

Mehrphasenströmungen



Von P. Graßmann*
und K. Hilfiker**

K. Hilfiker

* Prof. Dr. Dr. E. h. P. Graßmann, Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH, Sonneggstraße 3, 8006 Zürich

** Dr. K. Hilfiker, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ab 1. 7. 75 Alusuisse, Zürich

Summary

Many chemical processes involve two-phase flow, often with simultaneous heat and mass transfer, such as distillation. The relevant research activities carried out over the years at the "Institut für Verfahrens- und Kältetechnik" are summarized. References are given which discuss in greater detail the phenomenon of multiphase flow as flow regimes, pressure drop, heat transfer, slip and critical flow in pipes.

Einleitung

Beobachtungen über Mehrphasenströmungen hat es seit Menschengedenken gegeben; das Dahinziehen der Wolken, das Aufleben der Wasseroberfläche durch leise Winde bis zu tobenden Wellen auf dem Meer oder das Wirbeln von Sand und Schnee in der Luft wurden in Dichtung und Malerei dargestellt. Die physikalischen Vorgänge der Zweiphasenströmung werden, im Hinblick auf

technische Anwendungen, seit knapp fünfzig Jahren wissenschaftlich studiert und wurden neuerdings in mehreren Büchern zusammenfassend dargestellt^{1, 2, 3, 4}. Zu einer großen Herausforderung wurde die Erforschung der Mehrphasenströmung besonders in den letzten zehn Jahren, wegen ihrer umfassenden Bedeutung in der modernen Verfahrenstechnik. Jährlich werden weltweit über tausend Arbeiten darüber publiziert. Dazu sei bemerkt: Für die Ermittlung des Druckabfalles der Zweiphasenströmung ergibt sich ein Satz acht dimensionsloser Kennzahlen. Mit nur fünf Meßpunkten für die Abhängigkeit jeder Kennzahl werden $5^7 = 78125$ Meßpunkte benötigt^{5, 6}. Das sind etwa fünfhundert Forscherjahre mit anspruchsvollen Versuchseinrichtungen – für nur eine Facette der Mehrphasenströmung! Dementsprechend erfordert die Erforschung der Mehrphasenströmung ein gutes Team, das weltweit mit den großen einschlägigen Forschungsstätten koordinieren und konkurrenzieren muß.

Dampfblasen in Flüssigkeiten

Das Spektrum der Forschungsarbeiten über Mehrphasenströmung am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH ist weit. Zur Klärung der Elementarvorgänge bei der Retifikation wurde schon früh von Großmann⁷, Schulte-Vieting⁸, A. Frank⁹, Anderès¹⁰ und Wyß¹¹ Form und Aufstiegs geschwindigkeit von Dampfblasen in Flüssigkeiten und vor allem deren Wärme- und Stoffaustausch mit der Flüssigkeit untersucht. Etwas später maß Reinhart¹² Form, Geschwindigkeit und Widerstandsbeiwert fallender Tropfen von zwanzig Flüssigkeiten mit weit voneinander abweichenden Stoffgrößen.

Strömung in horizontalen Rohren

Mit Gas- bzw. Dampf-Flüssigkeits-Strömungen in horizontalen oder nur leicht geneigten Rohren haben wir es bei Abzugskanälen oder horizontalen Verdampferrohren – z.B. den Kältemittelrohren unter einem Kunsteisplatz – zu tun. Je nach den Mengenströmen von Gas und Flüssigkeit treten hierbei ganz verschiedene Strömungsbilder auf (Abb.1). Schicht¹³ gelang es, das Bakersche Diagramm, in dem die Existenzbereiche die-

