



**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5950

**Experimentelle Untersuchungen  
zu Strömungsformen in  
horizontalen und geneigten  
Verdampferrohren**

**M. Simon**

Institut für Reaktorsicherheit

Juni 1997

---



**Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5950

**Experimentelle Untersuchungen zu Strömungsformen in  
horizontalen und geneigten Verdampferrohren**

Martin Simon\*

Institut für Reaktorsicherheit

\*Institut für Kerntechnik und Reaktorsicherheit, Universität Karlsruhe (TH)

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)  
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1997

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

## Zusammenfassung

Zur Auslegung von Verdampferrohren sind Kenntnisse über die auftretenden Strömungsformen nötig. Die heute verfügbaren Berechnungsmethoden erlauben keine zuverlässige Voraussage von Strömungsformen in nicht-adiabaten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen. Um eine Basis für die Entwicklung neuer Berechnungsverfahren zu schaffen, wurden im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Es wurde ein neues optisches Meßsystem entwickelt, mit dem die Strömungsformen in einem beheizten Metallrohr nahezu rückwirkungsfrei bestimmt werden können. Das Meßprinzip basiert auf Absorptions- und Streueffekten in Wechselwirkung mit den Phasen. Der Nachweis zur eindeutigen Strömungsformerkennung wurde durch einen Vergleich von visuell beobachteten Strömungsformen mit den Signalmustern erbracht. Zur Automatisierung der Strömungsformbestimmung ist eine rechnergestützte Signalmustererkennung mit hohen Trefferquoten realisiert worden. Durch die Verarbeitung von Merkmalen aus dem Amplituden-, Zeit-, und Frequenzbereich konnte eine Klassifizierung vorgenommen sowie auch Übergänge zwischen verschiedenen Strömungsformen erfaßt werden. Die optische und mechanische Konstruktion wurde so ausgelegt, daß der Einsatz in nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen bei Drücken bis 130 bar und Rohrwandtemperaturen bis 400 °C möglich ist.

Mit einem neu entwickelten Versuchsstand wurden Strömungsformen in einem horizontalen und geneigten Verdampferrohr mit einphasigem Einlauf untersucht. Es wurde eine Minimierung der Einflüsse peripherer Komponenten auf die Zweiphasenströmung erreicht. Die aus einem Stahlrohr bestehende Meßstrecke hat einen Innendurchmesser von 15,7 mm, eine Länge von 5 m und ist für Drücke bis 100 bar ausgelegt. Es wurden Versuche bei den Drücken 2, 10, 20, 50 und 100 bar, bei Massenstromdichten zwischen 70 und 280 kg/m<sup>2</sup>s, bei Wärmestromdichten zwischen 20 und 100 kW/m<sup>2</sup> und bei Neigungswinkeln zwischen 0° und 45° durchgeführt. Die Strömungsformen wurden durch das optische Meßsystem simultan an 12 Stellen in Strömungsrichtung während der Verdampfung gemessen.

Bei der Versuchsauswertung wurden die Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf die Ausbildung von Strömungsformen untersucht. Die Analyse des Neigungswinkeleinflusses zeigte, daß es zu deutlichen Strömungsformänderungen bei Winkeln zwischen 0,1° und 0,4° kommt, wenn im horizontalen Rohr eine geschichtete Strömungsform vorliegt. Oberhalb dieses Grenzwinkels dominieren Schwallströmungen. Die Schwallfrequenzen nehmen mit dem Neigungswinkel zu. Der Einfluß des Druckes, des Massenstromes und des Wärmestromes wurde für das horizontale Rohr untersucht. Mit steigendem Druck nehmen unabhängig vom Wärmestrom die Schwallanteile in der Strömung ab. Bei steigenden Massenstromdichten steigen die Zeitabschnitte mit schwallstrukturierter Strömung an. Die Untersuchung des Wärmestromeinflusses zeigte, daß sich in der Mehrzahl der Fälle die Strömungsformenbereiche entsprechend ihrem Dampfmassegehalt verschieben, so daß der Einfluß der Wärmezufuhr auf die Änderung von Strömungsformen, betrachtet bei gleichen Dampfmassegehalten, gering ist. Die Schwallfrequenzen steigen für alle Drücke mit steigendem Wärmestrom.

Die Anwendbarkeit der Strömungsformenkarte des VDI-Wärmeatlas auf die Dampf/Wasser-Zweiphasenströmung wurde durch einen Vergleich der Karte mit ca. 850 Meßpunkten untersucht. Die Übereinstimmung von Meßdaten mit der Karte steigt mit steigenden Drücken an. Es wurde gezeigt, daß die aus den Modellen abgeleiteten Grenzkurven für den Übergang von Wellen- zu Schwallströmungen und von Blasen- zu Pfropfenströmungen nicht anwendbar sind. Für eine empirische Strömungsformenkarte stellten sich die auf Leerrohrgeschwindigkeiten basierenden Auftragungsarten als nicht geeignet heraus. Es wurde eine neue empirische Strömungsformenkarte unter Verwendung einer modifizierten Froude-Zahl und eines Eigenchaftsparameters erstellt.

## Experimental Investigations of Flow Patterns in Horizontal and Inclined Evaporator Tubes

### Abstract

The knowledge of flow patterns is necessary for the design of evaporator tubes. The methods of calculation used nowadays do not allow a reliable prediction of flow patterns in diabatic steam/water two-phase flow. In order to provide a basis for the development of new models, experimental investigations have been carried out.

A new optical measuring system has been developed for the non-intrusive detection of flow patterns in heated metal tubes. The measuring principle is based on absorption and scattering effects of light interacting with the phases. The ability of the system to detect flow patterns was proved by a comparison of visually observed flow patterns with signal characteristics. The flow pattern determination was automated by means of a computer-aided signal pattern recognition which enables high hit rates. The features which have been worked out (derived from the amplitude, time and frequency domain) were used to classify as well as detect transitions between flow patterns. The optical and mechanical design allows the application in diabatic two-phase flow up to pressures of 13 MPa and temperatures of 400 °C.

A newly developed experimental plant allowed investigations of flow patterns in a horizontal and inclined evaporator tube using a single-phase inlet flow. Influences of peripheral components on the two-phase flow were minimised. The steel measuring section is designed for pressures up to 10 MPa, the inner diameter is 15.7 mm and the length 5 m. Experiments were performed at pressures of 0.2, 1, 2, 5 and 10 MPa, at mass fluxes between 70 and 280 kg/m<sup>2</sup>s, at heat fluxes between 20 and 100 kW/m<sup>2</sup> as well as at inclination angles between 0° and 45°. Flow patterns were detected simultaneously at 12 cross-sections in the flow direction using the optical measuring system.

The influence of different parameters on the formation of flow patterns were investigated by evaluating the experimental data. The analysis of the influence of inclination showed that flow pattern changes occur at angles between 0.1° and 0.4° if the flow pattern in the horizontal tube is stratified. Above this threshold angle slug flow dominates. The slug frequencies increase as inclination angles increase. The influence of pressure, mass flux and heat flux was investigated for the horizontal tube. Increasing pressure leads to a decrease of slugs in the flow, independent of the heat flux. Increasing mass flux leads to an increase of slugs in the flow. The investigation of the influence of heat flux showed that in most cases the ranges of flow patterns shift according to the quality. Therefore, the influence of heat flux on the change of flow patterns is low if examined at constant quality. The slug frequencies increase as heat flux increases.

The applicability of the flow pattern map of the VDI Heat Atlas (based on the map of Taitel and Dukler) for the diabatic two-phase flow was investigated by comparing the map with 850 measured data points. The agreement of the measured data with the map increases as pressure increases. It was shown that the models describing the transition from wavy flow to slug flow and from bubbly flow to plug flow are not applicable. The coordinates based on superficial velocities are shown to be unsuitable for an empirical flow pattern map. A new empirical flow pattern map is presented using a modified Froude number and a dimensionless parameter.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literaturübersicht über Strömungsformen in nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen .....	1
1.2 Literaturübersicht über Meßtechniken zur Strömungsformbestimmung .....	4
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	7
<b>2 Meßsystem zur Bestimmung von Strömungsformen .....</b>	<b>9</b>
2.1 Beschreibung des Meßprinzips .....	9
2.2 Entwicklung des Meßsystems .....	10
2.2.1 Auswahl des Wellenlängenbereichs .....	10
2.2.2 Auswahl von Lichtquelle und Sensor.....	14
2.2.3 Lichtführung mit Hilfe von Linsen.....	16
2.2.4 Lichtführung mit Hilfe von Lichtwellenleitern .....	17
2.2.5 Optische Analyse.....	19
2.2.6 Mechanische Konstruktion.....	20
2.3 Funktionsnachweis des Meßsystems .....	22
2.3.1 Nachweis der Strömungsformerkennung bei Atmosphärendruck.....	22
2.3.2 Nachweis der mechanischen Stabilität und der Strömungsformerkennung bei erhöhtem Druck .....	31
2.4 Automatische Strömungsformbestimmung durch Signalmustererkennung .....	33
2.4.1 Vorgehensweise.....	34
2.4.2 Merkmalextraktionsphase .....	34
2.4.2.1 Merkmale im Amplitudenbereich .....	35
2.4.2.2 Merkmale im Zeitbereich .....	42
2.4.2.3 Merkmale im Frequenzbereich.....	46
2.4.3 Vorbereitungsphase .....	50
2.4.4 Klassifizierungsphase .....	51
2.4.5 Bewertung und Grenzen der Mustererkennung.....	53
<b>3 Versuchsstand zur Untersuchung von Strömungsformen in Verdampferrohren.....</b>	<b>54</b>
3.1 Kreislauf.....	54
3.1.1 Vorheiz- und Druckaufbausystem .....	57
3.1.2 Meßstrecke .....	58
3.1.3 Druckabbau- und Kühlsystem .....	60
3.1.4 Sicherheitseinrichtungen .....	62

3.2 Meßtechnik .....	62
3.2.1 Meßtechnik an der Meßstrecke .....	62
3.2.2 Meßtechnik außerhalb der Meßstrecke.....	66
3.2.3 Meßwerterfassung .....	67
3.2.4 Kalibrierung und Fehler der Meßeinrichtungen .....	67
<b>4 Versuchsergebnisse.....</b>	<b>69</b>
4.1 Versuchsdurchführung .....	69
4.1.1 Versuchsvorbereitung.....	69
4.1.2 Anlagentests .....	70
4.1.3 Versuchsparameter .....	72
4.2 Einfluß des Neigungswinkels auf die Strömungsform .....	73
4.3 Parametereinflüsse im horizontalen Rohr.....	78
4.3.1 Einfluß des Druckes .....	79
4.3.2 Einfluß der Massenstromdichte.....	81
4.3.3 Einfluß der Wärmestromdichte .....	82
4.4 Vergleich von Meßdaten mit einer Strömungsformenkarte.....	86
4.4.1 Wellen- und Schwallströmungen .....	92
4.4.2 Blasen-, Pfropfen-, Schichten- und Ringströmungen.....	95
4.4.3 Überprüfung der Wellen-Schwall-Grenzkurve .....	99
4.5 Empirische Strömungsformenkarte .....	101
<b>5 Schlußfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>108</b>
5.1 Schlußfolgerungen .....	108
5.2 Ausblick.....	110
<b>6 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>112</b>
<b>Anhang: Optimierung der Lichtwellenleiter .....</b>	<b>118</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Meßprinzip des optischen Meßsystems zur Strömungsformbestimmung, Schnitt durch den Meßquerschnitt .....	9
Abb. 2-2: Elektromagnetisches Spektrum mit Wellenlängenbereichen passender Absorptionskoeffizienten (I - IV) für Wasser .....	12
Abb. 2-3: Absorptionsspektrum von flüssigem Wasser und Absorptionsbanden von Wasserdampf im Nahinfrarotbereich .....	13
Abb. 2-4: Relative spektrale Intensität des Senders und Empfängers und Absorptionsspektrum von Wasser.....	15
Abb. 2-5: Relative spektrale Intensität des Lichtes nach Durchtritt durch eine Dampf- und Wasserschicht von 3 cm ( $P_s=1$ bar) .....	16
Abb. 2-6: Optische Komponenten und Strahlengang für die Lichtführung durch 4 Linsen .....	17
Abb. 2-7: Schnitt durch das Verdampferrohr mit optischen Komponenten für die Lichtführung durch Lichtwellenleiter .....	18
Abb. 2-8: Strahlengang in Dampf, Wasser und Dampf/Wasser für einen Strömungskanal mit $d=15$ mm .....	19
Abb. 2-9: Schnitt durch eine Einschraubung in die Rohrwand .....	21
Abb. 2-10: Versuchsaufbau zum Nachweis der Strömungsformerkennung mit den horizontalen und vertikalen Einschraubungen und der Zweiphasenströmung .....	23
Abb. 2-11: Strahlengang durch eine von Wasser umgebene Dampfblase .....	24
Abb. 2-12: Strahlengang durch ein Wellenberg und ein Wellental (vertikaler Strahlengang) ...	25
Abb. 2-13: Einphasenströmung (Wasser) mit zugehörigen optischen Signalen .....	27
Abb. 2-14: Blasenströmung mit zugehörigen optischen Signalen .....	27
Abb. 2-15: Pfropfenströmung mit zugehörigen optischen Signalen .....	28
Abb. 2-16: Schichtenströmung mit zugehörigen optischen Signalen.....	28
Abb. 2-17: Wellenströmung mit zugehörigen optischen Signalen.....	29
Abb. 2-18: Schwallströmung mit zugehörigen optischen Signalen .....	29
Abb. 2-19: Wellen-Schwallströmung mit zugehörigen optischen Signalen.....	30
Abb. 2-20: Ringströmung mit zugehörigen optischen Signalen.....	30
Abb. 2-21: Autoklav mit zwei Einschraubungen für Tests bei erhöhtem Druck .....	31
Abb. 2-22: Änderung der Intensität als Funktion des Druckes bei gesättigtem Wasser und Wasserdampf.....	32
Abb. 2-23: Intensitätsverhältnis Wasser/Dampf bei Sättigungsbedingungen als Funktion von Druck und Temperatur.....	33
Abb. 2-24: Vorgehensweise bei der Mustererkennung .....	34
Abb. 2-25: Vorgehensweise in der Merkmalextraktionsphase .....	35
Abb. 2-26: Vertikales Signal für eine Blasenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung.....	36
Abb. 2-27: Vertikales Signal für eine Pfropfenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung.....	37
Abb. 2-28: Vertikales Signal für eine Schichtenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung.....	37
Abb. 2-29: Vertikales Signal für eine Wellenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung.....	38
Abb. 2-30: Vertikales Signal für eine Schwallströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung.....	38
Abb. 2-31: Vertikales Signal für eine Wellen-Schwallströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung.....	39
Abb. 2-32: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Lage Maximum' .....	40
Abb. 2-33: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Maximumsüberhöhung' .....	40
Abb. 2-34: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Maximumsüberhöhung unten' .....	41

Abb. 2-35: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Arithmetischer Mittelwert' .....	41
Abb. 2-36: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Standardabweichung' .....	42
Abb. 2-37: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung mit Grenzgerade und Durchgangsverteilung nach unten .....	43
Abb. 2-38: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Peaks nach unten' .....	43
Abb. 2-39: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Peaks nach oben' .....	44
Abb. 2-40: Optisches Signal mit Glättungskurve und Durchgangsverteilung .....	45
Abb. 2-41: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Peaks durch Glättung' .....	45
Abb. 2-42: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Kreuzkorrelationskoeffizient' .....	46
Abb. 2-43: Fouriertransformation des optischen Signals für die Blasenströmung nach Abb. 2-26 .....	47
Abb. 2-44: Fouriertransformation des optischen Signals für die Pfropfenströmung nach Abb. 2-27 .....	47
Abb. 2-45: Fouriertransformation des optischen Signals für die Wellenströmung nach Abb. 2-29 .....	47
Abb. 2-46: Fouriertransformation des optischen Signals für die Schwallströmung nach Abb. 2-30 .....	48
Abb. 2-47: Fouriertransformation des optischen Signals für die Wellen-Schwallströmung nach Abb. 2-31 .....	48
Abb. 2-48: Optisches Signal mit Glättungskurve, Grenzgerade und Durchgangsverteilung .....	49
Abb. 2-49: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Schwallperiode' .....	49
Abb. 2-50: Vorgehensweise in der Vorbereitungsphase .....	50
Abb. 2-51: Konstruktion der Zugehörigkeitsfunktion durch Anpassung eines Trapezes an die Häufigkeitsverteilung .....	51
Abb. 2-52: Zugehörigkeitsfunktionen des Merkmals 'Peaks nach unten' für die Wellen- und Schwallströmung .....	51
Abb. 2-53: Vorgehensweise in der Klassifizierungsphase .....	52
Abb. 2-54: Vorauswahl für Einphasen-, Schichten- und Ringströmungen .....	52
Abb. 3-1: Kreislaufschema des Versuchsstandes .....	55
Abb. 3-2: Versuchsstand in horizontaler und geneigter Position .....	56
Abb. 3-3: Tastschnittdiagramme des Meßrohres. Minimale, mittlere und maximale Rohrrauigkeit .....	58
Abb. 3-4: Endoskopaufnahme der Rohrwand mit Längs- und Querriefen .....	59
Abb. 3-5: Schnitt durch das Verdampferrohr mit Nuten .....	59
Abb. 3-6: Hochdruck-Dampfabscheider .....	61
Abb. 3-7: Dampfdruckventil mit Kondensator .....	61
Abb. 3-8: Instrumentierung der Meßstrecke .....	64
Abb. 3-9: Einschraubungen der optischen Meßtechnik und Druckmeßumformer an der Meßstrecke .....	65
Abb. 3-10: Position und Bezeichnung der Thermoelemente an der Meßstrecke .....	65
Abb. 3-11: Schnitt durch eine Meßposition mit Bohrungen für die Einschraubungen der optischen Meßtechnik 'O', für die Temperaturmessungen 'T' und für die Druckmessungen 'p' .....	66
Abb. 4-1: Optische Signale und Drucksignal ohne Dampf-Wasser-Trennung .....	71
Abb. 4-2: Optisches Signal und Drucksignal mit Dampf-Wasser-Trennung .....	71
Abb. 4-3: Optisches Signal und Temperatursignale im horizontalen Rohr (Wellenströmung) .....	74
Abb. 4-4: Optisches Signal und Temperatursignale bei 0.3° Neigung (Wellen-Schwallströmung) .....	74

