p_1 [MPa]	$\Delta p_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta p_{1-3,gem}$
		[%]			[kg/s]							[10 ² Pa]	
71.0	960.	21.64	24.07	29.41	0.50286	0.23197	0.27089	0.39643	1.35887	497.	2.5	33.04	-48.38
72.0	954.	22.05	24.44	30.46	0.50950	0.24784	0.26166	0.37179	1.38131	499.	2.6	32.68	-43.82
73.0	946.	23.34	27.51	30.88	0.53647	0.30176	0.23471	0.33071	1.32295	499.	2.6	31.14	-32.40
74.0	931.	23.92	27.70	33.87	0.54174	0.34768	0.19406	0.25302	1.41574	499.	2.6	30.78	-14.89
75.0	920.	26.02	32.08	33.90	0.58517	0.47734	0.10783	0.14143	1.30296	500.	2.6	23.90	-3.86
10.0	1662.	19.34	25.90	17.30	0.77928	0.64710	0.13217	0.18963	0.89442	499.	2.6	56.60	-16.69
11.0	1642.	20.75	28.82	19.62	0.82531	0.60360	0.22170	0.28413	0.94547	499.	2.6	80.21	-55.65
12.0	1704.	17.90	25.01	20.09	0.73823	0.33682	0.40141	0.48439	1.12254	500.	2.6	87.19	-182.13
13.0	1720.	18.61	52.12	17.73	0.77428	0.26577	0.50851	0.68929	0.95280	499.	2.6	113.39	-354.24
120.0	1035.	26.40	24.35	40.44	0.66718	0.23451	0.43267	0.42341	1.53163	501.	2.7	51.00	-99.92
121.0	1036.	26.09	24.60	41.84	0.66355	0.26815	0.39540	0.37164	1.60339	501.	2.7	47.23	-75.17
122.0	1035.	25.46	24.29	41.35	0.64180	0.28326	0.35854	0.34393	1.62431	501.	2.7	44.49	-66.89
123.0	1034.	24.96	25.02	43.35	0.63169	0.33948	0.29221	0.26637	1.73662	501.	2.7	36.76	-38.94
124.0	1039.	25.98	28.88	47.89	0.65972	0.48210	0.17763	0.14608	1.84310	502.	2.7	30.76	-9.58
125.0	1022.	25.96	23.61	38.61	0.64521	0.20430	0.44092	0.45948	1.48726	496.	2.4	313.28	-113.64
126.0	1004.	24.56	25.10	36.91	0.59899	0.27264	0.32634	0.36249	1.50301	497.	2.5	48.17	-62.25
128.0	1153.	35.61	45.19	44.48	1.01783	0.68456	0.33328	0.26217	1.24896	498.	2.6	94.17	-56.95
129.2	1169.	35.75	45.71	43.46	1.03491	0.76517	0.26974	0.21442	1.21558	498.	2.5	85.22	-33.75
130.0	1166.	35.83	47.25	42.31	1.03840	0.66705	0.37135	0.30285	1.18085	498.	2.5	92.11	-80.26
131.0	941.	16.91	13.71	30.79	0.38257	0.14951	0.23306	0.33465	1.82039	496.	2.4	20.08	-40.30
132.0	933.	17.02	17.10	30.60	0.38153	0.22639	0.15513	0.22620	1.79758	498.	2.5	15.11	-11.78
133.0	945.	16.73	13.25	32.15	0.38144	0.15083	0.23060	0.31455	1.92200	497.	2.5	18.87	-32.79
140.0	1917.	20.06	23.98	27.01	0.92868	0.69321	0.23547	0.18835	1.34619	495.	2.4	85.00	-47.06
141.0	1901.	20.05	23.62	27.51	0.91805	0.66067	0.25739	0.20434	1.37206	495.	2.4	92.51	-58.46
142.0	1912.	18.37	21.31	25.01	0.84578	0.53665	0.30913	0.26844	1.36153	495.	2.4	101.36	-102.31
143.0	1928.	18.27	19.69	24.85	0.84438	0.36811	0.47627	0.41461	1.36041	494.	2.4	135.87	-248.62
144.0	1923.	17.43	19.37	23.98	0.80578	0.41850	0.38727	0.34933	1.37584	495.	2.4	111.97	-169.89
202.0	1450.	14.61	12.81	26.14	0.50560	0.22905	0.27654	0.30562	1.78969	496.	2.4	59.07	-73.53
203.0	1436.	14.55	14.14	25.41	0.49993	0.27147	0.22846	0.26164	1.74661	497.	2.5	51.54	-53.41
204.0	1431.	14.53	14.51	27.00	0.49935	0.30118	0.19817	0.21362	1.85774	498.	2.5	43.40	-31.45
205.0	1755.	9.43	8.93	18.56	0.39323	0.22862	0.16461	0.21262	1.96887	497.	2.5	46.47	-34.29
206.0	1775.	9.64	10.33	16.99	0.40705	0.28745	0.11960	0.16663	1.76325	498.	2.5	35.99	-3.80