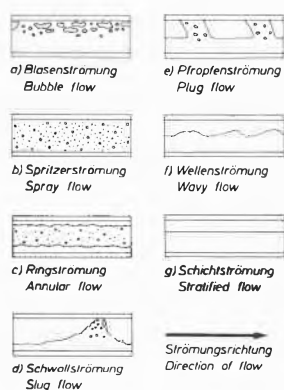


Abb. 1. Strömungsbilder bei horizontaler Strömung

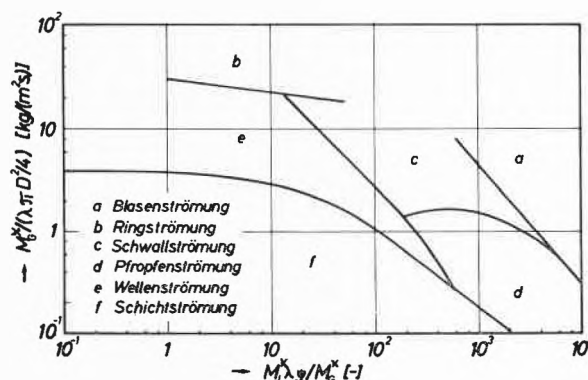


Abb. 2. Bakersche Strömungsbilderkarte mit Grenzen, nach Schicht¹³

ser Strömungsbilder eingezeichnet sind, zu verbessern (Abb.2). Ausgehend von dem bekannten Strömungsmodell von Lockhart und Martinelli (vgl. z.B.⁶, S.792), welches im Bereich der geschichteten Zweiphasenströmung recht gut erfüllt ist, konnte Johannessen¹⁴ ein Verfahren zur Berechnung von Druckverlust und mittlerem volumetrischen Flüssigkeitsanteil entwickeln. Auf Grund dieser Theorie ließen sich auch die Stabilitätsgrenzen in einer neuen dimensionslosen Strömungsbilder-Karte darstellen.

Strömung in vertikalen Rohren

Die Zweiphasenströmung im vertikalen Rohr läßt sich einerseits leichter behandeln, da im allgemeinen radiale Symmetrie vorausgesetzt werden darf. Andererseits muß aber nun neben den durch Wandreibung und durch die Beschleunigung bedingten Druckabfällen auch der hydrostatische Druck berücksichtigt werden.

Man könnte erwarten, daß die die Reibung bedingenden Schubspannungen an der Rohrwand immer so gerichtet sind, daß sie das Rohr in Richtung der Flüssigkeitsbewegung zu beschleunigen suchen. Kouremenos¹⁵ hat gezeigt, daß dies nicht immer der Fall sein muß. Läßt man nämlich durch ein senkrechtes Rohr große, fast das ganze Rohr füllende Blasen nach oben steigen, so fließt die verdrängte Flüssigkeit am Rande der Blasen nach abwärts. Dadurch entstehen Schubspannungen, die das Rohr nach unten, also entgegen der Strömung, zu beschleunigen suchen.

Befindet sich in einem Rohrabschnitt der Höhe H das Volumen V' der dichteren und V'' der weniger dichten Phase, so ist der hydrostatische Druck gegeben durch

$$\Delta p_g = g \bar{\rho} H = g \left(\frac{V' \rho' + V'' \rho''}{V' + V''} \right) H = g [(1 - \varepsilon'') \rho' + \varepsilon'' \rho''] H. \quad (1)$$

Dabei sind ρ' und ρ'' die Dichten der beiden Phasen und $\varepsilon'' \equiv V'' / (V' + V'')$ der Volumenanteil der leichteren Phase. Da immer damit gerechnet werden muß, daß beide Phasen mit verschiedenen Geschwindigkeiten w' und w'' strömen, läßt sich ε'' leider nicht aus den meist bekannten Volumenströmen V'^* und V''^* berechnen.

Es ist nämlich

$$\varepsilon''^* \equiv \frac{V''^*}{V''^* + V'^*} = \frac{w'' \varepsilon''}{w'' \varepsilon'' + w'(1 - \varepsilon'')} \neq \varepsilon'' \quad (2)$$

Um aus den Volumenströmen den hydrostatischen Druck zu berechnen, muß also entweder die mittlere Dichte $\bar{\rho}$ oder das Geschwindigkeitsverhältnis w''/w' bzw. der Schlupf $w'' - w'$ bestimmt werden.

Diese Lücke wurde von Kowalczewski¹⁶ für das Kältemittel R 12 und von Kütükçüoğlu¹⁷ für Wasser geschlossen. In beiden Arbeiten konnte auch mit Hilfe der γ -Strahl-Absorption die radiale Dichteverteilung ermittelt werden. Es ergab sich, daß sich nahe der Rohrachse ein Dampfkeim bildet, durch den die Flüssigkeit an den Rand gedrängt wird.