Abb. 4-5: Optisches Signal und Temperatursignale bei 1° Neigung (Wellen-Schwallströmung) .....	75
Abb. 4-6: Optisches Signal und Temperatursignale bei 3° Neigung (Wellen-Schwallströmung) .....	75
Abb. 4-7: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung im horizontalen Rohr.....	76
Abb. 4-8: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei 3° Neigung.....	76
Abb. 4-9: Optisches Signal einer Schwallströmung im horizontalen Rohr.....	77
Abb. 4-10: Optisches Signal einer Schwallströmung bei 45° Neigung.....	77
Abb. 4-11: Anteil der geschichteten Strömungsformen an der Gesamtzahl von 850 gemessenen Strömungsformen im horizontalen Rohr als Funktion von Druck und Massenstromdichte.....	79
Abb. 4-12: Optische Signale bei verschiedenen Drücken, Änderung der Strömungsform von einer Wellen-Schwallströmung zu einer Wellenströmung ( $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ ).....	80
Abb. 4-13: Optisches Signal bei $\dot{m} = 70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 13 \%$ , $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ , $P = 10 \text{ bar}$ (Wellenströmung) .....	81
Abb. 4-14: Optisches Signal bei $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 13 \%$ , $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ , $P = 10 \text{ bar}$ (Wellen-Schwallströmung) .....	81
Abb. 4-15: Optisches Signal bei $\dot{m} = 280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 13 \%$ , $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ , $P = 10 \text{ bar}$ (Schwallströmung) .....	81
Abb. 4-16: Schematische Darstellung der Strömungsformen im Rohr bei verschiedenen Wärmestromdichten ( $P = 50 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ).....	83
Abb. 4-17: Optisches Signal an der Position 2 m bei $P = 50 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 4 \%$ , $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ (Wellenströmung) .....	83
Abb. 4-18: Optisches Signal an der Position 1 m bei $P = 50 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 4 \%$ , $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$ (Wellenströmung) .....	83
Abb. 4-19: Optisches Signal an der Position 4 m bei $P = 50 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 16 \%$ , $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$ (Wellen-Schwallströmung) .....	84
Abb. 4-20: Optisches Signal an der Position 2 m bei $P = 50 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 16 \%$ , $\dot{q} = 80 \text{ kW/m}^2$ (Wellen-Schwallströmung) .....	84
Abb. 4-21: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei $P = 10 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 6 \%$ , $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$ .....	85
Abb. 4-22: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei $P = 10 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 6 \%$ , $\dot{q} = 80 \text{ kW/m}^2$ .....	85
Abb. 4-23: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei $P=2 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 71 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 15 \%$ , $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ .....	86
Abb. 4-24: Optisches Signal einer Wellenströmung bei $P=2 \text{ bar}$ , $\dot{m} = 71 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $\dot{x} = 15 \%$ , $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$ .....	86
Abb. 4-25: Strömungsformenkarte nach Taitel und Dukler [9] mit Meßpunkten für das Kältemittel R402 nach Kattan et. al.[71] .....	87
Abb. 4-26: Strömungsformenkarte nach Steiner [7] (VDI-Wärmeatlas [8]) mit Meßpunkten für die Kältemittel R12 und R22 .....	88
Abb. 4-27: Legende für die Meßpunkte in den Strömungsformenkarten.....	91
Abb. 4-28: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen, Schwallströmungen und Wellen-Schwallströmungen bei $p = 2 \text{ bar}$ .....	92
Abb. 4-29: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen, Schwallströmungen und Wellen-Schwallströmungen bei $p = 10 \text{ bar}$ .....	93

Abb. 4-30: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen, Schwallströmungen und Wellen-Schwallströmungen bei $p = 20$ bar .....	93
Abb. 4-31: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen, Schwallströmungen und Wellen-Schwallströmungen bei $p = 50$ bar .....	94
Abb. 4-32: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen, Schwallströmungen und Wellen-Schwallströmungen bei $p = 100$ bar .....	94
Abb. 4-33: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten-, Ring-, Blasen- und Pfropfenströmungen bei $P = 2$ bar .....	96
Abb. 4-34: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten-, Blasen- und Pfropfenströmungen bei $p = 10$ bar .....	97
Abb. 4-35: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten-, Blasen- und Pfropfenströmungen bei $p = 20$ bar .....	97
Abb. 4-36: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten-, Blasen- und Pfropfenströmungen bei $p = 50$ bar .....	98
Abb. 4-37: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten-, Blasen- und Pfropfenströmungen bei $p = 100$ bar .....	98
Abb. 4-38: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Strömungsformübergang bei $P = 50$ bar, $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	99
Abb. 4-39: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Strömungsformübergang bei $P = 100$ bar, $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	100
Abb. 4-40: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Strömungsformübergang bei $P = 2$ bar, $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	101
Abb. 4-41: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit einer Froude-Zahl und des Martinelli-Parameter .....	102
Abb. 4-42: Optisches Signal für eine Schwallströmung bei $p = 10$ bar, $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Kennzahlen: $Fr^{0.5} = 0.73$ , $X = 0.51$ .....	103
Abb. 4-43: Optisches Signal für eine Wellenströmung bei $p = 100$ bar, $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Kennzahlen: $Fr^{0.5} = 0.73$ , $X = 0.51$ .....	103
Abb. 4-44: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit der Leerrohrgeschwindigkeiten... ..	103
Abb. 4-45: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit der spezifischen kinetischen Energien nach Hewitt und Roberts [76].....	104
Abb. 4-46: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit der Wallis-Parameter.....	105
Abb. 4-47: Empirische Strömungsformenkarte mit 800 Meßpunkten in Abhängigkeit einer modifizierten Froude-Zahl und eines Eigenschaftsparameters .....	106

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Notwendiger Bereich der Absorptionskoeffizienten für die Erfüllung des Meßprinzips bei verschiedenen Rohrdurchmessern .....	11
Tab. 2-2: Wellenlängenbereiche mit passenden Absorptionskoeffizienten .....	11
Tab. 2-3: Brechungsindizes für die Bereiche II-IV.....	12
Tab. 2-4 Absorption von gesättigtem Wasserdampf für die Bereiche II-III .....	12
Tab. 2-5: Absorptionskoeffizienten von gesättigtem Wasserdampf und Absorptionsverhältnisse im Nahinfrarotbereich. Werte berechnet nach [49,54].....	14
Tab. 2-6: Zusammenfassung der Merkmale zur Signalmustererkennung .....	50
Tab. 2-7: Kriterien für die Klassifizierung von Strömungsformen .....	53
Tab. 4-1: Dichteverhältnis Wasser/Dampf bei verschiedenen Drücken.....	72
Tab. 4-2: Übereinstimmung von Meßwerten mit der Strömungsformenkarte nach VDI-Wärmeatlas bei verschiedenen Drücken. Basis: 700 Meßwerte .....	95

## Nomenklatur

### Lateinische Buchstaben

a	[-]	Anzahl (Meßwerte)
A	[-]	Absorption
A	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
C	[-]	Kreuzkorrelationskoeffizient
d	[m]	Durchmesser
Eu	[-]	Euler-Zahl
f	[m]	Brennweite
f	[-]	Querschnittsanteil einer Phase
Fr	[-]	Froude-Zahl
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
G	[V],[%]	Grenzwert für das Signal
h	[m]	Mittlere Flüssigkeitshöhe
i	[-]	Laufindex
I	[W/m <sup>2</sup> ]	Intensität
j	[-]	Wallis-Parameter
L	[W/m <sup>2</sup> sr]	Strahldichte
m	[kg/m <sup>2</sup> s]	Massenstromdichte
M	[kg/s]	Massenstrom
n	[-]	Brechungsindex
NA	[-]	Numerische Apertur
O	[V],[%]	Meßwert des optischen Signals
P	[bar]	Druck
q	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
r	[m]	Radius
Re	[-]	Reynolds-Zahl
t	[s]	Zeit
T	[K]	Temperatur
u	[m/s]	Geschwindigkeit
U	[-]	Umfangsanteil einer Phase
We	[-]	Weber-Zahl
x	[m]	Weglänge
ẋ	[-]	Dampfmassengehalt
X	[-]	Martinelli-Parameter
y	[V],[%]	Signalwert
ȳ	[V],[%]	Mittelwert des Signals
Z	[%]	Zugehörigkeitsfunktion

### Griechische Buchstaben

α	[-]	Absorptionskoeffizient
α	[°]	Eintrittswinkel
γ	[°]	Austrittswinkel

$\delta$	[°]	Winkel des Kegelstumpfmantels
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\eta$	[Pas]	dynamische Viskosität
$\eta$	[°]	Reflexionswinkel im Lichtwellenleiter
$\theta$	[°]	Akzeptanzwinkel/Abstrahlwinkel
$\kappa$	[-]	Eigenschaftsparameter
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\xi$	[-]	Druckverlustbeiwert
$\sigma$	[N/m <sup>2</sup> ]	Oberflächenspannung
$\sigma$	[V],[%]	Standardabweichung eines Signals
$\phi$	[W]	Strahlungsleistung
$\phi$	[-]	Korrelationsfunktion

### Indizes

cl	Cladding (Mantel)
co	Core (Kern)
E	Empfänger
g	Gas (Dampf)
gs	Gas superficial (auf den Leerrohrzustand gasförmig bezogen, bezogene Geschwindigkeit)
Gm	Gemisch
Gr	Grenze
H	horizontal
i	Interface (Grenzfläche)
ls	Liquid superficial (auf den Leerrohrzustand flüssig bezogen, bezogene Geschwindigkeit)
l	Liquid (Flüssigkeit)
m	modifiziert
max	Maximalwert
s	Sättigung
S	Sender
T	total
V	vertikal
0	anfänglich

## **1 Einleitung**

Die bei einem Verdampfungsprozeß auftretende Zweiphasenströmung ist für verschiedene Industriezweige von Bedeutung. In Dampferzeugeranlagen von heutigen Kraftwerken treten die Zweiphasenströmungen ebenso auf wie in Klima- und Kühlanlagen und Dampferzeugern für die Textil- und Lebensmittelindustrie. Die Kenntnis der Strömungsformen, die während des Verdampfungs Vorganges entstehen, sind für die Auslegung und den Betrieb solcher Anlagen von besonderem Interesse, da die Wärmeübergangsraten, die Druckverluste und ferner Sicherheitsaspekte direkt an die Phasenverteilung der Zweiphasenströmung gekoppelt sind.

Horizontale oder geneigte Verdampferrohre findet man häufig in Zwangsdurchlaufkesseln von fossil befeuerten Kraftwerken, wie z. B. in BENSON-Dampferzeugern. Dort ist die Kenntnis der Strömungsform wichtig für die Auslegung der Berohrung, die für maximale Rohrwandtemperaturen bzw. Temperaturgradienten dimensioniert sein muß. Kritische Temperaturen können je nach Strömungsform durch eine Wandaustrocknung entstehen und somit ein Sicherheitsrisiko darstellen. In neuen Konzepten zum Bau von solarthermischen Kraftwerken mit Parabolrinnenkollektoren strebt man zur Erhöhung des Wirkungsgrades und zur Senkung von Kosten eine Direktverdampfung des Wassers in den Absorberrohren an. In den horizontalen oder leicht geneigten Verdampferrohren sollten geschichtete Strömungsformen vermieden werden, um die Absorberrtemperaturen bzw. die Temperaturgradienten niedrig zu halten. Durch die Kenntnis der Parameterbereiche, in denen geschichtete Strömungsformen vermieden werden, können hohe Wirkungsgrade und niedrige Materialbelastungen erreicht werden.

Im folgenden wird zunächst in einer Literaturübersicht der aktuelle Stand des Wissens zu experimentellen Untersuchungen von Strömungsformen in nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen in horizontalen oder geneigten Rohren und Meßtechniken zur Strömungsformbestimmung dargestellt und daraus folgernd die Zielsetzung dieser Arbeit definiert.

### **1.1 Literaturübersicht über Strömungsformen in nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen**

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zu Strömungsformen in Zweiphasenströmungen in horizontalen oder geneigten Rohren mit Wärmezufuhr konzentrieren sich auf Kältemittel, da in der Kältetechnik ein Interesse an den Zusammenhängen zwischen Wärmeübergangskoeffizienten, Druckverlusten und Strömungsformen existiert. In der folgenden Literaturübersicht werden für horizontale und geneigte Rohre zuerst die Untersuchungen mit Kältemitteln und Stickstoff und danach die Untersuchungen mit Wasser beschrieben.

Untersuchungen zur Verdampfung des Kältemittels R22 in horizontalen Glasrohren mit einem Innendurchmesser von 12 mm und einer Länge von 560 mm mit drei 180°-Rohrbögen werden von Zahn [1] beschrieben. Vor der mit Wasser beheizten Beobachtungsstrecke wurde eine Vorverdampfung vorgenommen. Ein Vergleich der Meßdaten mit der Strömungsformenkarte nach Baker [2] zeigte eine gute Übereinstimmung. Es



wird von einem erheblichen Einfluß der Rohrbögen auf die Strömung berichtet, so daß die Übertragbarkeit auf andere Versuchsanordnungen fragwürdig erscheint.

Noerager und Chaddock [3] führten Experimente von verdampfendem R12 in horizontalen Rohren aus rostfreiem Stahl mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 2 m durch. Vor der Meßstrecke wurde durch einen Vorverdampfer der gewünschte Dampfgehalt eingestellt. Die Autoren versuchten, die Strömungsformen durch Wandtemperaturmessungen zu bestimmen. Es wird von einem Übergang von geschichteten Strömungsformen zu Ringströmungen bei steigenden Massen- und Wärmestromdichten berichtet. Jedoch sind an der Erfassung von Ringströmungen durch Wandtemperaturmessungen Zweifel angebracht, da durch die verwendete Meßtechnik nicht zwischen schnellen Schwallströmungen und Ringströmungen unterschieden werden kann.

Chawla [4] untersuchte den Wärmeübergang und den Druckabfall des Kältemittels R11 in horizontalen Kupferrohren mit den Durchmessern 6 mm, 14 mm und 25 mm. Durch einen Vorverdampfer wurde der Eintrittsdampfgehalt in die Meßstrecke eingestellt. Die Strömungsform wurde visuell durch ein Schauglas, das sich an die beheizte Meßstrecke anschloß, bestimmt. Die unter adiabaten Bedingungen bestimmten Strömungsformen werden in Meßwerttabellen angegeben. Der Autor berichtet nicht von Schwallströmungen, sondern von einem direkten Übergang von einer Wellenströmung in eine Ringströmung.

Schmidt [5] untersuchte die Verdampfung des Kältemittels R12 in Kupfer- und Nickelrohren mit 14 mm Innendurchmesser, einer beheizten Länge von 216 mm und einer Beruhigungsstrecke vor der Meßstrecke von 3 m. Zur Erzeugung verschiedener Dampfgehalte waren Vorverdampfer vor der Meßstrecke vorhanden. Ein Schauglas ermöglichte die visuelle Bestimmung der Strömungsformen hinter der Meßstrecke. Der Autor gibt an, daß die Strömungsform sich durch die thermische Schutzstrecke zwischen Meßstrecke und Schauglas verändern kann. Schmidt beobachtete eine Unterdrückung von Schwällen ab einer kritischen Wärmestromdichte. Die Untersuchung des Einflusses der Vorgeschichte der Strömung auf die Wärmeübergangskoeffizienten zeigte, daß nach 214 Innendurchmessern Lauflänge Strömungen mit Schwallanteilen noch nicht hydrodynamisch voll ausgebildet waren.