Tab. 9 a Versuchsergebnisse für $0 < G_3/G_1 < 1,0$;
Dampf-Wasser Strömung; Abzweig waagrecht

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2 [%]	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g} [kg/s]	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	p_1 [MPa]	$\Delta p_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta p_{1-3,gem}$
16.0	964.	14.68	13.55	27.61	0.34367	0.17246	0.17120	0.26494	1.88029	509.	3.1	16.68	-15.33
38.3	1588.	17.21	24.86	18.15	0.67539	0.40640	0.26899	0.37759	1.05478	524.	4.0	64.42	-75.48
39.3	1588.	17.21	29.95	10.01	0.67539	0.54577	0.12962	0.32992	0.58173	524.	4.0	52.90	-31.25
40.4	1588.	17.21	28.98	19.42	0.67539	0.21241	0.46299	0.60741	1.12858	524.	4.0	76.88	-184.45
4.0	1687.	13.05	12.89	23.27	0.55537	0.26752	0.28785	0.29070	1.78296	537.	5.0	47.67	-34.03
5.0	1596.	14.89	16.29	20.91	0.59936	0.19664	0.40273	0.47849	1.40427	537.	5.0	62.16	-89.58
6.0	1704.	11.86	21.02	13.65	0.50818	0.14673	0.36145	0.61777	1.15134	537.	5.0	61.53	-114.14
18.0	1677.	10.34	7.39	22.34	0.44005	0.14607	0.29398	0.30910	2.16135	542.	5.3	45.46	-46.44
19.0	1666.	11.82	10.44	18.49	0.49846	0.13810	0.36036	0.46207	1.56459	541.	5.3	59.72	-77.73
30.1	1172.	9.77	6.58	22.80	0.28820	0.09602	0.19219	0.28569	2.33420	537.	5.0	21.35	-17.82
54.0	1614.	7.10	10.95	7.95	0.28878	0.13429	0.15449	0.47782	1.11962	537.	5.0	44.97	-40.59
55.0	1580.	8.24	5.64	18.41	0.32710	0.10775	0.21935	0.30025	2.23344	537.	5.0	40.62	-32.35
56.0	1547.	9.18	7.89	23.00	0.35804	0.17776	0.18028	0.20091	2.50616	538.	5.0	29.18	-13.31
66.0	1744.	10.26	10.79	21.07	0.44978	0.28521	0.16457	0.17814	2.05395	537.	5.0	37.56	-10.51
69.0	1755.	10.84	10.85	21.77	0.47853	0.26976	0.20877	0.21729	2.00777	537.	5.0	41.80	-19.85
134.0	1221.	29.24	30.60	45.71	0.89788	0.40138	0.49651	0.35372	1.56332	537.	5.0	48.79	-62.06
135.0	1229.	29.19	36.62	40.25	0.90404	0.67935	0.22468	0.18027	1.37866	538.	5.0	41.74	-20.10
136.0	1240.	30.38	35.10	45.82	0.94814	0.54716	0.40099	0.26039	1.50830	537.	5.0	52.58	-45.26
137.0	1221.	30.58	33.44	45.26	0.93990	0.40963	0.53027	0.38118	1.48010	537.	5.0	54.72	-71.02
138.0	1001.	14.43	18.07	19.24	0.36307	0.23035	0.13271	0.27411	1.33354	537.	5.0	17.68	-17.85
139.0	1019.	14.70	13.16	24.32	0.37792	0.12808	0.24984	0.39966	1.65414	536.	4.9	23.75	-34.47
191.0	1872.	13.46	11.26	24.56	0.63314	0.22816	0.40498	0.35047	1.82510	537.	4.9	69.57	-77.13
192.0	1895.	13.83	13.44	24.19	0.65972	0.30073	0.35898	0.31107	1.74928	537.	5.0	68.12	-63.55
193.0	1877.	13.87	12.81	27.00	0.65592	0.30629	0.34963	0.27390	1.94610	537.	5.0	65.97	-55.69
195.0	1753.	7.70	5.85	17.72	0.33961	0.13336	0.20625	0.26385	2.30178	537.	4.9	37.90	-31.83
196.0	1747.	8.18	7.11	18.59	0.35918	0.17255	0.18663	0.22859	2.27310	537.	4.9	37.48	-22.85
197.0	1752.	9.06	9.93	17.82	0.39975	0.26823	0.13153	0.16726	1.96714	537.	5.0	25.34	-10.37
198.0	1418.	23.20	24.92	39.84	0.82813	0.46954	0.35859	0.25221	1.71688	537.	5.0	53.58	-33.89
200.0	1434.	23.54	25.50	38.48	0.84965	0.45986	0.38979	0.28061	1.63488	537.	4.9	51.99	-43.02
201.0	1427.	23.59	23.29	37.55	0.84591	0.33600	0.50991	0.37862	1.59208	536.	4.9	63.20	-86.42
28.0	1116.	8.05	5.93	16.23	0.23126	0.07164	0.15962	0.34221	2.01700	549.	6.0	18.27	-21.26
34.0	1588.	8.96	3.96	20.09	0.36508	0.06392	0.30216	0.36814	2.24207	550.	6.1	42.75	-35.08
35.0	1588.	8.43	5.66	32.30	0.34444	0.14061	0.20384	0.15454	3.82929	551.	6.2	20.22	-5.01