Auf Grund ausgedehnter Versuche konnten Vaihinger¹⁸ und Kaufmann¹⁹ Formeln für Wärmeübergang und Druckverlust für R 12 angeben, das in einem senkrechten, geheizten Rohr nach aufwärts strömt.

Anwendung des Impulssatzes auf die Verdampfung in Rohren

Verdampfung kann durch eine Druckentlastung (= Entspannungsverdampfung) oder auch zusätzlich durch Wärmezufuhr bedingt sein. Immer aber führt sie zu einer erheblichen Volumenvergrößerung, die in einem Rohr von gleichbleibendem Querschnitt eine Beschleunigung des Flüssigkeits-Dampf-Gemisches nach sich zieht. Für diese Beschleunigung ist ein zusätzlicher Druckabfall dp_a erforderlich. Nach dem Impulssatz ist er gegeben durch²⁰

$$-dp_a = m^{*2} dv \quad (3)$$

Dabei ist m^* die Massenstromdichte und im Falle gleicher Geschwindigkeit beider Phasen

$$v = v' + x(v'' - v')$$

das spezifische Volumen.

Eine Umformung von Gl. (3) führt auf

$$w^2 = -v^2 \frac{dp}{dv} \equiv a^2 \quad (4)$$

also auf eine formale Übereinstimmung mit der Gleichung für die Schallgeschwindigkeit. Die zahlenmäßige Berechnung zeigt, daß sich dafür für Dampf-Flüssigkeits-Gemische oft erstaunlich niedrige Werte von z.B. 2 m/s ergeben (Abb. 3). Dabei ist zu unterscheiden, ob die Volumenvergrößerung nur durch die Ausdehnung der Gasphase – also ohne Phasenumwandlung – zustande kommt, oder ob die sofortige Einstellung des Phasengleichgewichts vorausgesetzt wird. Bei der Strömung durch Blenden verläuft die Entspannungsverdampfung nicht im thermischen Gleichgewicht, so daß die effektive Schallgeschwindigkeit zwischen den Kurven A und B liegt²¹.

Dreiphasenströmung

Zu der einfachsten Anwendung der Dreiphasenströmung gehört die Umwälzung von Suspensionen durch Luft-einblasung, etwa im Zentralrohr großer Verweilzeitbehälter. Ähnliche Vorgänge spielen sich in Fluidisierbetten ab, wo z.B. eine flüssige und eine gasförmige Phase an einem Feststoffkatalysator miteinander zur Reaktion gebracht werden. Wesentlich verwickelter ist die Entspannungsverdampfung von Suspensionen, da fluid-dynamische und thermodynamische Vorgänge miteinander vielseitig gekoppelt sind. Als Anwendungsgebiete gelten die kontinuierliche Expansion siedender Suspensionen über große Druckbereiche bei der Tonerdeherstellung²² und die Eindickung von Schlämmen durch Verdampfen. Neuerdings wird versucht, bei der Gewinnung von Frischwasser aus Meerwasser in Entspannungsverdampfern Feststoffpartikel zuzugeben, z.B. BaSO_4 , zur Verminderung der Krustenbildung, zur Erhöhung des turbulenten Wärmeaustausches und zur Verminderung des Siedeverzuges. Die Dreiphasenströ-