Auch Ha und Bergles [6] untersuchten R12 in einem horizontalen Verdampferrohr. Der Durchmesser des Kupferrohres betrug 8 mm und die Länge 1.2 m. Durch einem Vorverdampfer wurde der Eintrittsdampfgehalt in die Meßstrecke eingestellt und die Strömungsform durch ein Sichtglas hinter der Meßstrecke visuell bestimmt. Es wurde bei steigenden Massenstromdichten ein Übergang von einer Schichten- in eine Wellenströmung und schließlich in eine Ringströmung beobachtet.

Steiner [7] und [8] hat Meßdaten von Strömungsformen in verdampfenden Kältemitteln (R12 und R22) in eine vom Autor modifizierte Strömungsformenkarte von Taitel und Dukler [9] für das horizontale Rohr eingezeichnet. Steiner hat eine Überarbeitung der Grenzkurve zwischen der Wellen- und der Schwall-, Pfropfen- oder Rinströmung vorgenommen. Bei der Annahme von Grenzbandern statt Grenzlinien beschreibt der Autor eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Meßdaten.

Kattan et. al. [10] haben Strömungsformen neuer Kältemittel (R123, R134a, R502, R402A und R404A) in einem Sichtglas beobachtet, das am Ende einer horizontalen Verdampferstrecke aus Kupfer mit einem Innendurchmesser von 12 mm und einer Länge von 3 m angebracht war. Keines der von den Autoren durch einen Vergleich mit Meßdaten überprüften Modelle für den Übergang von geschichteten zu ungeschichteten Strömungsformen lieferte gute Resultate. Der Vergleich von Meßdaten mit der häufig verwendeten Strömungsformenkarte von Taitel und Dukler [9] zeigte eine schlechte Übereinstimmung. Ein Vergleich von gemessenen Strömungsformen mit der Strömungsformenkarte von Steiner im VDI-Wärmeatlas [8] führte zu guten Übereinstimmungen.

Steiner [11] führte Experimente zur Verdampfung von flüssigem Stickstoff bei verschiedenen Drücken in horizontalen Kupferrohren durch. Vor der Meßstrecke wurde eine Vorverdampfung vorgenommen. Die Strömungsformen wurden durch eine transparente Beobachtungsstecke zwischen Vorverdampfer und Meßstrecke visuell bestimmt. Der Autor gibt die Strömungsformen vor der Meßstrecke in Form von Meßwerttabellen an; Strömungsformen während des Verdampfungsvorganges wurden nicht bestimmt.

M. Müller [12] untersuchte Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen mit Wärmezufuhr in einem Versuchsstand, der konstruktiv auf den Spezialfall eines Absorberrohres eines Parabolrinnen-Solarkollektors abgestimmt ist. Das Versuchsrohr mit einem Innendurchmesser von 25 mm und einer Länge von 10 m ist um  $8^\circ$  gegen die Horizontale geneigt und besitzt mehrere Rohrbögen. Zur Erzeugung verschiedener Dampfgehalte wurde eine Vorvermischung von Dampf und Wasser vorgenommen. Mit Hilfe eines Röntgen-Densitometers wurden die Strömungsformen während des Verdampfungsvorganges gemessen. Der Autor untersuchte den Umschlag von intermittierender Strömung in eine Ring- oder Schichtenströmung. Ein Vergleich der Rechenvorschrift für die Grenzkurve von Taitel [13] mit den Meßwerten zeigte eine gute Übereinstimmung für Drücke zwischen 60 und 100 bar und verschiedenen Beheizungsarten. Durch die Untersuchung des Umschlages zwischen Schichten- und Ringströmung für gleichförmige Beheizung bei Drücken zwischen 20 und 140 bar wurden eindeutige Abweichungen gegenüber dem Modell von Taitel deutlich. Durch eine Modifikation des Modells konnten die experimentellen Daten besser wiedergegeben werden. Die beschriebenen Strömungsformübergänge sind aufgrund der speziellen Versuchsstandkonstruktion nicht ohne weiteres auf andere Versuchsanordnungen übertragbar.

Kefer [14] führte experimentelle Untersuchungen zur Verdampfung von Wasser in Rohren im Parameterbereich von fossil befeuerten Zwangsdurchlaufdampferzeugern durch. Neben horizontalen Rohren untersuchte er die Neigungswinkel  $15^\circ$  und  $30^\circ$  sowie vertikale Rohre mit den Durchmessern 12 mm und 25 mm bei Drücken zwischen 25 und 200 bar. Die Experimente zielten insbesondere auf die Wandtemperaturverteilung während des Verdampfungsprozesses zur Bestimmung von Ort und Form der Siedekrise. Über die Wandtemperaturmessungen konnte der Ort der Austrocknung der Rohrrinnenwand festgestellt werden, detaillierte Informationen über Strömungsformen jedoch nicht gewonnen werden. Die Wandtemperaturmessung erlaubt beispielsweise keine Unterscheidung zwischen schnellen Schwallströmungen und Ringströmungen oder zwischen Schichten- und Wellenströmungen.

Reimann und Mitarbeiter [15], [16] und [17] untersuchten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen in unbeheizten Rohren mit Innendurchmessern von 50 mm, 66 mm und 103 mm bei Drücken zwischen 15 und 100 bar. Durch eine traversierbare Impedanzsonde wurden Strömungsformen gemessen. Ein Vergleich von Profilen der Volumenanteile mit (auch adiabaten) Luft/ Wasser-Zweiphasenströmungen zeigte eine ähnliche Verteilung. Obwohl es sich um adiabate Zweiphasenströmungen handelt, ist auch für Verdampfungsvorgänge interessant, daß sowohl bei kleinen als auch bei großen Rohrdurchmessern mit steigendem Druck der Parameterbereich für das Auftreten von Schwallströmungen kleiner wird.

In einer ähnlichen Versuchsanordnung untersuchten Nakamura et. al. [18] den Umschlag von separierter zu intermittierender Strömung für adiabate Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen in Rohren großer Durchmessern (87 mm und 180 mm) bei Drücken zwischen 30 und 120 bar. Auch in diesen Versuchen zeigte sich, daß mit steigendem Druck weniger Schwallströmungen vorzufinden sind.

## **1.2 Literaturübersicht über Meßtechniken zur Strömungsformbestimmung**

In den letzten Jahrzehnten sind zahlreiche Meßverfahren zur Strömungsformerkennung entwickelt worden. Die Motivation zur Entwicklung geeigneter Meßverfahren kam dabei aus der Reaktortechnik, wo die Kenntnis der Phasenverteilung in Leichtwasserreaktoren wichtig für den Betrieb und für die Analyse eines Kühlmittelverluststörfalls ist, aus der Verfahrenstechnik zur Beherrschung von Siede- und Kondensationsvorgängen und aus der Öl- und Gasindustrie, wo die bei der Förderung von Erdöl-Erdgasgemischen auftretenden Zweiphasenströmungen untersucht und überwacht werden.

Die häufigste Methode zur Bestimmung der Strömungsform ist die Beobachtung in transparenten Rohrstrecken. Nach Hewitt [19] wird zur Dokumentation bei schnellen Strömungsvorgängen häufig die Hochgeschwindigkeitsphotographie eingesetzt. Durch Lichtstreuung und Lichtbrechung an den Phasengrenzflächen kann die Struktur der Strömungsform schwer zu erkennen sein. In diesem Fall kann die Röntgenphotographie eingesetzt werden, die nach Barthels [20] auch für lichtundurchlässige Materialien geeignet ist. Delhaye [21] beschreibt Visualisierungsverfahren zur Sichtbarmachung der Phasenverteilung. Bei Verdampfungsvorgängen können aufgrund der verschiedenen Benetzungs- und Wärmeleiteigenschaften des transparenten Materials im Vergleich zu den in der Technik eingesetzten Metallrohren veränderte Strömungsbedingungen nicht ausgeschlossen werden. Dazu trägt auch die verschiedenartige Oberflächenstruktur der Materialien und die daraus folgende Siedekeimbildung bei. Weiterhin sind transparente Materialien für Hochdruck- und Hochtemperaturversuche ungeeignet.

Eine Visualisierungsmethode, die auch für Hochdruck- und Hochtemperaturversuche geeignet ist, wird von Donaldson und Pulfrey [22] beschrieben. Es wird ein endoskopähnlicher luftgekühlter Sensor in das Zweiphasengemisch gebracht und die Strömungsvorgänge über eine Kamera auf einem Videoband aufgezeichnet. Nakamura et. al. [23] entwickelten einen ungekühlten Sensor für Drücke bis 180 bar und Temperaturen bis 360 °C. Die Sensoren stellen leider eine erhebliche Störung der Strömung dar.

Lokalsonden werden in den Strömungskanal gebracht und liefern als zeitabhängiges Signal die Information, ob sich Dampf oder Flüssigkeit an der Sonde befindet. Spindler [24] beschreibt, wie durch eine Signalanalyse der entstehenden Signale zwischen Strömungsformen in vertikalen Strömungen unterschieden werden kann. Zur Bestimmung der Strömungsform in horizontalen Strömungen, wo es häufig zu geschichteten Phasenverteilungen kommt, müßte die Lokalsonde traversierbar sein. John und Reimann [17] beschreiben eine traversierbare Impedanzsonde für Hochdruck- und Hochtemperaturversuche. Bei transienten Vorgängen kann die Interpretation der Signale bedingt durch die langsame Traversierungsgeschwindigkeit schwierig sein. Alternativ können mehrere Sonden an einem Meßquerschnitt angebracht werden, was jedoch zu einer Störung der Strömung führen würde. Zur Erfassung der flüssigen und der dampfförmigen Phase werden verschiedene physikalische Effekte ausgenutzt. Hitzdrahtanemometer verwenden nach Delhaye [25] einen elektrisch beheizten Draht, der in die Zweiphasenströmung ragt. Bei Betrieb mit konstantem Strom ist die Drahttemperatur abhängig vom Wärmeübergang zum Strömungsmedium. Der Wärmeübergang ist für die Flüssigkeitsphase und die Dampfphase verschieden, so daß ein phasenabhängiges Temperatursignal resultiert. Impedanzsonden detektieren die unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten der beiden Phasen durch die unterschiedliche Reflexion einer hochfrequenten elektromagnetischen Welle am Ende eines Koaxialkabels, das in die Strömung ragt, siehe z. B. U. Müller [26]. Eine von S. Müller [27] entwickelte Impedanzsonde ist für den Einsatz in Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen bei einem Druck von 150 bar und einer Temperatur von 360 °C geeignet. Optische Lokalsonden reagieren nach Delhaye und Jones [28] auf die verschiedenen Brechungsindizes von Dampf und Wasser. Je nach Ausführungsart werden Glasstäbe oder optische Fasern verwendet, die häufig an der Spitze konisch angeschliffen werden. In der Dampfphase wird das Licht an der Konusfläche totalreflektiert und ein hohes Signal wird von einem Sensor registriert. In der flüssigen Phase tritt das Licht durch den geringeren Unterschied der Brechungsindizes zwischen Glas und Flüssigkeit aus der Konusfläche aus, wodurch ein niedriges Signal registriert wird. Loth und Schmitt [29] beschreiben den Einsatz eines faseroptischen Sensors in Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen bei Drücken bis 18 bar und Temperaturen bis 207 °C. Delhaye et. al. [30] berichten von einem faseroptischen Sensor, der für Drücke bis 180 bar und Temperaturen bis 360 °C getestet wurde.

Die unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit von flüssiger und gasförmiger Phase wird in Widerstandssonden genutzt. In einer einfachen Anordnung wird nach Bergles [31] eine Nadel in eine vertikale Zweiphasenströmung gebracht und der elektrische Widerstand zwischen der Nadel und der Rohrwand gemessen. Dies wird durch das Anlegen einer Spannung zwischen Nadel und Rohrwand und durch die Messung des Stromes realisiert. Das zeitabhängige Stromsignal zeigt einen repräsentativen Verlauf für die Strömungsform. Samstag [32] verwendete eine Zwei-Sensor-Widerstandssonde, durch die neben der Phasendetektion auch Blasengeschwindigkeiten gemessen werden können. Das von Barnea et. al. [33] entwickelte Meßverfahren basiert auf drei in unterschiedlicher Lage angeordneten Widerstandssonden. Aus den Signalen der drei Sensoren lassen sich die Strömungsformen in horizontalen, leicht geneigten und vertikalen Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen bestimmen. Über den Einsatz in Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen bei hohen Drücken und Temperaturen wurde von den Autoren nicht berichtet. Als problematisch könnten sich die isolierten Durchführungen und der Einsatz von Materialien wie Teflon erweisen.

Kapazitive Sensoren nutzen die unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten der flüssigen und der dampfförmigen Phase. Shipp [34] beschreibt eine Anordnung mit mehreren Kondensatorplatten im Strömungskanal, wo durch Messung der Kapazitäten in Kombination mit dem Signal eines Einstrahl-Gamma-Densitometers verschiedene Strömungsformen identifiziert werden können. Die Einbauten im Strömungskanal können jedoch die Strömung erheblich stören.

Einige Autoren versuchten durch eine Analyse von Drucksignalen die Strömungsformen zu ermitteln. Hubbard und Dukler [35] konnten durch eine Analyse der spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD) der Druckfluktuationen von horizontalen Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen zwischen geschichteten, dispergierten und intermittierenden Strömungsformen, jedoch nicht zwischen Schichten- und Ringströmungen unterscheiden. Drahos et. al. [36] konnten durch eine statistische Analyse des Drucksignals zwischen allen auftretenden Strömungsformen in horizontalen Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen unterscheiden. Tutu [37] verwendete verschiedene Verfahren zur Signalanalyse von Drucksignalen erfolgreich zur Unterscheidung zwischen den Luft/Wasser-Strömungsformen in einem vertikalen Rohr. Diese Methode zur Strömungsformerkennung hat nach Rouhani und Sohal [38] jedoch keine große Akzeptanz gefunden, da die PSD-Analyse nicht nur von der Strömungsform, sondern auch von der Flüssigkeits- und Dampfgeschwindigkeit abhängt.

Ultraschallverfahren werden meistens zur Messung des Volumenanteils (Void), in wenigen Fällen auch zur Strömungsformerkennung verwendet. Morala und Chang [39] beschreiben ein Puls-Echo-Verfahren, mit dem horizontale Luft/Wasser-Strömungsformen identifiziert werden konnten. Prasser et. al. [40] entwickelten ein Mustererkennungsverfahren zur Messung von Parametern mit Ultraschall in vertikalen Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen. Die Autoren berichten über Schwierigkeiten bei der Messung von Strömungen mit hohen Gasanteilen und komplizierten Strömungsstrukturen.

Die Durchstrahlungsverfahren nutzen die verschiedene Absorption von kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung im flüssigen und im dampfförmigen Medium. Nach Schrock [41] werden als Quellen vorwiegend Radioisotope (Gammastrahlen) oder Röntgenstrahlen verwendet. Vorteilhaft für den verwendeten Wellenlängenbereich ist der bei Dampf bzw. Luft und Wasser nahezu identische Brechungsindex, wodurch eine Streuung der Strahlung im Medium vermieden wird. Da der Absorptionskoeffizient proportional zur Dichte des Mediums ist, kann durch einen Strahlungssensor die mittlere Dichte des durchstrahlten Zweiphasengemisches gemessen werden. Vince und Lahey [42] verwendeten ein Zweistrahl-Röntgensystem mit einem Referenzstrahl zur Kompensation der Intensitätsschwankungen der Röntgenröhre zur Untersuchung von vertikalen Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen. Durch die Anwendung der Momente der spektralen Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD) und der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Probability Density Function, PDF) konnten Indikatoren für verschiedene Strömungsformen gefunden werden. Bei horizontalen Strömungen werden aufgrund von Schichtungen der Phasen häufig mehrere Strahlen zur Identifizierung der Strömungsform benötigt. Lassahn et. al. [43] beschreiben einen Dreistrahl-Densitometer und fanden für verschiedene Strömungsformen charakteristische Verläufe für die PDF- und die PSD-Funktion. Löffel [44] entwickelte eine 6-Strahl-Gammadichtemessanlage, die in horizontalen Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen eingesetzt wurde. Durch die Auswertung der 6 Dichtewerte konnte eine eindeutige Strömungsformidentifikation

erreicht werden. Ein von M. Müller [12] beschriebenes Meßverfahren mit 5 Meßstrahlen und einem Referenzstrahl aus einer Röntgenröhre verwendet ein Mustererkennungsverfahren zur Identifizierung von Strömungsformen in geneigten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen bei Drücken bis 160 bar. Probleme können bei dem Meßverfahren nach M. Müller [45] bei dicken Rohrwänden auftreten, in denen die Strahlung eine zu hohe Absorption erfährt. Der Vorteil des Durchstrahlungsverfahrens liegt in der Rückwirkungsfreiheit auf die Strömung. Bei energiereicher Gammastrahlung kann es nach Schmidt [5] jedoch zu Veränderungen des Wärmeübergangs kommen. Nachteilig für das Meßverfahren sind der hohe Aufwand für Strahlenschutzmaßnahmen und die hohen Kosten des Systems.