Tab. 9 b

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g}	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3,gem}$ [10 ² Pa]
36.2	1588.	8.61	7.17	12.72	0.35215	0.05731	0.29484	0.56656	1.47779	551.	6.2	54.61	-77.58
37.3	1588.	8.61	28.20	9.02	0.35215	0.10437	0.24777	0.67143	1.04793	551.	6.2	49.21	-86.00
7.0	1719.	4.48	5.72	6.16	0.20489	0.03889	0.16601	0.58965	1.37404	564.	7.5	23.87	-44.05
8.0	1721.	3.57	2.24	12.82	0.16392	0.05698	0.10693	0.18179	3.58840	564.	7.5	18.14	-4.10
9.0	1695.	5.67	8.46	6.66	0.25529	0.15805	0.09724	0.32422	1.17482	562.	7.3	36.57	-20.02
63.0	1583.	11.84	10.48	27.30	0.49171	0.22251	0.26920	0.23747	2.30546	563.	7.3	39.00	-12.12
64.0	1608.	10.02	10.45	26.16	0.42514	0.26689	0.15826	0.14259	2.61049	564.	7.5	25.07	-4.44
65.0	1601.	11.29	13.41	27.49	0.47577	0.36966	0.10612	0.09159	2.43529	564.	7.5	18.63	-2.65
83.0	1421.	22.84	25.33	38.98	0.84043	0.45920	0.38123	0.26584	1.70634	564.	7.5	35.21	-28.58
84.0	1471.	22.34	19.04	39.42	0.85029	0.26962	0.58066	0.38700	1.76462	564.	7.5	47.73	-59.84
94.0	1370.	20.94	26.27	34.64	0.74126	0.59714	0.14413	0.11751	1.65458	564.	7.5	16.69	-1.40
95.0	1387.	21.09	27.09	29.76	0.75857	0.52793	0.23064	0.21545	1.41121	564.	7.5	33.12	-19.16
96.0	1392.	20.44	20.05	37.29	0.73912	0.32595	0.41317	0.30635	1.82474	564.	7.5	35.31	-36.15
97.0	1399.	21.07	24.60	34.67	0.76290	0.46303	0.29987	0.23886	1.64557	564.	7.5	34.04	-24.75
98.0	1373.	21.66	27.05	33.03	0.76858	0.55126	0.21733	0.18543	1.52493	564.	7.5	28.63	-14.25
99.0	1382.	20.56	16.09	36.97	0.73459	0.20700	0.52759	0.39939	1.79825	564.	7.5	45.58	-52.66
100.0	1687.	8.35	8.52	20.29	0.37261	0.21680	0.15581	0.17203	2.43083	564.	7.5	23.10	-9.02
101.0	1673.	10.44	13.08	16.46	0.46110	0.30752	0.15358	0.21131	1.57620	564.	7.5	36.69	-16.68
102.0	1684.	9.52	8.93	19.96	0.42219	0.19245	0.22974	0.25951	2.09688	564.	7.5	43.04	-22.99
103.0	1695.	9.42	6.55	22.07	0.42128	0.13215	0.28913	0.29284	2.34360	564.	7.5	42.64	-24.13
104.0	1702.	8.92	4.06	21.75	0.40068	0.07488	0.32580	0.33346	2.43841	564.	7.5	45.50	-32.15
155.0	1909.	13.85	14.23	26.38	0.69209	0.34759	0.34450	0.26125	1.90538	564.	7.5	53.16	-34.44
156.0	1682.	8.81	6.60	19.26	0.39144	0.12759	0.26385	0.30829	2.18642	564.	7.5	36.40	-30.78
157.0	1707.	7.90	8.79	14.36	0.35606	0.19752	0.15855	0.24501	1.81735	564.	7.5	32.65	-18.25
158.0	1719.	7.23	10.13	8.81	0.32965	0.24736	0.08229	0.20492	1.21815	564.	7.5	28.58	-14.69
159.0	1241.	21.46	21.89	37.14	0.69019	0.30799	0.38220	0.32003	1.73031	564.	7.4	30.78	-27.77
160.0	1250.	21.56	25.71	34.03	0.69941	0.42038	0.27903	0.25274	1.57852	564.	7.5	28.02	-23.81
161.0	1262.	21.37	15.92	37.09	0.69682	0.16679	0.53003	0.43818	1.73590	563.	7.4	33.61	-50.17
85.0	1296.	18.91	9.09	36.44	0.65301	0.09113	0.56188	0.44663	1.92655	584.	10.0	32.79	-43.15
86.0	1316.	18.59	17.15	34.80	0.65249	0.23978	0.41271	0.33782	1.87235	584.	10.0	33.14	-22.95
87.0	1309.	19.96	29.20	22.44	0.69300	0.50204	0.19096	0.24504	1.12453	585.	10.0	57.53	-15.59
88.0	1345.	17.36	59.96	5.17	0.60437	0.51199	0.09239	0.51320	0.29787	584.	9.9	38.42	-58.42
90.0	1344.	20.87	15.71	38.09	0.74364	0.18331	0.56032	0.41292	1.82481	584.	9.9	37.18	-41.93