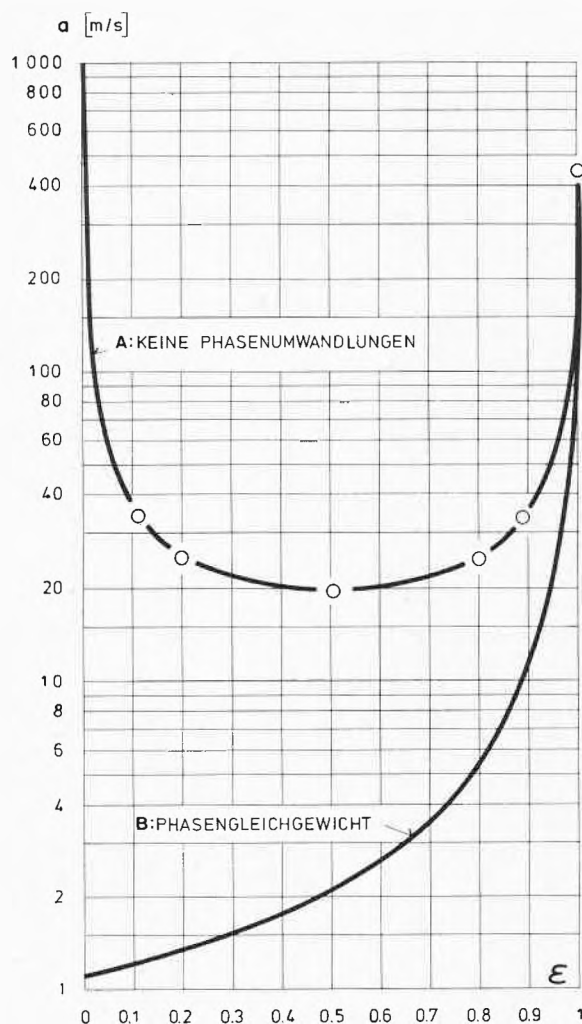


Abb. 3. Schallgeschwindigkeit für homogene Dampf-Wasser-Strömung in Abhängigkeit des Dampf-Raumvolumen-Anteils bei 1 bar, nach Hilfiker²⁰

mungen mit Phasenänderung ist Neuland. Das Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH hat vor drei Jahren mit der Forschung auf diesem Gebiet begonnen^{20, 21}. Im Hinblick auf Anwendungen bei der Herstellung von Aluminium untersuchte Hilfiker²⁰ die Entspannung einer Wasser-Sand-Suspension in einem 8 m hohen Rohr von 50 mm Durchmesser. Ermittelt wurden Druckverlauf, Phasenanteile und Durchsatzvermögen in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur T_a und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Rohrein- und -austritt der Meßstrecke (Abb.4).

In Abb.5 ist der Volumenstrom der Suspension V_0^* (gemessen bevor Verdampfung eintritt) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ΔT mit den Parametern T_a dargestellt. Damit Strömung über das 8 m hohe Meßrohr überhaupt einsetzt, ist eine minimale Temperaturdifferenz ΔT_0 erforderlich, und zwar abhängig von T_a . Mit zunehmendem ΔT steigt das Durchsatzvermögen vorerst sehr rasch an, insbesondere im Bereich hoher Temperaturen, so daß eine stabile Regelung von An-

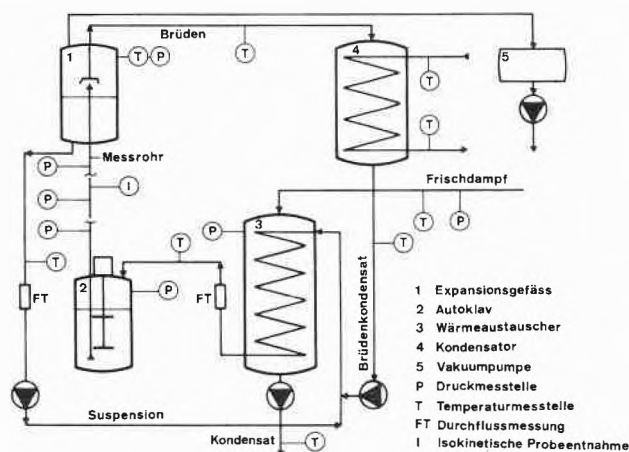


Abb.4. Schema der Anlage «Vertikale Dreiphasen-Zweikomponentenströmung»

lagen schwierig zu erreichen ist. In ein anderes Extrem gelangt man bei großem ΔT : es ist das Gebiet der *kritischen Strömung*, wo bei festgehaltenem T_a durch be-