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die Literaturübersicht über Strömungsformuntersuchungen zeigt, daß die meisten Versuche mit Kältemitteln durchgeführt wurden. Bei allen Kältemittelversuchen wurde vor der Meßstrecke eine Vorverdampfung vorgenommen, was nach Schmidt [5] einen Einfluß auf die Strömungsform in der Meßstrecke hat. Die Strömungsform wurde in den meisten Fällen nicht während des Verdampfungsprozesses, sondern nach der Meßstrecke bestimmt. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf eine Zweiphasenströmung ohne Vorverdampfung mit einem Dampf/Wassergemisch, das im Vergleich zu Kältemitteln verschiedene Stoffeigenschaften hat, ist somit nicht ohne weiteres möglich. Systematische Strömungsformuntersuchungen in verdampfendem Wasser in Metallrohren wurden in einem weiten Parameterbereich nur von M. Müller [12] durchgeführt. Die spezielle Konstruktion seines Versuchsstandes läßt jedoch eine Übertragung auf andere Anordnungen fraglich erscheinen.

Zum Vergleich mit bestehenden Modellen und zur Entwicklung von neuen Modellen zur Strömungsformvorhersage werden experimentelle Daten über das parameterabhängige Auftreten von Strömungsformen bei der Verdampfung von Wasser in Rohren benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher eine experimentelle Einrichtung zur Untersuchung von Strömungsformen während der Verdampfung von Wasser in einem horizontalen und geneigten metallischen Rohr entwickelt werden.

Zur Realisierung der Untersuchungen wird ein Meßsystem benötigt, das die Strömungsformen in dem metallischen Rohr mit Wärmezufuhr bei hohen Drücken und Temperaturen eindeutig bestimmen kann, ohne den Verdampfungsvorgang wesentlich zu stören. Aus der Literaturrecherche geht hervor, daß unter den bisher verwendeten Meßverfahren nur das Durchstrahlungsverfahren die gestellten Bedingungen erfüllt. Da die Strömungsformen sich bei nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen dynamisch durch den Verdampfungsvorgang entwickeln, muß zur Charakterisierung der Strömungszustände im Rohr die Strömungsform an mehreren Querschnitten in Strömungsrichtung gleichzeitig gemessen werden. Bei den bisher verfügbaren Durchstrahlungsverfahren verhindern die hohen Kosten meistens den mehrfachen Einbau. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Arbeit ein neues optisches Meßsystem entwickelt werden, das allen gestellten Anforderungen, eine geringe Rückwirkung auf die Strömung, Druck- und Temperaturfestigkeit und eindeutige Strömungsformerkennung, erfüllt und durch geringe Kosten den Einsatz an mehreren Stellen des Verdampferrohres ermöglicht.

Durch die Entwicklung und den Aufbau eines Versuchsstandes soll einerseits die Funktionstüchtigkeit des neuen Meßsystems unter den realen Bedingungen eines Verdampferrohres unter Beweis gestellt und andererseits die systematische Untersuchung von Strömungsformen ermöglicht werden. Bei der Konstruktion des Versuchsstandes soll versucht werden, die in der Literatur oft beschriebenen Einflüsse von peripheren Komponenten auf die Zweiphasenströmung zu minimieren. Die Versuchsparameter sollen jeweils in Anlehnung an bekannte Arbeiten und technisch relevante Anwendungen gewählt werden. Durch einen weiten Druckbereich zwischen 2 und 100 bar soll zum einen an den in Dampferzeugern und zum anderen in direktverdampfenden Solarkollektoren interessierenden Parameterbereich angeknüpft werden. Hierzu ist auch der Einfluß des Dichteverhältnisses zwischen flüssiger und dampfförmiger Phase zu beachten. Bei hohen Drücken bis 100 bar hat das gesättigte Dampf/Wassergemisch ein ähnliches Dichteverhältnis und eine ähnliche Oberflächenspannung wie Kältemittel, so daß Vergleiche mit Untersuchungen an Kältemitteln möglich werden.

Die in der Literatur beschriebenen Strömungsformenkarten zur Vorhersage von Strömungsformen basieren vorwiegend auf Messungen an unbeheizten transparenten Rohren. Jedoch werden die für adiabate Bedingungen entwickelten Strömungsformenkarten auch für Strömungen mit Wärmezufuhr verwendet (Steiner [7], Kattan et. al. [10]). In der Literatur gibt es Hinweise, daß eine Übertragung auf beheizte Strömungen nicht ohne weiteres möglich ist (z.B. Schmidt [5]). Ein Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit zu messenden Strömungsformen mit einer Strömungsformenkarte soll in einem ersten Ansatz diese Frage für Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen klären und die Gültigkeit von bestehenden Modellen überprüfen.

Mit der Entwicklung der Versuchseinrichtung und den durchzuführenden Experimenten soll somit eine Voraussetzung geschaffen werden für die Weiterentwicklung oder Neuentwicklung von Modellen zur Strömungsformvorhersage der nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen. Durch die Versuchsauswertungen soll weiterhin einen Beitrag zur Klärung des Einflusses von Druck und Massenstrom auf die Strömungsformen geleistet werden. Mit der Variation des Wärmestromes soll der Einfluß der Wärmezufuhr auf das Strömungsformaufkommen untersucht werden. Die Bestimmung von Strömungsformen bei verschiedenen Neigungswinkeln und sonst konstanten Parametern soll weiterhin den Neigungswinkeleinfluß klären.

## 2 Meßsystem zur Bestimmung von Strömungsformen

Für die Lösung der in Kapitel 1.3 beschriebenen Aufgabe ist die Entwicklung des Versuchsstandes und des Meßverfahrens zur Strömungsformerkennung gleichermaßen wichtig. Die Meßeinrichtung und ihre Funktionstüchtigkeit unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen ist jedoch eine entscheidende Voraussetzung für die Experimente, so daß die Beschreibung des Meßsystems hier der Beschreibung des Versuchsstandes vorangestellt wird.

Aus der Randbedingung eines maximalen Systemdruckes von 100 bar ergibt sich mit einem Sicherheitsaufschlag die Anforderung an ein Meßsystem, das Strömungsformen in horizontalen oder geneigten metallischen Verdampferrohren bei Drücken bis 130 bar und Rohrwandtemperaturen bis 400°C identifizieren können muß. Zur Charakterisierung der Strömungsformen während des Verdampfungsvorganges soll die simultane Bestimmung der Strömungsformen an mehreren Querschnitten möglich sein. Bisher eingesetzte Meßsysteme sind hierfür nur bedingt geeignet (vergl. Kapitel 1.2). Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein optisches Meßverfahren entwickelt, das den hier gestellten Anforderungen genügt.

### 2.1 Beschreibung des Meßprinzips

Das durch ein horizontales Rohr strömende Zweiphasengemisch wird durch einen horizontalen und einen vertikalen Strahlengang durchstrahlt (Abb. 2-1). Beide Strahlengänge sind senkrecht zur Rohrachse angebracht. Das Licht tritt jeweils mit der Intensität  $I_0$  in das Rohr ein und verläßt das Rohr mit der Intensität  $I_H(t)$  bzw.  $I_V(t)$ . Die zeitabhängigen Intensitätssignale hängen von verschiedenen physikalischen Effekten beim Durchtritt des Lichtes durch das Zweiphasengemisch ab.

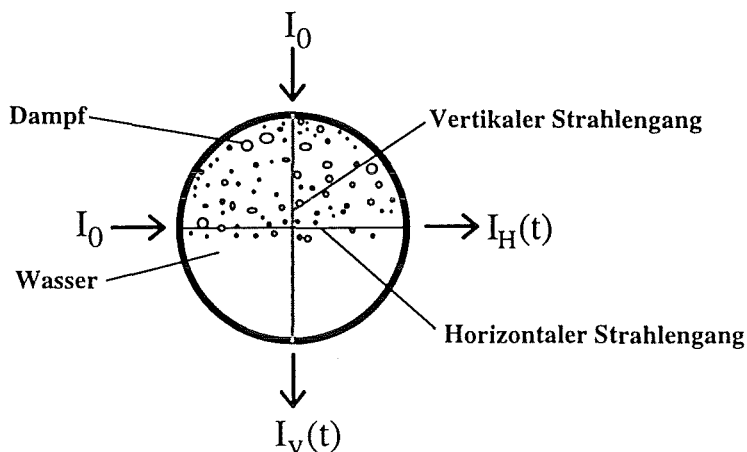


Abb. 2-1: Meßprinzip des optischen Meßsystems zur Strömungsformbestimmung, Schnitt durch den Meßquerschnitt

Die physikalischen Effekte sind dabei im wesentlichen Absorption und Streuung an Phasengrenzflächen. Das Licht erfährt beim Durchtritt durch die flüssige Phase eine höhere Absorption als beim Durchtritt durch die Dampfphase. Der Absorptionseffekt liefert also eine Information über die Anteile von durchstrahlter flüssiger und durch-



strahler gasförmiger Phase. Die Lichtstrahlen werden beim Auftreffen auf eine Phasengrenzfläche gestreut. Der Streuungseffekt liefert daher Informationen über die Oberflächenstruktur der durchstrahlten Phasengrenzflächen. Diese Zusammenhänge und weitere für die Signalverläufe relevanten physikalische Effekte werden in Kapitel 2.2.5 und 2.3 detailliert behandelt. Durch die Wahl der Wellenlänge muß die Absorption und der Brechungsindex so abgestimmt sein, daß weder der Absorptions- noch der Streuungseffekt dominiert und somit beide Effekte zum Verlauf der Intensitätssignale beitragen.

Die Intensitätssignale  $I_H(t)$  und  $I_V(t)$  werden kontinuierlich gemessen und in Diagrammen über der Zeit aufgetragen. Vergleiche mit visuell beobachteten Strömungsformen haben gezeigt, daß jeder untersuchten Strömungsform ein charakteristisches Signalmuster zugeordnet werden kann. Somit kann durch eine Signalmusterinterpretation die im Rohr vorliegende Strömungsform bestimmt werden. Beispiele für die bei den jeweiligen Strömungsformen auftretenden Signalmuster werden in Kapitel 2.3.1 gegeben.

In ersten Vorversuchen [46] wurde gezeigt, daß aus den gemessenen Signalverläufen die jeweiligen Strömungsformen ermittelt werden konnten. Die in den Vorversuchen verwendete Meßeinrichtung war jedoch auf Atmosphärendruck und maximale Rohrwandtemperaturen von 120°C begrenzt. Weiterhin bestanden Probleme mit Verschmutzungen, die einzelne Kanäle ausfallen ließen. Daher ist eine Neukonstruktion des Meßsystems auf der Basis des hier beschriebenen Meßprinzips nötig. Im folgenden wird nun die Entwicklung des Meßsystems erläutert, wobei Teilaspekte auch in [46] und [47] beschrieben sind.

## **2.2 Entwicklung des Meßsystems**

Der Einsatz des Meßsystems in Kanälen mit Wandtemperaturen bis 400 °C erfordert, daß sowohl die Licht- oder Strahlenquelle als auch der Empfänger in ausreichendem Abstand von der Rohrwand angebracht werden, da es sich um temperaturempfindliche Komponenten handelt. Durch den Abstand von Strahlenquelle und Empfänger bedarf es optischer Einrichtungen, die den ausgesendeten Strahl mit möglichst hoher Strahlungsdichte zur Rohrwand leiten, um einerseits eine hohe Intensität im Meßbereich zu erhalten und andererseits den Wanddurchbruch am Rohr und Rückwirkungen auf die Strömung klein zu halten. Die mechanische Konstruktion muß eine Druck- und Temperaturfestigkeit bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Meßfunktion gewährleisten. Die systematische Entwicklung des Meßsystems zur Anpassung an die technischen Randbedingungen wird in diesem Kapitel erläutert.

### **2.2.1 Auswahl des Wellenlängenbereichs**

Es wird zunächst untersucht, welche Bereiche des elektromagnetischen Spektrums sich für das beschriebene Meßprinzip eignen. Um den beschriebenen Absorptionseffekt nutzen zu können, muß die Absorption des Lichtes bei vollständiger Füllung des Rohres mit Wasser weniger als 100 % betragen. Der Wert wurde mit einem Sicherheitsabstand auf 95% festgelegt. Die minimale Absorption bei vollständiger Füllung mit Wasser

wurde mit 30% festgelegt. Bei geringerer Absorption würde der Meßeffect zu klein werden bzw. der Störabstand (SNR) ungünstig ausfallen.

Die Intensität  $I(\lambda)$  eines Lichtstrahles mit der Anfangsintensität  $I_0$  beträgt nach dem Durchtritt durch die Weglänge  $x$  (Lambert-Beer-Gesetz)

$$I(\lambda, x) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha(\lambda)$  ist wellenlängenabhängig.

Die Absorption  $A(\lambda, x)$  beträgt

$$A(\lambda, x) = 1 - \frac{I(\lambda, x)}{I_0(\lambda)} = 1 - e^{-\alpha(\lambda)x} \quad \text{Gl. 2-2}$$

$A(\lambda, x)$  ist von der Weglänge  $x$  bzw. dem Rohrdurchmesser  $d$  abhängig. Tab. 2-1 zeigt die minimalen Absorptionskoeffizienten zur Erfüllung von 30% Absorption und die maximalen Absorptionskoeffizienten zur Erfüllung von 95% Absorption bei Wasser für Rohrdurchmesser von 13 mm bis 100 mm.

d [mm]	13	25	50	75	100
$\alpha_{\max}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	2.3	1.19	0.5	0.4	0.3
$\alpha_{\min}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	0.27	0.14	0.07	0.048	0.036

Tab. 2-1: Notwendiger Bereich der Absorptionskoeffizienten für die Erfüllung des Meßprinzips bei verschiedenen Rohrdurchmessern

Um die oben genannten Rohrdurchmesser berücksichtigen zu können, sollte der Absorptionskoeffizient im Bereich

$$0.04 \text{ cm}^{-1} \leq \alpha \leq 2.3 \text{ cm}^{-1}$$

liegen. Es soll nun das elektromagnetische Spektrum von  $\gamma$ -Strahlen bis Dezimeterwellen nach Bereichen mit passender Absorption für Wasser untersucht werden. Die in der Literatur vorhandenen Meßwerte für Wasser bei Atmosphärendruck und 20 °C werden für eine Abschätzung der möglichen Wellenlängenbereiche verwendet. Es ergeben sich vier Bereiche:

Bereich	Wellenlänge	Strahlungsart	Referenz
I	$0.059 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 0.929 \text{ \AA}$	Röntgen- und $\gamma$ -Strahlen	[49]
II	$183 \leq \lambda \leq 203 \text{ nm}$	Ultraviolett	[48,49]
III	$850 \leq \lambda \leq 1340 \text{ nm}$	Nahinfrarot	[50]
IV	$6 \text{ cm} \leq \lambda \leq 50 \text{ cm}$	cm, dm-Wellen	[48,49]

Tab. 2-2: Wellenlängenbereiche mit passenden Absorptionskoeffizienten

Die Ergebnisse sind in Abb. 2-2 zusammengefaßt.