Tab 9 c

Run	G_1 [kg/m ² s]	x_1	x_2 [%]	x_3	\dot{m}_{1g}	\dot{m}_{2g} [kg/s]	\dot{m}_{3g}	G_3/G_1	x_3/x_1	T_1 [K]	P_1 [MPa]	$\Delta P_{1-2,gem}$ [10 ² Pa]	$\Delta P_{1-3,gem}$
91.0	1340.	20.80	21.27	37.61	0.74035	0.32437	0.41598	0.31075	1.80814	584.	10.0	38.43	-20.80
92.0	1360.	21.18	27.20	31.80	0.76265	0.51077	0.25188	0.21995	1.50157	584.	10.0	30.60	-6.92
93.0	1361.	19.35	22.94	36.67	0.70002	0.46753	0.23249	0.17529	1.89466	585.	10.0	27.65	-4.80
105.0	1682.	3.57	5.11	5.12	0.16890	0.06707	0.10184	0.42050	1.43385	585.	10.0	29.24	-21.78
106.0	1670.	3.76	6.92	3.92	0.17647	0.11061	0.06585	0.35755	1.04371	585.	10.0	23.09	-18.46
107.0	1666.	3.73	6.93	3.62	0.17442	0.11712	0.05730	0.33846	0.97067	585.	10.0	23.83	-14.91
108.0	1674.	3.19	4.48	4.85	0.15044	0.10994	0.04050	0.17724	1.51902	585.	10.0	17.89	-7.44
162.0	1894.	8.45	5.54	20.07	0.44439	0.11526	0.32913	0.31176	2.37561	586.	10.3	44.14	-25.65
163.0	1872.	10.18	8.76	23.06	0.52601	0.19716	0.32886	0.27608	2.26453	586.	10.2	40.81	-19.48
164.0	1851.	10.34	6.44	23.28	0.52587	0.12243	0.40344	0.34066	2.25202	586.	10.0	50.94	-28.20
165.0	1260.	17.54	10.43	35.76	0.59131	0.12074	0.47058	0.39036	2.03870	586.	10.0	27.91	-23.35
300.0	1316.	18.59	17.15	34.80	0.65249	0.23978	0.41271	0.33782	1.87235	584.	10.0	33.14	-22.95

Tab. 9 d