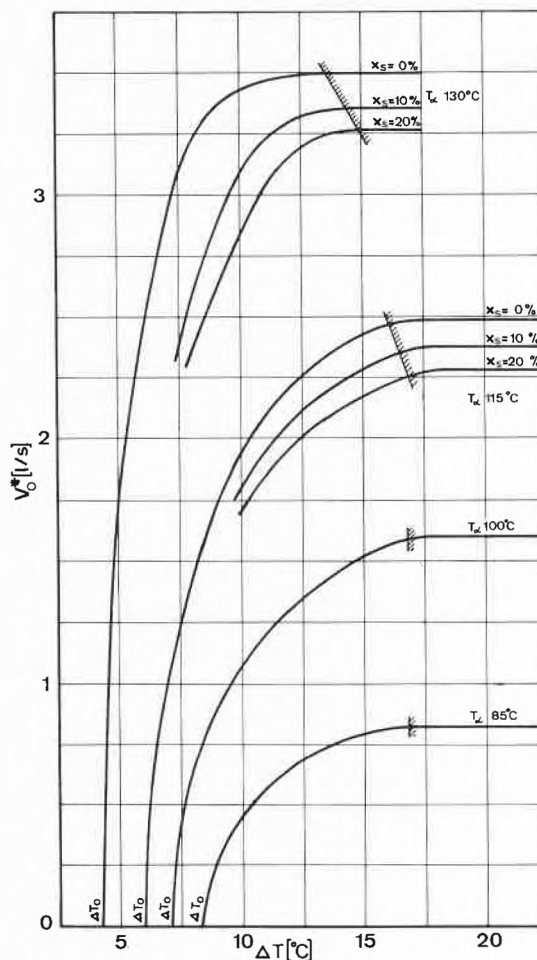


Abb.5. Durchsatzvermögen V_0^* in Abhängigkeit von ΔT zwischen Rohreintritt und Rohraustritt. Rohrdurchmesser 50 mm, Rohrhöhe 8 m

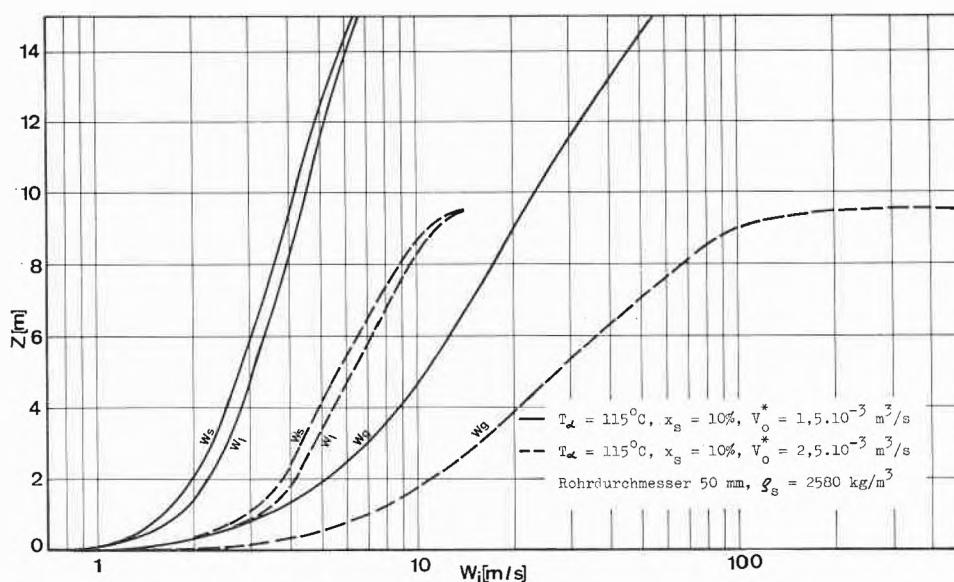


Abb.6
Verlauf der Geschwindigkeit der drei Phasen entlang des Steigrohres

liebige Zunahme von ΔT (oder Δp) das Durchsatzvermögen nicht mehr zunimmt. Die Schallgeschwindigkeit ist am oberen Rohrende erreicht!

Für die Anfangstemperaturen von 115°C und 130°C ist als weiterer Parameter der Transportmassenanteil x_s des Feststoffes eingetragen: der Feststoff vermindert das Durchsatzvermögen.

Das von Hilfer aus Energie- und Impulssatz entwickelte theoretische Modell gibt die über weite Temperaturbereiche erhaltenen Versuchsergebnisse mit der erfreulich hohen Genauigkeit von $\pm 10\%$ wieder. Abb. 5 zeigt den nach der Theorie berechneten Geschwindigkeitsverlauf der einzelnen Phasen. Für den Durchsatz $V_0^* = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ tritt bei $z = 9,75 \text{ m}$ kritische Strömung ein.

Abb. 6 zeigt, wie sich der Druckgradient aus Beschleunigungs-, Gravitations- und Reibungsdruckabfall zusammensetzt. Der starke Zuwachs des Gradienten des Beschleunigungsdruckabfalles am Rohrende erzeugt die kritische Strömung.