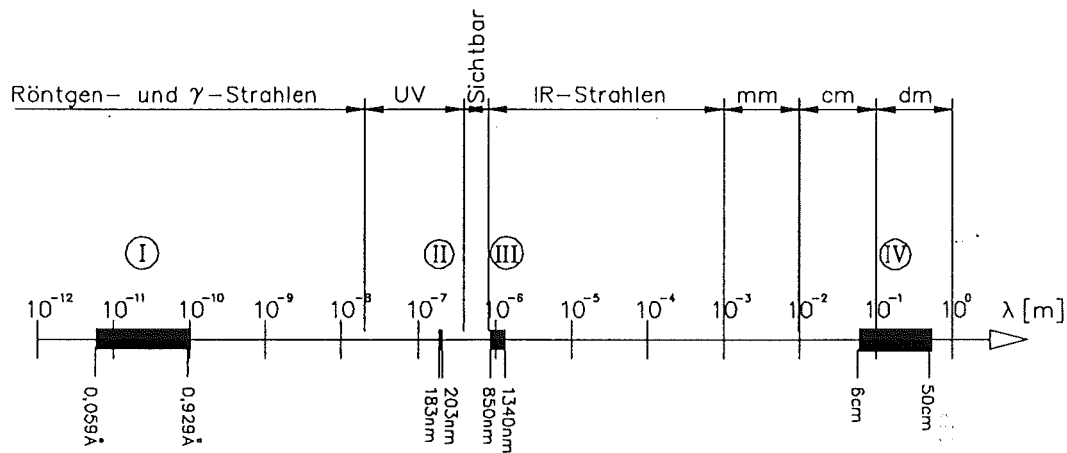


Abb. 2-2: Elektromagnetisches Spektrum mit Wellenlängenbereichen passender Absorptionskoeffizienten (I - IV) für Wasser. Werte aus [48,49,50,51,52]

Der Bereich I wird in radiometrischen Dichtemeßanlagen, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, verwendet. Aufgrund der hohen Kosten und des hohen Aufwandes für Strahlenschutzmaßnahmen scheidet der Bereich aus und wird deshalb im folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Zur weiteren Beurteilung müssen die Brechungsindizes des Wassers betrachtet werden:

Bereich	Brechungsindex	Referenz
II	$1.396 \leq n \leq 1.46$	[48,49]
III	$1.329 \leq n \leq 1.321$	[48]
IV	9.0	[49]

Tab. 2-3: Brechungsindizes für die Bereiche II-IV

Ein hoher Brechungsindex führt zu einer Verstärkung des Streueffektes. Im Bereich IV mit einem Brechungsindex von 9 würde der Streueffekt gegenüber dem Absorptionseffekt dominieren. Aus diesem Grund scheidet der Bereich IV aus.

Schließlich ist noch die Absorption von gesättigtem Wasserdampf von Bedeutung. Tab. 2-4 zeigt die Absorptionskoeffizienten von gesättigtem Wasserdampf für die Bereiche II und III.

Bereich	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	Referenz
II	$0.030 \leq \alpha \leq 0.177$	[49]
III	$0.00084 \leq \alpha \leq 0.013$	[49]

Tab. 2-4 Absorption von gesättigtem Wasserdampf für die Bereiche II-III

Mit den Daten aus Tab. 2-3 und Tab. 2-4 kann die Auswahl des am besten geeigneten Wellenlängenbereiches erfolgen. Im Bereich III hat Wasser einen geringeren Brechungsindex als im Bereich II. Dies ist vorteilhaft, damit der Einfluß der Streuung nicht zu groß wird. Die Absorption des Wasserdampfes sollte möglichst niedrig ausfallen um ein hohes Absorptionsverhältnis zwischen Wasser und Dampf ( $\alpha_{\text{Wasser}}/\alpha_{\text{Dampf}}$ ) zu erreichen. Auch hier zeigt der Bereich III (Nahinfrarot) günstigere Werte, so daß dieser Bereich im folgenden näher betrachtet wird.

Innerhalb des Nahinfrarotbereiches soll die Wellenlänge mit dem höchsten Absorptionsverhältnis  $\alpha_{\text{Wasser}}/\alpha_{\text{Dampf}}$  gefunden werden. Hierzu ist in Abb. 2-3 das Absorptionsspektrum von Wasser zwischen 0.7 und 1.3  $\mu\text{m}$  dargestellt.

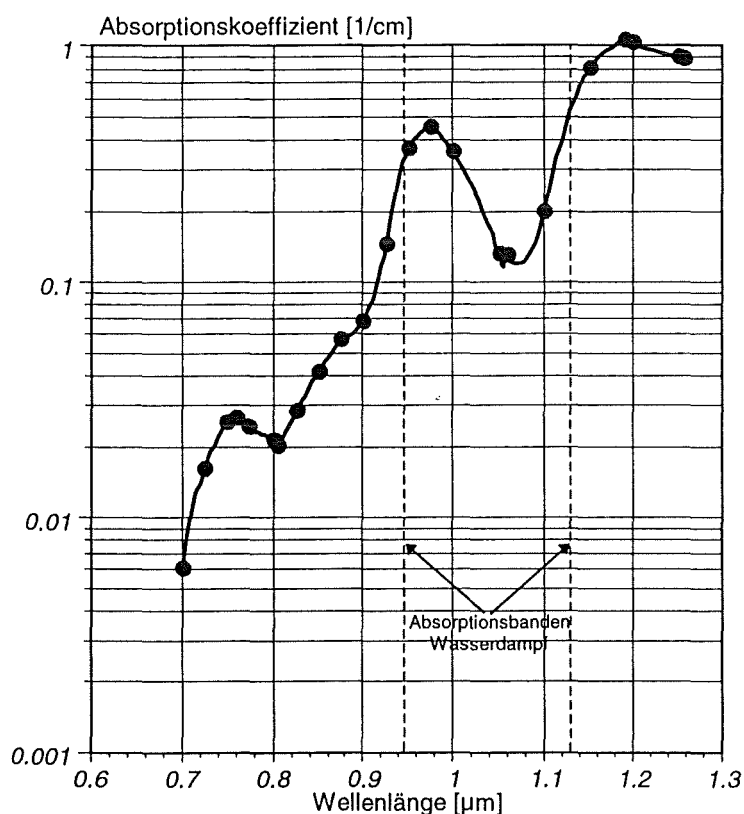


Abb. 2-3: Absorptionsspektrum von flüssigem Wasser und Absorptionsbanden von Wasserdampf im Nahinfrarotbereich. Werte aus [53,48]

Das Absorptionsspektrum von Wasserdampf bei 1 bar und 127°C zeigt Absorptionsbanden bei 0.944  $\mu\text{m}$ , 1.128  $\mu\text{m}$  und 1.37  $\mu\text{m}$  [54]. Um den ungünstigsten Fall zu betrachten, sind in Tab. 2-5 die Absorptionskoeffizienten und das Verhältnis  $\alpha_{\text{Wasser}}/\alpha_{\text{Dampf}}$  für die Absorptionsbanden angegeben. Die Wasserdampfabsorption bei Atmosphärendruck wurde durch [49] bestimmt. Um das Absorptionsverhältnis bei erhöhtem Druck abzuschätzen, wurde die Absorption proportional zur Dichte für gesättigtes Wasser bzw. Dampf berechnet.

Die Wellenlänge von 950 nm als sehr günstig, da die Absorption von Wasserdampf dort noch niedrig ist, das Absorptionsspektrum für Wasser jedoch ein lokales Maximum aufweist (vergl. Abb. 2-3). Das Absorptionsverhältnis  $\alpha_{\text{Wasser}}/\alpha_{\text{Dampf}}$  ist sowohl für

Atmosphärendruck als auch für einen Druck von 100 bar für die Wellenlänge von 950 nm am höchsten.

Wellenlänge $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\alpha_{\text{Dampf}} [\text{cm}^{-1}]$ $P_s=1 \text{ bar}$	$\alpha_{\text{Dampf}} [\text{cm}^{-1}]$ $P_s=100 \text{ bar}$	$\alpha_{\text{Wasser}}/\alpha_{\text{Dampf}}$ $P_s=1 \text{ bar}$	$\alpha_{\text{Wasser}}/\alpha_{\text{Dampf}}$ $P_s=100 \text{ bar}$
0.95	0.00084	0.775	464	3.6
1.13	0.0015	0.138	201	1.6

Tab. 2-5: Absorptionskoeffizienten von gesättigtem Wasserdampf und Absorptionsverhältnisse im Nahinfrarotbereich. Werte berechnet nach [49,54]

### 2.2.2 Auswahl von Lichtquelle und Sensor

Um den Wellenlängenbereich um 950 nm zu realisieren, kommen folgende Lichtquellen in Frage:

- Breitbandlichtquellen mit optischen Filtern
- Laser (Laserdioden, Festkörperlaser)
- Leuchtdioden

Mit Breitbandlichtquellen und optischen Filtern läßt sich das Emissionsspektrum in weiten Bereichen anpassen. Jedoch ergeben sich einige entscheidende Nachteile: Die Strahlungsdichte ist oft klein bzw. die strahlende Fläche groß. Die Strahlungsquellen müssen in der Regel gekühlt werden und es ist eine aufwendige Konstruktion mit Kondensorenlinen und Filtern notwendig.

Laserdioden besitzen die Vorteile hoher Strahlungsdichten und geringer Spektralbandbreiten mit spektralen Halbwertsbreiten von etwa 1 nm. Sie besitzen sehr kleine strahlende Flächen, da es sich um Kantenstrahler handelt [55]. Bei Dauerbetrieb (cw-mode) ergeben sich häufig Schwierigkeiten, so daß im Pulsbetrieb gearbeitet werden muß [56]. Zu Zeit der Durchführung dieser Arbeit waren keine Laserdioden im gewünschten Wellenlängenbereich auf dem Markt erhältlich. AlGaAs-Laserdioden haben Emissionspeaks bei 850 nm. Bei InGaAsP-Laserdioden liegt die Emissionswellenlänge bei 1300 nm. Als Festkörperlaser sind nur Nd:YAG-Laser mit einer unpassenden Peakwellenlänge von 1060 nm verfügbar [57]. Ein Nachteil beim Einsatz von Lasern in dem hier entwickelten Meßsystem liegt in der Polarisierung des Laserlichtes. Beim Durchstrahlen des Lichtes durch eine Phasengrenzfläche würde sich in Abhängigkeit der Polarisierungsebene von der Tangentialebene der durchstrahlten Phasengrenzfläche verschiedene Streueffekte ergeben.

Leuchtdioden emittieren nicht-kohärentes, nicht polarisiertes und nicht-monochromatisches Licht. Die Halbwertsbreiten betragen mindestens 50 nm. Die meisten auf dem Markt erhältlichen Leuchtdioden sind Flächenstrahler, die angenähert die Strahlungscharakteristik eines Lambert'schen Strahlers besitzen [58]. GaAlAs-Leuchtdioden sind mit Peakwellenlängen zwischen 820 nm und 890 nm erhältlich. GaAs-Leuchtdioden besitzen die hier sehr passenden Peakwellenlängen um 950 nm.

Der Empfänger muß auf das Emissionsspektrum des Senders angepaßt sein. Zu GaAs-Leuchtdioden passen Silizium-Fotodioden. Man unterscheidet zwischen PN, PIN und Avalanche-Fotodioden. PN-Fotodioden sind aufgebaut wie Solarzellen mit einem einfachen PN-Übergang. PIN-Fotodioden haben zwischen der P und der N-Schicht einen 'intrinsic layer' zur Verbesserung des Wirkungsgrades. Bei Avalanche-Fotodioden wird mit einer Vorspannung gearbeitet, wodurch die freien Elektronen so beschleunigt werden, daß sie weitere Elektronen-Lochpaare erzeugen und somit eine Verstärkung erreicht wird. Sie werden zur Detektierung von sehr kleinen Lichtleistungen verwendet. PIN-Fotodioden sind in großer Auswahl auf dem Markt erhältlich. Vorteilhaft sind Silizium-Fotodioden mit eingebautem Tageslichtsperrfilter, um bei Tests in transparenten Rohren den Tageslichteinfluß zu eliminieren.

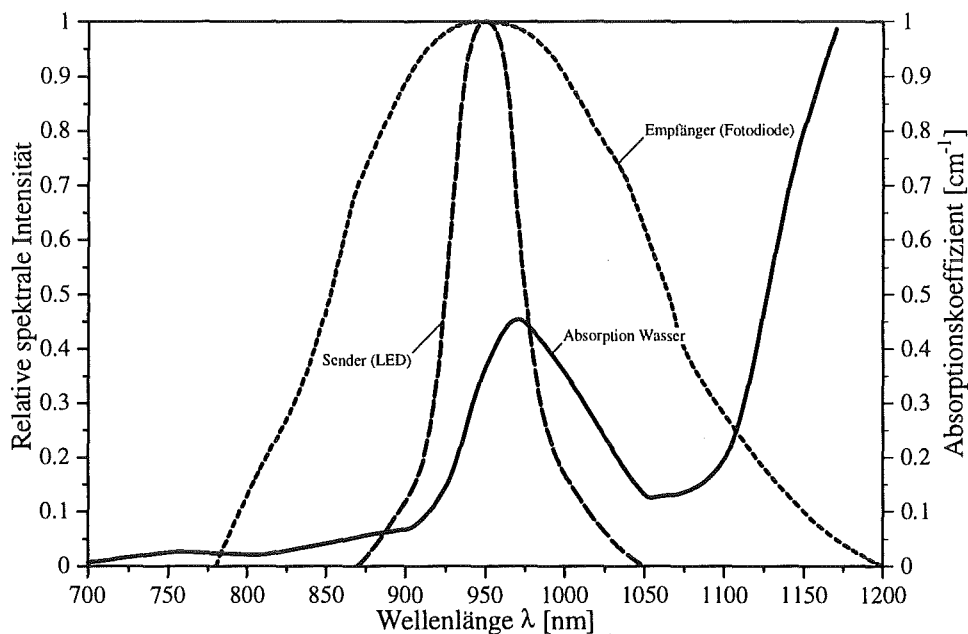


Abb. 2-4: Relative spektrale Intensität des Senders und Empfängers und Absorptionsspektrum von Wasser

Aus den genannten Gründen wurden GaAs-Leuchtdioden und Silizium-PIN-Fotodioden mit Tageslichtsperrfilter gewählt. Da die Komponenten eine wellenlängenabhängige Intensität bzw. Empfindlichkeit besitzen und die Absorption des Wassers ebenfalls wellenlängenabhängig ist, müssen zur Beurteilung der Eignung der Komponenten die Spektren betrachtet werden.

Die relative spektrale Intensität des Lichtes, das in der Fotodiode zu einem Signal führt, ergibt sich zu

$$\frac{I(\lambda)}{I_{\max}} = \frac{I_S(\lambda)}{I_{S,\max}} \frac{I_E(\lambda)}{I_{E,\max}} e^{-\alpha(\lambda)x} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Die relative spektrale Intensität des Senders  $I_S(\lambda)/I_{S,\max}$ , die relative spektrale Empfindlichkeit des Empfängers  $I_E(\lambda)/I_{E,\max}$  und Verlauf des Absorptionskoeffizienten von Wasser ist in Abb. 2-4 dargestellt. Abb. 2-5 zeigt das nach Gl. 2-3 berechnete Ergebnis

für Wasser und für Dampf, wobei die Absorption im Dampf mit dem Absorptionskoeffizient für die Absorptionsbande bei  $0.95 \mu\text{m}$  berechnet wurde.

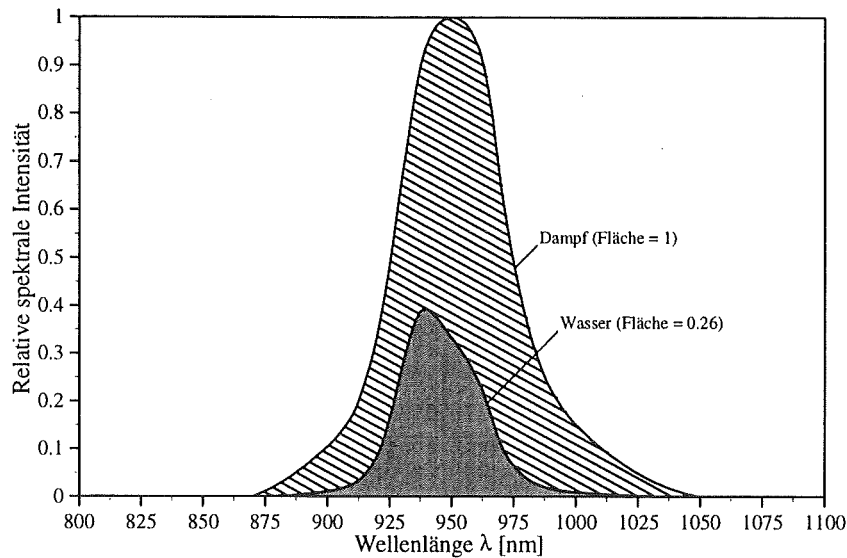


Abb. 2-5: Relative spektrale Intensität des Lichtes nach Durchtritt durch eine Dampf- und Wasserschicht von 3 cm ( $P_s=1$  bar)

Das an der Fotodiode gemessene Signal ist proportional zum Integral der Intensität des auf die Fotodiode treffenden Lichtes über alle Wellenlängen (ca. 775 nm - 1200 nm, Abb. 2-4). Die Flächen unter den Kurven in Abb. 2-5 sind also proportional zum Signal an der Fotodiode. Somit kann aus dem Flächenverhältnis auf das Signalverhältnis geschlossen werden. Das Verhältnis zwischen dem Signal nach dem Durchtritt des Lichtes durch eine Dampfschicht und dem Signal nach dem Durchtritt des Lichtes durch eine Wasserschicht beträgt nach Abb. 2-5 ca. 4, wodurch der Absorptionseffekt mit den hier beschriebenen Komponenten verwirklicht werden kann.

Im nächsten Schritt ist die Führung des Strahlenganges zwischen Sender und Empfänger zu untersuchen. Hierzu wurden zwei Konzepte verfolgt: Die Konstruktion durch Linsen und die Konstruktion durch Lichtwellenleiter.

### 2.2.3 Lichtführung mit Hilfe von Linsen

Bei den als optimale Lichtquellen gefundenen Leuchtdioden handelt es sich um divergent abstrahlende Quellen mit strahlenden Flächen in der Größenordnung von  $0.3 \text{ mm}^2$ . Es ist nun die konstruktive Aufgabe zu lösen, das Licht so in das Rohr ein- und auszukoppeln, daß auf den Empfänger eine ausreichende Lichtintensität fällt und die Ein- und Auskoppelstellen so zu gestalten, daß die Strömung möglichst nicht gestört wird. Bei der in Abb. 2-6 gezeigten Lösung mit vier Linsen dient als Sender die genannte Leuchtdiode. Das Licht wird durch Sammellinsen großer Brennweite und Apertur zur Rohrwand geführt. Die inneren kleinen Linsen sind in der Rohrwand angebracht, zwischen den Linsen strömt das Zweiphasengemisch.

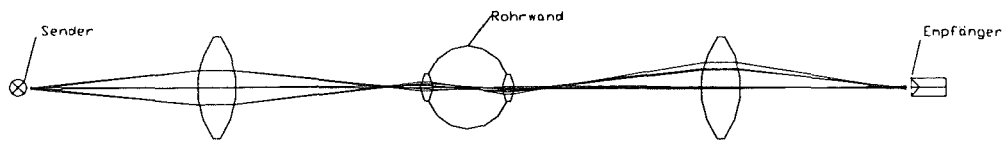


Abb. 2-6: Optische Komponenten und Strahlengang für die Lichtführung durch 4 Linsen

Bedingt durch die Geometrie der äußeren Linsen, die in einem Gehäuse befestigt werden müssen, wird die Anordnung sehr breit. Dies erweist sich als nachteilig für die Wärmeisolation des Rohres und die weitere Instrumentierung, die in unmittelbarer Nähe zur optischen Messung angebracht werden muß. Die Konstruktion ist durch die großen Abstände zwischen Lichtquelle und Linse vibrationsempfindlich, was zu Störungen des Signals führen kann.

### 2.2.4 Lichtführung mit Hilfe von Lichtwellenleitern

Durch temperaturstabile Lichtwellenleiter ist es möglich, Licht in die Nähe der Rohrwand zu leiten und dabei den Sender und Empfänger in sicherer Entfernung zum Rohr anzubringen. Man unterscheidet zwischen Stufenindexprofileitern, bei denen das Profil des Brechungsindex vom Kernmaterial zum Hüllmaterial einen stufenförmigen Verlauf hat, und Gradientenindexprofileitern, bei denen das Profil des Brechungsindex einen Parabolförmigen Verlauf aufweist. Gradientenindexleiter dienen insbesondere zur Reduzierung von „Moden“, was für die Informationsübertragung, nicht aber für die Übertragung von Lichtleistung von Bedeutung ist. Unter den Stufenindexfasern sind nur Quarzfasern mit dotiertem Quarzglas als Mantel und starre Lichtleitstäbe aus optischem Glas für Temperaturen bis 400 °C geeignet.

Die Abstrahlcharakteristik eines Lichtwellenleiters ist von seiner numerischen Apertur abhängig [59]:

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad \text{Gl. 2-4}$$

$\theta$  ist der Abstrahlwinkel gegen die optische Achse,  $n_{co}$  und  $n_{cl}$  sind die Brechungsindizes des Kernmaterials (core) und der Mantel (cladding). Quarz/Quarz-Fasern haben eine maximale numerische Apertur von 0,22, woraus eine enge Abstrahlcharakteristik, jedoch auch ein kleiner Akzeptanzwinkel resultiert. Bei der Auswahl der Faser ist auf einen geringen  $\text{OH}^-$ -Anteil zu achten, da sonst das Licht im Wellenlängenbereich um 950 nm in der Faser stark absorbiert wird [60]. Das aus der Faser innerhalb eines Abstrahlwinkels divergent austretende Licht hat angenähert eine gaußförmige Intensitätsverteilung [59]. Durch eine direkte Einkopplung des Lichtes durch die Faser in das Rohr würde es zu einer sehr kleinen Intensität auf der gegenüberliegenden Seite des Rohres, wo das Licht ausgekoppelt wird, kommen. Aus diesem Grund soll das Licht durch eine Linse kollimiert werden. Um einen hohen Anteil der aus der Faser tretenden Strahlen zu kollimieren, sollte das Verhältnis von Brennweite zu Linsendurchmesser  $f/d$  klein sein. Kugellinsen haben ein sehr kleines  $f/d$ -Verhältnis:



$$\frac{f}{d} = \frac{n}{4(n-1)}$$

Gl. 2-5

Jedoch sind die Fehler durch sphärische Aberration bei Kugellinsen sehr hoch. Hierauf wird in Kapitel 2.2.5 näher eingegangen. Ein Linsenmaterial mit einem hohen Brechungsindex ist für ein kleines  $f/d$ -Verhältnis und zur Minimierung der sphärischen Aberration günstig.

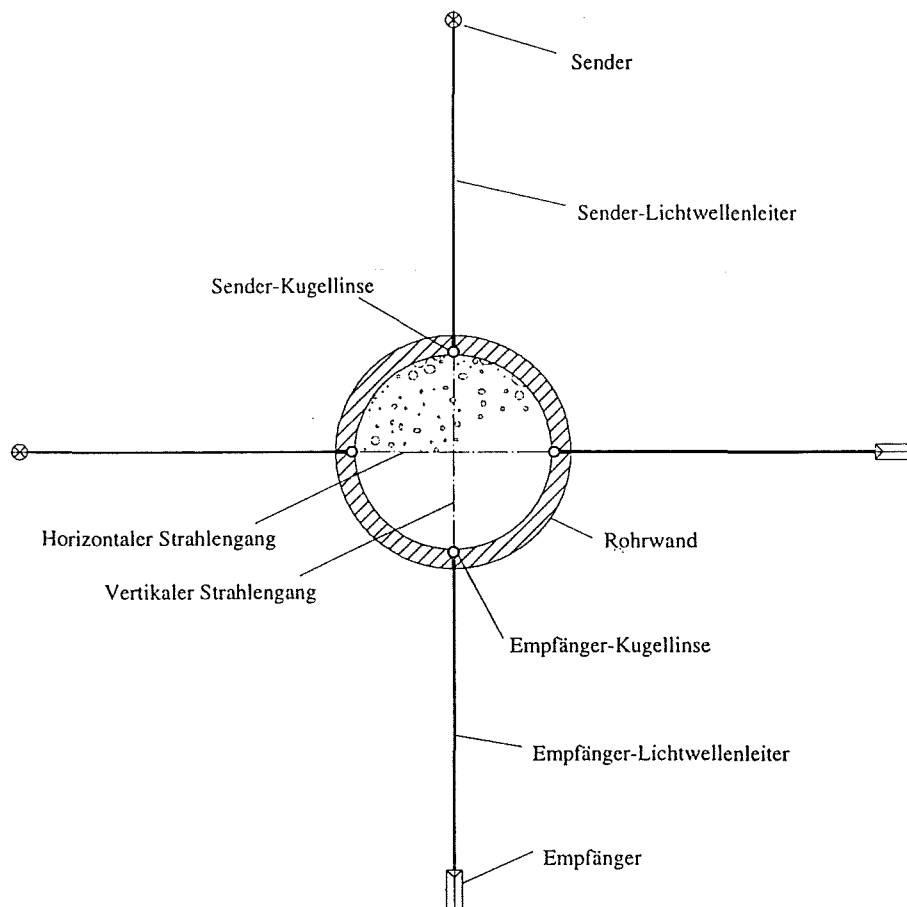


Abb. 2-7: Schnitt durch das Verdampferrohr mit optischen Komponenten für die Lichtführung durch Lichtwellenleiter

Abb. 2-7 zeigt einen Schnitt durch das Verdampferrohr mit den optischen Komponenten. Das Licht des Senders wird in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt. Es tritt auf der unteren Seite wieder aus und wird durch eine Sender-Kugellinse, die in der Rohrwand befestigt ist, kollimiert. Das kollimierte Licht strahlt durch das Zweiphasengemisch und trifft auf eine Empfänger-Kugellinse, die in der Rohrwand auf der gegenüberliegenden Seite des Rohres befestigt ist. Von dort aus gelangt das Licht in einen Empfänger-Lichtwellenleiter und trifft auf den Empfänger. Die gleiche Anordnung ist in horizontaler Position angebracht, so daß ein horizontaler und ein vertikaler Strahlengang entsteht.

Zur Erhöhung der auf den Empfänger treffende Intensität wird im Anhang eine Methode zur Optimierung der Lichtwellenleiter beschrieben.

### 2.2.5 Optische Analyse

Für die Konstruktion nach Abb. 2-7 soll in diesem Kapitel eine detaillierte Analyse des Strahlenganges vom Senderlichtwellenleiter zum Empfängerlichtwellenleiter durchgeführt werden. Neben dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Absorptions- und Streueffekt wird das Signal von einem weiteren optischen Effekt bestimmt, der im folgenden beschrieben wird.

Für die verwendete Kombination von Kugellinsen und Lichtwellenleitern können aufgrund von sphärischen Aberrationen nicht die klassischen Formeln zur Linsenberechnung angewendet werden. Aus diesem Grund wurde zur optischen Analyse ein kommerzielles Programm zur Optikberechnung [61] verwendet, das auf den hier vorliegenden Fall angepaßt wurde.

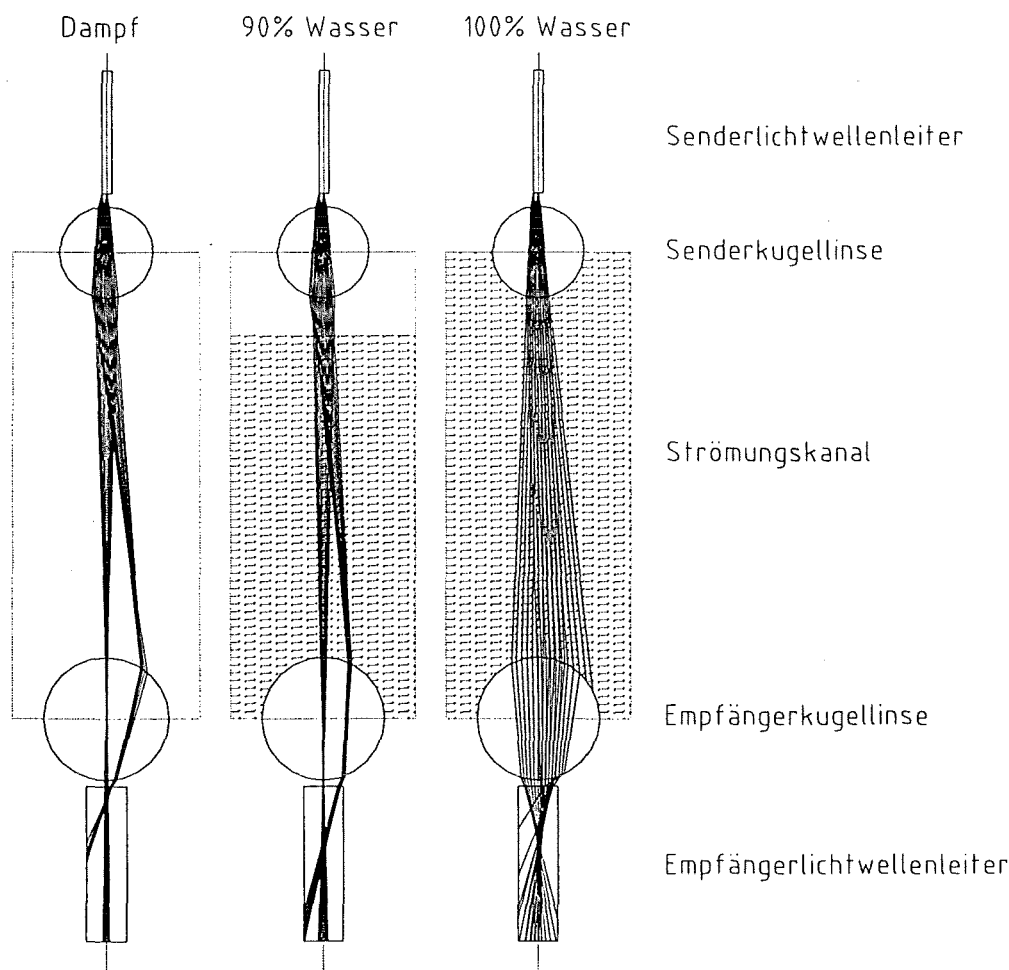


Abb. 2-8: Strahlengang in Dampf, Wasser und Dampf/Wasser für einen Strömungskanal mit  $d=15$  mm

In Abb. 2-8 ist jeweils der Verlauf von Strahlen, die aus der optischen Achse und aus einem Punkt im Radius  $r$  des oberen Senderlichtwellenleiters treten, gezeigt. Somit befinden sich sämtliche aus der Faser austretenden Strahlen innerhalb der gezeichneten Strahlen. Der Abstrahlwinkel ergibt sich aus der numerischen Apertur der Faser zu  $12.7^\circ$  (Halbwinkel). Nach dem Austritt aus der oberen Senderkugellinse wird der

Strömungskanal durchstrahlt und die Strahlen treten durch die untere Empfängerkugellinse auf den Empfängerlichtwellenleiter.

Die Strahlenverläufe sind für die 3 Fälle, daß der Strömungskanal mit 100% Dampf, 90% Wasserschicht - 10% Dampfschicht und 100% Wasser gefüllt ist, gezeichnet. Durch die Wasserschicht (mittlere Skizze) werden die divergent aus der Senderkugellinse austretenden Strahlen zur optischen Achse gebrochen. Die Intensitätsverteilung des Lichtes im Strömungskanal kann als gaußförmig verteilt angenommen werden. Durch die Abnahme der Divergenz des Strahlenbündels in der Wasserschicht steigt die Intensität des Lichtes, das durch den Empfängerlichtwellenleiter auf den Empfänger trifft. Dieser optische Effekt wirkt also dem beschriebenen Absorptionseffekt entgegen. Die optischen Komponenten wurden jedoch so aufeinander abgestimmt, daß der Absorptionseffekt dem hier beschriebenen optischen Effekt überwiegt. Im Fall von 100% Wasser ändern sich die optischen Verhältnisse sehr. Durch den direkten Übergang des Lichtes aus der Kugellinse in das Wasser werden die Strahlen nur noch wenig gebrochen. Es entsteht ein weit aufgefächertes Strahlenbündel. Die äußeren Strahlen werden in der Empfängerkugellinse totalreflektiert und gelangen nicht zum Empfänger. Die optischen Komponenten wurden so aufeinander abgestimmt, daß dieser Effekt deutlich ausgeprägt ist, so daß sich das Signalniveau bei vollständiger Füllung mit Wasser deutlich vom Signalniveau bei Teilbefüllung mit Wasser unterscheidet. Durch diese Konstruktion konnte somit neben dem Absorptions- und Streueffekt ein weiterer Meßeffect erzielt werden.

### **2.2.6 Mechanische Konstruktion**

Die optischen Komponenten nach Abb. 2-7 müssen so in eine mechanische Konstruktion eingebaut werden, daß die Funktion des Meßsystems für einen Gegendruck von 130 bar und Wandtemperaturen von 400 °C im Dauerbetrieb aufrechterhalten werden kann.

Eine unmittelbare Einbettung der Kugellinse in die Rohrwand würde die Fertigung, Montage und Justierung erschweren. Daher wurde eine Fassung gewählt, die in die Rohrwand mit einer Schraubverbindung eingefügt wird. Sämtliche optischen Komponenten werden in einer Einschraubung integriert, die über ein Gewinde in die Rohrwand eingeschraubt und durch ein Kupferdichtring abgedichtet wird (Abb. 2-9). Die Einschraubung hat eine zentrische Bohrung, durch die der Lichtwellenleiter (LWL) zur Kugellinse geführt wird. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt in der kompakten Bauform, durch die in die Wärmeisolierung nur Bohrungen zur Durchführung der Einschraubungen angebracht werden müssen. Die Montage, Justierung und Wartung kann extern und ohne Entfernen der Isolierung erfolgen.

Die in einem sphärischen Sitz eingebettete Kugellinse ist einer gleichzeitigen thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchung ausgesetzt. Die Randbedingungen erfordern ein Material mit einer hohen chemischen Beständigkeit gegen das Wasser/Dampf-Gemisch und eine hohe Bruchfestigkeit.

Zur Überprüfung der chemischen Beständigkeit wurde zunächst das für Linsen häufig verwendete Material BK7 in einem Autoklaven mit gesättigtem Wasserdampf für 15 Minuten bei einem Druck von 50 bar getestet. Die Oberfläche des Materials war nach

dem Test milchig, so daß die Transmission nahezu vollständig abnahm. Nach [62] haben Gläser mit guten optischen Eigenschaften häufig eine geringe chemische Resistenz. Schon durch Wasser bei Atmosphärendruck- und temperatur können Glasbestandteile in Lösung gehen und weiße Flecken hinterlassen.