Zusammenfassung

Zweiphasenströmungen finden in der Verfahrenstechnik ein breites Anwendungsgebiet, besonders um ausge dehnte Berührungsflächen für Wärme- und Stoffaustausch zu schaffen. Nach einem kurzen Hinweis auf das z. B. für die Rektifikation wichtige Problem der in einer

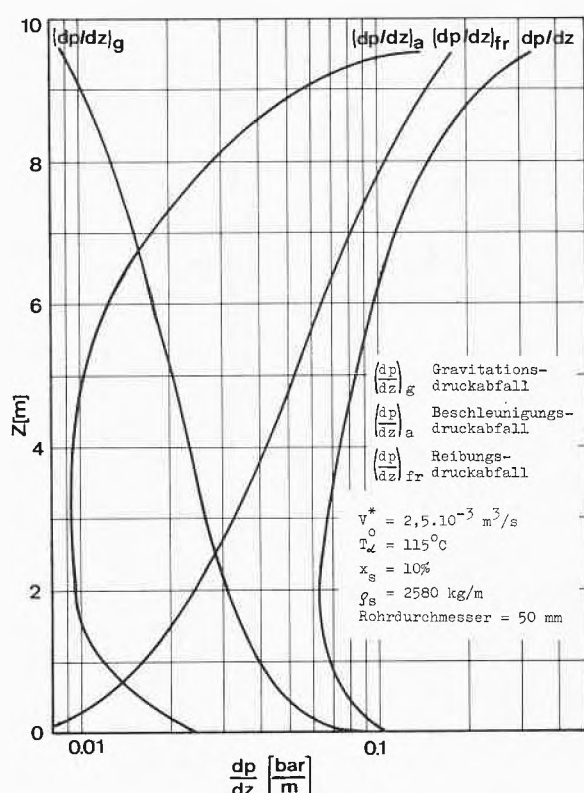


Abb. 7. Verlauf des Druckgradienten entlang des Steigrohres; kritische Strömung am Rohraustritt bei $z = 9,75 \text{ m}$

Flüssigkeit aufsteigenden Dampfblase und dem Verhalten fallender Tropfen wird besonders auf die Zweiphasenströmung in Rohrleitungen eingegangen. Viele Literaturhinweise vermitteln den Zugang zu den aus dem Institut für Verfahrens- und Kältetechnik hervorgegangenen Originalarbeiten. Dort finden sich Formeln für Druckabfall, Wärmeübergang, Schlupf und kritische Strömungsgeschwindigkeit.