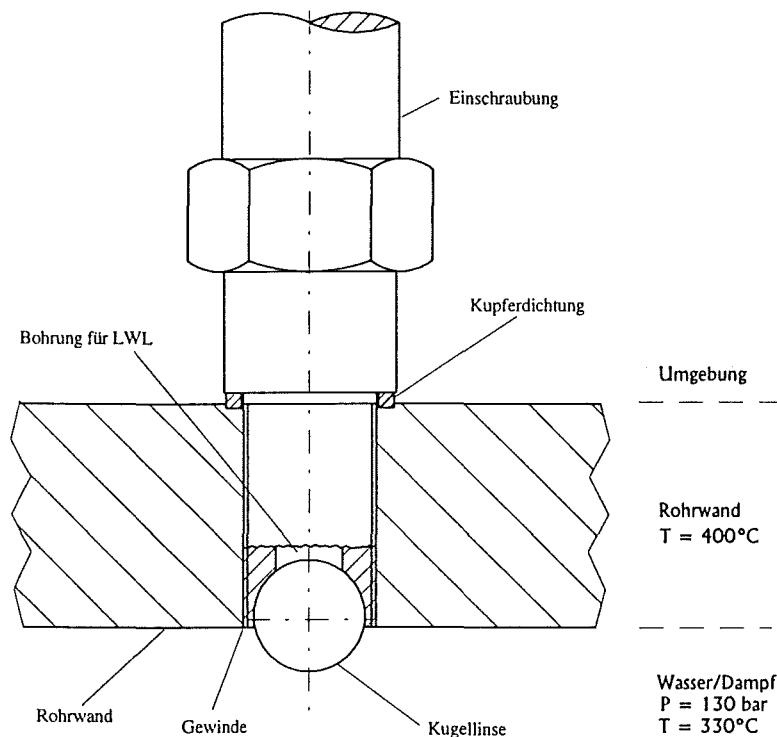


Abb. 2-9: Schnitt durch eine Einschraubung in die Rohrwand

In [22] wurde Quarzglas und Saphirglas in einem gesättigten Wasser-Dampfgemisch bei 155 bar getestet. Die Transmission von Quarzglas nahm nach 2 Stunden stark ab. Die Transmission von Saphirglas nahm nach 15 Stunden Werte von ca. 70 % an, die dann jedoch für 120 Stunden nahezu konstant blieben. Eigene Versuche mit Saphir führten zu ähnlichen Ergebnissen. Nach 10 Stunden in einem gesättigten Wasser-Dampfgemisch bei 100 bar zeigten sich leichte Trübungen auf der Oberfläche, die auch nach 100 Stunden nicht wesentlich zunahm. Saphir ist ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einkristall mit hexagonaler Kristallstruktur, der für technische Anwendungen künstlich hergestellt wird. Nach Versuchen mit Saphiren von 5 Herstellern sowie auch mit künstlichen Rubinen ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CrO}_2$ ) wurden keine Unterschiede in Bezug auf die Wasser/Dampfstabilität festgestellt. Auch die mechanische Festigkeit von Saphirglas zeigte sich im Versuch als ausreichend für die hier gestellten Anforderungen. Die Zugfestigkeit von Saphir bei  $20^\circ\text{C}$  ist ca. um den Faktor 14 höher als bei Quarzglas. Die hohe Wärmeleitfähigkeit führt zu geringeren Wärmespannungen im Material.

Auch die optischen Eigenschaften von Saphir sind passend für die Konstruktion. Die Transmission im Nahinfrarotbereich ist hoch und der Brechungsindex beträgt bei einer Wellenlänge von 950 nm 1.75 [63], was zu einem niedrigen f/d-Verhältnis und zu einer Minimierung der sphärischen Aberration der Linse führt (vergl. Kapitel 2.2.4).

Der Spalt zwischen Saphirkugel und sphärischen Metallsitz mußte für die beschriebenen Druck- und Temperaturbedingungen abgedichtet werden. Hierzu wurden zunächst organische Hochtemperaturkleb- und dichtstoffe getestet. Sämtliche Materialien lösten sich im gesättigten Wasserdampf bei einem Druck von 130 bar vollständig auf. Eine Untersuchung von anorganischen Hochtemperaturklebstoffen zeigte, daß nur Materialien auf der Basis von Aluminiumoxid wasserdampfstabil sind. Mit diesen Materialien konnte jedoch keine dauerhafte Dichtigkeit erreicht werden. Die Untersuchung von Glasloten führte auch zu keiner Langzeit-Dichtigkeit des Spaltes. Schließlich wurden Aktivlot-Verbindungen untersucht. Nach einer Verarbeitung nach Herstellerangaben konnte zwar der Dichtspalt abgedichtet werden, infolge von thermisch induzierten Eigenspannungen kam es jedoch zu einer Rißbildung im Saphir. Durch eine Anpassung der Prozeßführung und eine duktile Zwischenschicht zwischen Saphir und Stahl konnten die Eigenspannungen reduziert und somit rißfreie und dichte Lötverbindungen erreicht werden.

### **2.3 Funktionsnachweis des Meßsystems**

Zum Funktionsnachweis des in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Meßsystems für die Strömungsformerkennung in Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen bei hohen Drücken und Temperaturen wird eine stufenweise Qualifikation durchgeführt. Es werden Tests in Luft/Wasser- und Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen in transparenten Rohren bei Atmosphärendruck vorgenommen und solche bei erhöhtem Druck in einem Autoklaven.

#### **2.3.1 Nachweis der Strömungsformerkennung bei Atmosphärendruck**

Zur eindeutigen Identifizierung von Strömungsformen muß das Meßsystem für die verschiedenen Strömungsformen charakteristische und eindeutig voneinander abzugrenzende Signalmuster erzeugen. Zum Test und Nachweis wurden zunächst Versuche bei Atmosphärendruck mit Luft/Wasser und Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen in transparenten Rohren durchgeführt und die visuell beobachteten Strömungsformen mit den Signalmustern verglichen.

Bei den am Empfänger gemessenen Signalen handelt es sich um Spannungssignale, die proportional zur Lichtintensität sind. Um einen direkten Bezug der Signale zur Zweiphasenströmung herzustellen und Fertigungstoleranzen verschiedener Sender- und Empfängereinheiten auszugleichen, wurden alle Einheiten so kalibriert, daß eine reine Wasserströmung dem Wert 0 % entspricht und eine reine Dampf- bzw. Luftströmung dem Wert 100 %. Die so kalibrierten Signale werden im folgenden „Optische Signale“ genannt. Für die Kalibrierung und die Meßdatenerfassung wurde eine Software geschrieben, so daß vor jedem Versuch ohne großen Aufwand eine neue Kalibrierung durchgeführt werden konnte. Die Software diente vor allem für die in Kapitel 4 beschriebenen Versuche. Bei den Signaldiagrammen ist jeweils das kalibrierte Signal über der Zeit für den horizontalen und den vertikalen Strahlengang aufgetragen.

Es werden im folgenden Fotografien verschiedener Strömungsformen von Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen und die dabei aufgezeichneten Signale diskutiert. Die Abb. 2-13

bis Abb. 2-20 sind zur besseren Vergleichbarkeit am Ende des Kapitels zusammengefügt. In einem Plexiglasblock mit einer Bohrung von 15 mm sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Einschraubungen eingebaut, Abb. 2-10. Durch eine Lufteinspeisung werden verschiedene Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen erzeugt.

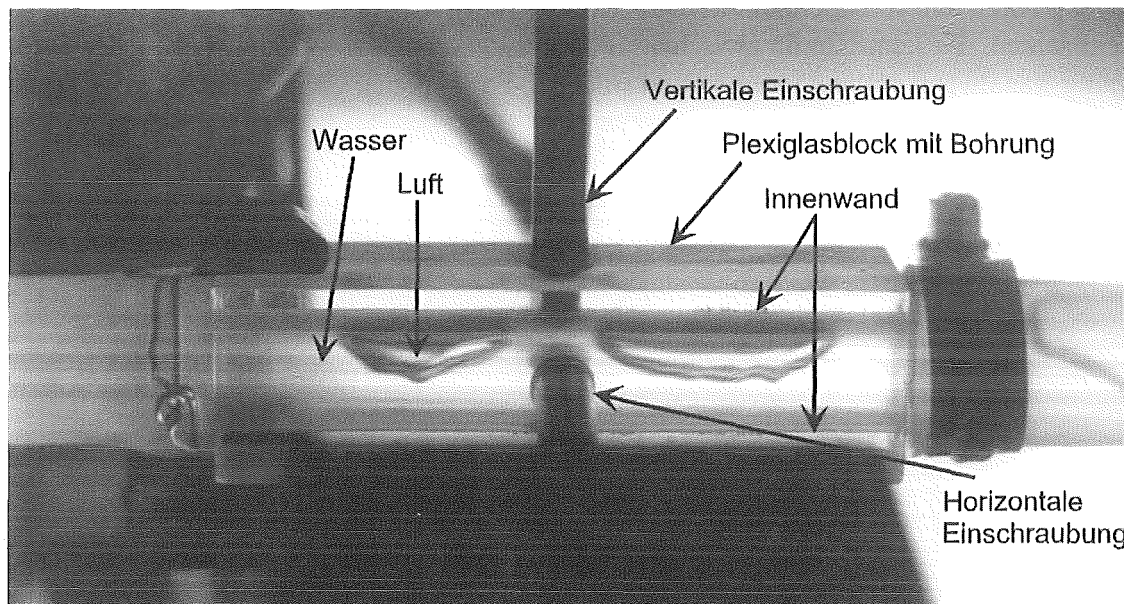


Abb. 2-10: Versuchsaufbau zum Nachweis der Strömungsformerkennung mit den horizontalen und vertikalen Einschraubungen und der Zweiphasenströmung

Bei der Einphasenströmung von Wasser erfahren der horizontale und der vertikale Strahlengang eine konstant hohe Absorption, die in Kombination mit dem in Kapitel 2.2.5 beschriebenen optischen Effekt für das horizontale und das vertikale Signal zu einem konstanten Signalverlauf bei 0 % führen (Abb. 2-13).

Bei einer Blasenströmung liegt die Gasphase verteilt in vielen Blasen in der Flüssigkeit vor (Abb. 2-14). Das Licht erfährt in den Dampfblasen bzw. Luftblasen eine geringere Absorption als im Wasser und eine Streuung an den Phasengrenzflächen. Ist die durchstrahlte Dampfblase vollständig von Wasser umgeben, wird das Strahlenbündel stark gestreut und der Streueffekt überwiegt den Absorptionseffekt. Abb. 2-11 verdeutlicht dies anhand der optischen Analyse einer Dampf/Luftblase, die sich auf der optischen Achse befindet. Nur wenige Strahlen gelangen in den Empfängerlichtwellenleiter. Befindet sich die Blase in exzentrischer Lage, d.h. nicht mit ihrem Zentrum auf der optischen Achse, wird das Licht nahezu vollständig gestreut. Bei allen in Blasenströmungen beobachteten Blasendurchmessern kommt es zu dem beschriebenen Streueffekt.

In horizontalen oder leicht geneigten Rohren kommt es aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen Gas und Flüssigkeit zu einer Blasenkonzentration im oberen Rohrabchnitt. Dabei strömen viele Blasen an der oberen Rohrwand entlang. Der horizontale Strahlengang trifft vorwiegend auf Blasen, die wie in Abb. 2-11 von Wasser umgeben sind. Aus diesem Grund zeigt das horizontale Signal in Abb. 2-14 vorwiegend eine Intensitätsabnahme, wenn eine Blase durch den Meßquerschnitt strömt. Anders sind die Verhältnisse, wenn eine Blase an der Rohrwand entlang strömt. Trifft das Licht ausgehend von der Kugellinse zuerst durch die Dampf- bzw. Luftphase und dann durch

die flüssige Phase, so wird das Licht weniger gestreut, da es nur durch eine Phasengrenzschicht tritt. Hier ist der Absorptionseffekt dominierend. In Abb. 2-14 ist daher für das vertikale Signal eine Intensitätszunahme zu beobachten, wenn sich die Blase mit ihrem Zentrum in der Nähe der optischen Achse befindet. Tritt das Strahlenbündel jedoch durch den Randbereich der Blase, sind Intensitätsabnahmen durch Streuungen zu beobachten. Es kann somit zwischen Blasen unterschieden werden, die an der Strömungskanalwand entlang strömen und solchen, die im Kanal ohne Benetzung der Wand strömen.

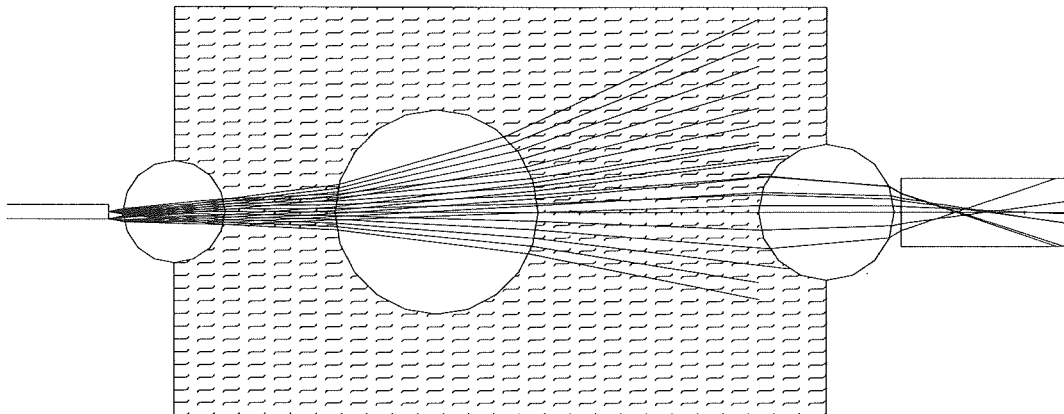


Abb. 2-11: Strahlengang durch eine von Wasser umgebene Dampfblase

Bei der Pfropfenströmung (Abb. 2-15) strömen die Pfropfen vorwiegend an der oberen Rohrwand entlang. Nach einer in der Literatur häufig getroffenen Einteilung ist die Pfropfenströmung eine intermittierende Strömungsform (vergl. Taitel und Dukler [9]). Wie beim vertikalen Signal der Blasenströmung kommt es auch hier beim Vertikalsignal zu Intensitätszunahmen, wenn ein Pfropfen durch den Meßquerschnitt strömt. Bei den erzeugten Pfropfen haben sich auf der Phasengrenzfläche Wellen ausgebildet, so daß es durch Streuungseffekte zu Signalschwankungen des Vertikalsignals kommt. Neben der Grobstruktur der Strömungsform können durch das Meßsystem auch solche Feinstrukturen erfaßt werden. Am Randbereich des Pfropfens kommt es zu Intensitätsabnahmen. In Abb. 2-15 ist zu sehen, daß sich der Pfropfen von der oberen Rohrwand bis etwa zur Rohrmitte erstreckt. Hierbei erfährt das Licht eine Streuung an zwei Phasengrenzflächen, wodurch das horizontale Signal zeitgleich mit dem vertikalen Signal Intensitätsabnahmen zeigt.

Die Schichtenströmung (Abb. 2-16) ist durch eine Wasserschicht im unteren Rohrbereich und eine Dampf- bzw. Luftschicht im oberen Rohrbereich gekennzeichnet. Das vertikale Signal ist bedingt durch den Absorptionseffekt nahezu konstant auf einem Niveau zwischen reinem Wasser (0 %) und reiner Gasphase (100 %). Das horizontale Signal zeigt einen konstanten Wert unter 0 %, da sich der Wasserstand etwa in der Höhe des horizontalen Strahlenganges befindet, wo das Licht an zwei Phasengrenzflächen, bedingt durch die konkave Form der Wasseroberfläche durch die Benetzung des Wassers an der Rohrwand, gestreut wird.

Abb. 2-17 zeigt eine Wellenströmung. Das Signal ähnelt der Schichtenströmung, jedoch bilden sich auf der Phasengrenzfläche Wellen aus, die eine Brechung des Lichtes und

somit Signalschwankungen verursachen. In Abb. 2-12 ist eine optische Analyse eines (idealen, zylinderförmigen) Wellenberges und Wellentales zu sehen. Das divergente Strahlenbündel wird in Richtung der Empfängerkugellinse kollimiert, wenn sich das Maximum eines Wellenberges in der optischen Achse befindet. Hierbei kann es beim vertikalen Signal zu Signalspitzen von über 100 % kommen. Bei einem Wellental wird das Strahlenbündel stark gestreut, so daß das vertikale Signal stark abnimmt. Das horizontale Signal wird durch eine große Streuung geprägt, da der horizontale Strahlengang bedingt durch die Oberflächenspannung des Wassers und der daraus resultierenden konkaven Form der Wasseroberfläche in einem Querschnitt senkrecht zur Rohrachse durch zwei Phasengrenzflächen treten muß.