Literaturverzeichnis

- 1 G.W. Govier und K. Aziz, *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*, van Nostrand Reinhold Comp., New York 1972.
- 2 H. Brauer, *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung*, Verlag Sauerländer, Aarau 1971.
- 3 E. Rhodes und D.S. Scott, *Cocurrent Gas-Liquid Flow*, Plenum Press, New York 1969.
- 4 G.F. Hewitt und N.S. Hall Taylor, *Annular Two-Phase Flow*, Pergamon Press, Oxford 1970.
- 5 P. Graßmann, Zweiphasenströmungen in Rohrleitungen, *Kältetechnik* 17 (1965) 2, S. 42–6.
- 6 P. Graßmann, *Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik*, 2. Auflage, Verlag Sauerländer, Aarau 1971.
- 7 U. Großmann, *Stoff- und Wärmeaustausch zwischen Flüssigkeit und aufsteigenden Dampfblasen bei Zweistoffgemischen*, Diss. Nr. 2396, ETH Zürich 1956 und *CIT* 28 (1956) 107–12.
- 8 H.J. Schulte-Vieting, *CIT* 27 (1955) 507–12.
- 9 A. Frank, *Wärme- und Stoffaustausch zwischen Dampfblase und Flüssigkeit bei N_2 - O_2 -Gemischen*, Diss. Nr. 2827, ETH Zürich 1958 und *CIT* 32 (1960) 330–5.
- 10 G. Anderès, *Abhängigkeit des Stoffaustausches zwischen Dampfblasen und Flüssigkeit von der Ausrichtung und den Eigenschaften der Flüssigkeit*, Diss. Nr. 3101, ETH Zürich 1960 und *CIT* 31 (1959) 154–5.
- 11 E. Wyß, *Bestimmung von Wärme- und Stoffübergangszahlen zwischen Dampfblase und Flüssigkeit für Wasser gegen Wasserdampf und Wasser gegen Wasserdampf plus Inertgas*, Diss. Nr. 3234, ETH Zürich 1962 und *CIT* 34 (1962) 755–9.
- 12 A. Reinhart: *Das Verhalten fallender Tropfen*, Diss. Nr. 3412, ETH Zürich 1964, vgl. auch *CIT* 33 (1961) 348–9.
- 13 H.H. Schicht, *Experimentelle Untersuchungen an der adiabaten Zweiphasenströmung Wasser/Luft in einem horizontalen Rohr: Strömungsformen, Schwallströmung, Anlaufeffekte*, Diss. Nr. 4547, ETH Zürich 1970.
- 14 T. Johannessen, *Ein Beitrag zur Hydrodynamik der Zweiphasenströmung Gas/Flüssigkeit in horizontalen Rohren*, Diss. Nr. 5063, ETH Zürich 1973 und *J. Heat and Mass Transfer* 15 (1972) 1443–9.
- 15 D.A. Kouremenos, *Über die Strömung einzelner zylinderförmiger Gasblasen in vertikalen Kreisrohren*, Diss. Nr. 3939, ETH Zürich 1967, vgl. auch P. Graßmann, R. Büttiker und E. Cathrein: *Forschung in Ingenieurwesen* 30 (1964) 105–8.
- 16 J.J. Kowalczewski, *Two-Phase Flow in an unheated and heated Tube*, Diss. Nr. 3466, ETH Zürich 1964.
- 17 A. Kütükçüoğlu, *Strömungsform, Dampfvolumentanteil und Druckabfall bei Zweiphasenströmung von Wasser-Wasserdampf in Rohren*, Diss. Nr. 4307, ETH Zürich, VDI-Verlag, Düsseldorf 1969.
- 18 D. Vaihinger, *Beitrag zur Bestimmung des Druckeinflusses auf den Wärmeübergang bei ausgebildeter Blasenverdampfung*, Diss. Nr. 4912, ETH Zürich 1972 und *Chem. Rdsch.* 26 (17. 1. 73) Nr. 3, S. 21–5.
- 19 W.-D. Kaufmann, *Untersuchung des Wärmeüberganges und des Druckverlustes bei der Zweiphasenströmung von R12 im senkrechten Rohr*, Diss. Nr. 5196, ETH Zürich 1973, *Chem. Rdsch.* 26, Nr. 3 (17. 1. 73) S. 3–9 und *CIT* 44 (1972) S. 921–7.

- 20 K. Hilfiker, *Dynamik der adiabaten Expansion von vertikaler Dreiphasen-Zweikomponentenströmung*, Diss. Nr. 5533, ETH Zürich 1975.
 21 B. Covelli, Diss. ETH (in Vorbereitung).
 22 K. Kaeslin, Verfahren und Auslegung des Tonerdewerkes Gove, *Schweiz. Bauztg.* 91 (1973) 2, 21–8.

Indizes

<i>g</i>	Gasphase
<i>l</i>	Flüssigphase
<i>s</i>	Feststoffphase
'	siedende Flüssigkeit
"	gesättigter Dampf
α	Anfangszustand
ω	Endzustand

Formelzeichen

<i>T</i>	absolute Temperatur	(K)
<i>V</i>	Volumen	(m ³)
<i>V</i> *	Volumenstrom	(m ³ ·s ⁻¹)
<i>a</i>	Schallgeschwindigkeit	(m·s ⁻¹)
<i>g</i>	Gravitationskonstante	(m·s ⁻²)
<i>m</i> *	spezifischer Massenstrom	(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)
<i>p</i>	Druck	(N·m ⁻²)
<i>v</i>	spezifisches Volumen	(m ³ ·kg ⁻¹)
<i>w</i>	Geschwindigkeit	(m·s ⁻¹)
α_s	Massenstromanteil des Feststoffes in der Dreiphasenströmung	(—)
<i>z</i>	vertikale Koordinate, aufwärts positiv	(m)
ε''	Raumvolumenanteil der Dampfphase	(—)
ε''^*	Transportvolumenanteil der Dampfphase	(—)
ϱ	Dichte	[kg·m ⁻³]