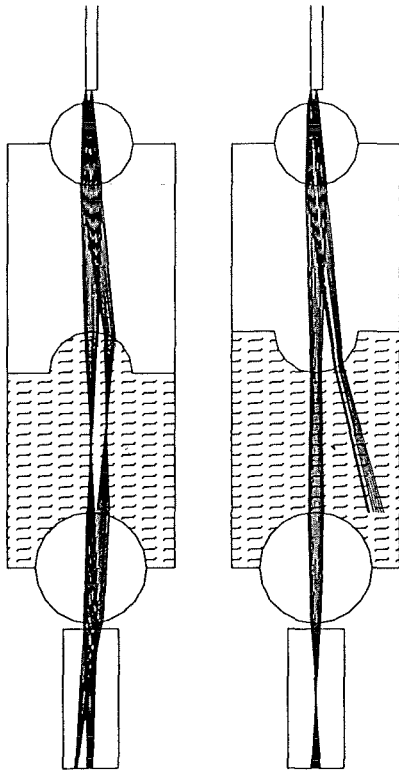


Abb. 2-12: Strahlengang durch ein Wellenberg und ein Wellental (vertikaler Strahlengang)

Eine Schwallströmung (Abb. 2-18) wird dadurch charakterisiert, daß im Vergleich zur Wellenströmung die Wellenberge die obere Rohrwand benetzen. Die Senderkugellinse wird dadurch benetzt, was eine höhere Absorption zur Folge hat. Der horizontale Strahlengang befindet sich durch die schwankende Füllstandshöhe zeitweise im Wasser und zeitweise in der Gasphase. Die Schwankungsbreite der Signale ist wegen der abwechselnden Benetzung und Nichtbenetzung sehr hoch.

Bei einer Wellen-Schwallströmung ist eine Schwallströmung einer Wellenströmung als Grundströmungsform überlagert. Abb. 2-19 zeigt zeitweise das Signal einer Wellenströmung (vergl. Abb. 2-17). Deutlich zu erkennen ist der Effekt von Schwällen, die mit einer Periodendauer von ca. 1.5 s in diesem Beispiel auftreten. Analog zur Schwallströmung bewirken die Schwälle vorwiegend eine Streuung der Signale. Die Wellen-Schwallströmung ist in einem engen Sinne keine eigene Strömungsform, sondern eine Überlagerung zweier Grundströmungsformen bzw. ein Sonderfall der Schwallströmung.



Da mit Hilfe des Meßsystems eine Unterscheidung zwischen einer Schwall- und einer Wellen-Schwallströmung möglich ist und diese Strömungsform häufig in horizontalen und geneigten Rohren anzutreffen ist, wird diese hier einzeln behandelt.

Die Schwallströmung und die Wellen-Schwallströmung ist nach einer in der Literatur häufig getroffenen Einteilung eine intermittierende Strömungsform (vergl. Taitel und Dukler [9]). In dieser Arbeit wird eine Strömung als Wellen-Schwallströmung bezeichnet, wenn anhand des Signals eindeutige Wellenanteile zu erkennen sind, d. h. wenn für mindestens 20 % der Zeit Wellenanteile in der Strömung vorhanden sind.

Die Ringströmung (Abb. 2-20) wird durch einen Flüssigkeitsfilm gekennzeichnet, der ringförmig an der Rohrwand verteilt ist. Im Kernbereich strömt Dampf bzw. Luft. Aufgrund des Schwerkrafteinflusses ist die Filmdicke an der oberen Rohrwand kleiner als an der unteren Rohrwand. Das horizontale und das vertikale Signal sind wegen der symmetrischen Lage der Phasengrenzfläche ähnlich. Beide Signale zeigen eine hohe Schwankungsbreite durch Streuungen des Lichtes beim Durchtritt durch zwei Phasengrenzflächen. Die kleinen Peaks werden durch Wellen auf dem Flüssigkeitsring hervorgerufen. Eine Strömung wird in dieser Arbeit als Ringströmung bezeichnet, wenn der Flüssigkeitsfilm glatt oder wellig ist. Sind deutliche Schwallanteile in der Strömung vorhanden, so wird diese als Schwallströmung bezeichnet.

Ähnliche Versuche wurden mit Luft-Wassergemischen in Plexiglasrohren bis zu Durchmessern von 90 mm und in einem beheizten Glasrohr mit einem Durchmesser von 15 mm mit einer Dampf/Wasser-Zweiphasenströmung durchgeführt. Es zeigten sich in allen Fällen qualitativ gleiche Signale wie die hier vorgestellten Signale nach Abb. 2-13 bis Abb. 2-20. Weiterhin konnte in allen Versuchen beobachtet werden, daß die Strömungsform vor und hinter dem Meßquerschnitt in Strömungsrichtung gleich blieb. Die geforderte Rückwirkungsfreiheit in Bezug auf die Strömungsform ist also gewährleistet. Jede der Strömungsformen konnte den klassischen Definitionen folgend visuell beobachtet und durch die unterschiedlichen Meßsignale eindeutig identifiziert werden.

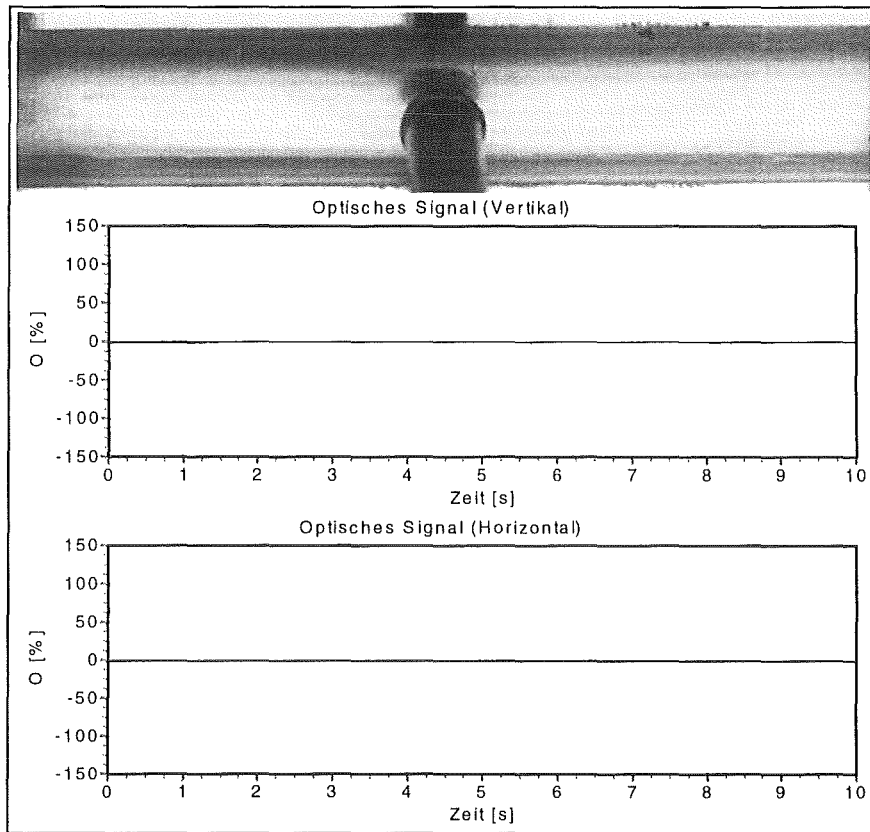


Abb. 2-13: Einphasenströmung (Wasser) mit zugehörigen optischen Signalen

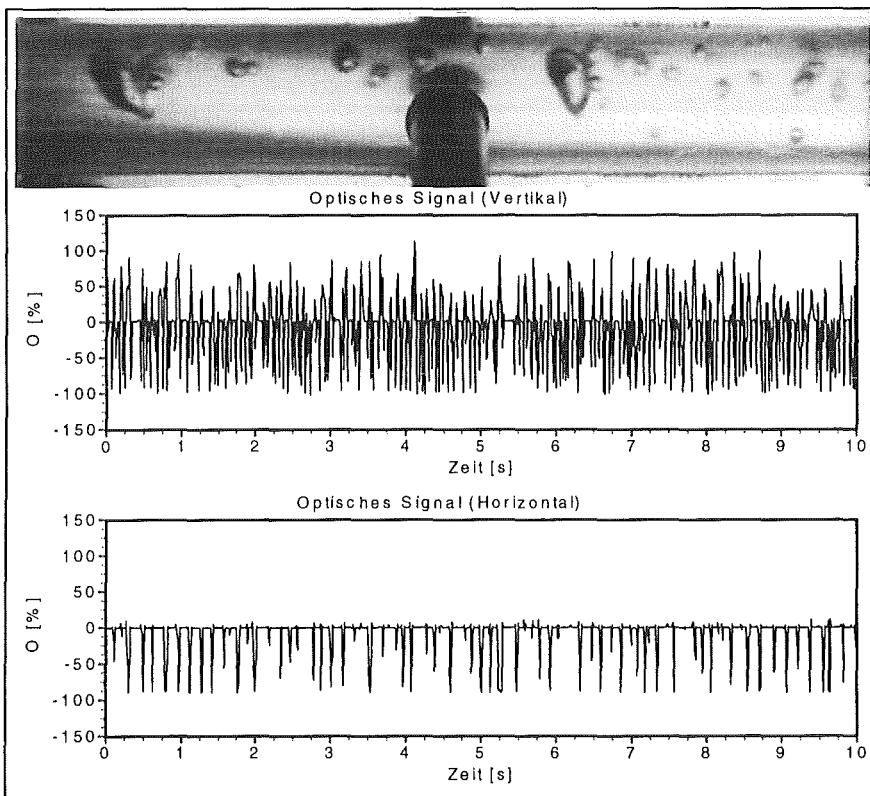


Abb. 2-14: Blasenströmung mit zugehörigen optischen Signalen

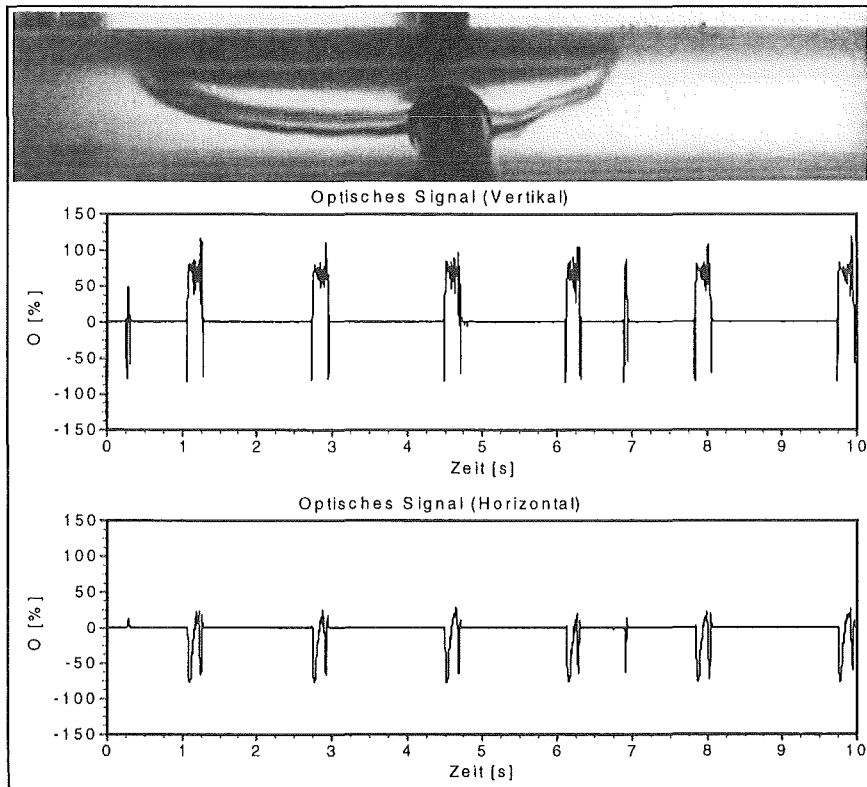


Abb. 2-15: Pffrofenströmung mit zugehörigen optischen Signalen

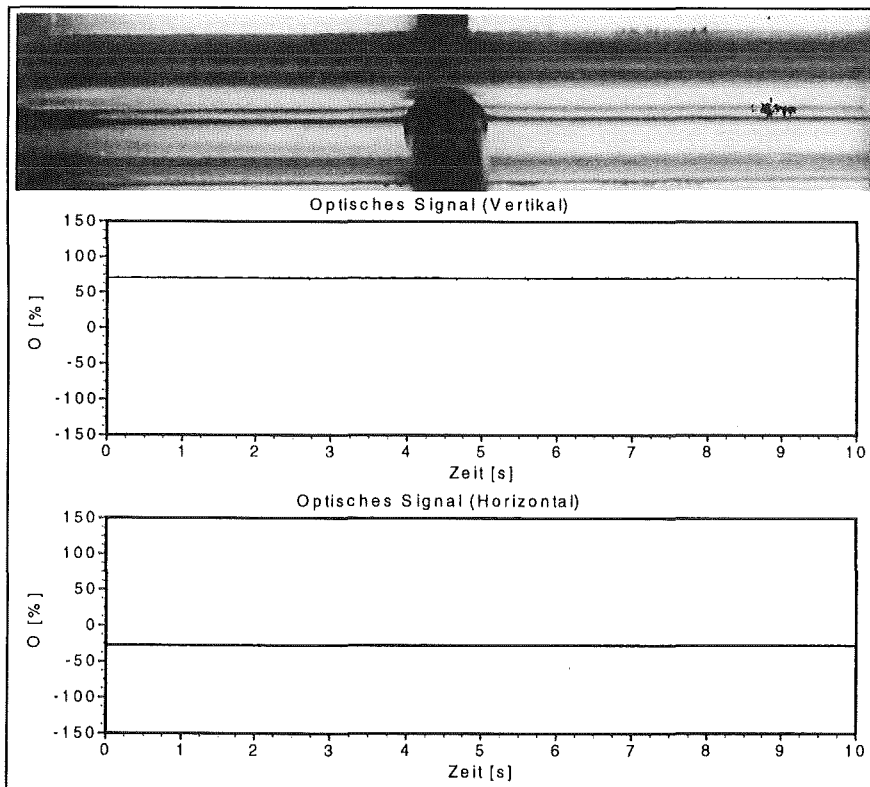


Abb. 2-16: Schichtenströmung mit zugehörigen optischen Signalen

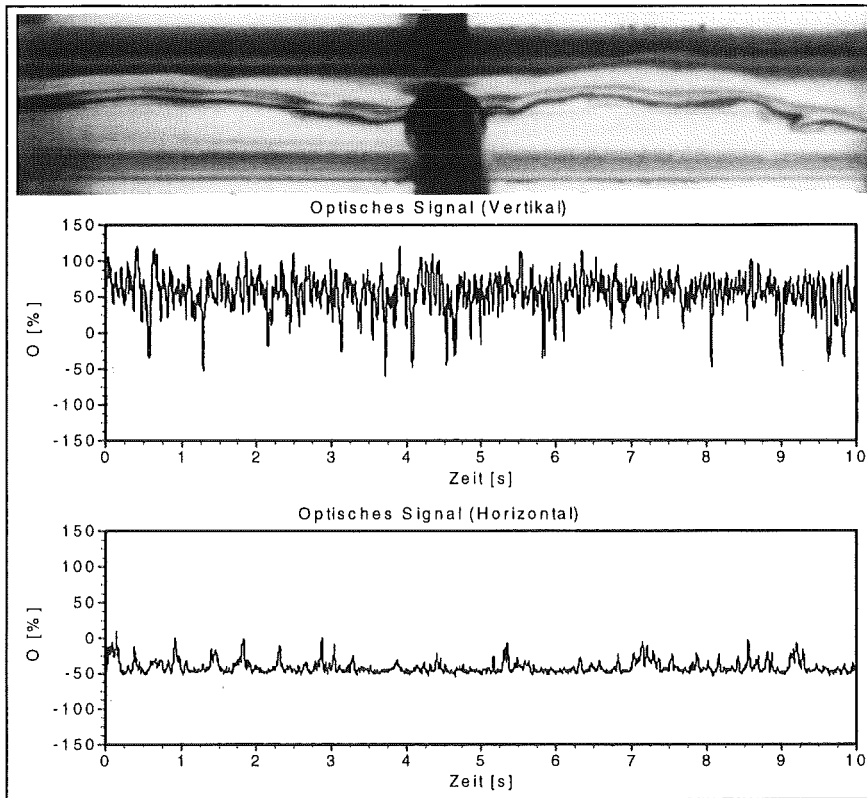


Abb. 2-17: Wellenströmung mit zugehörigen optischen Signalen

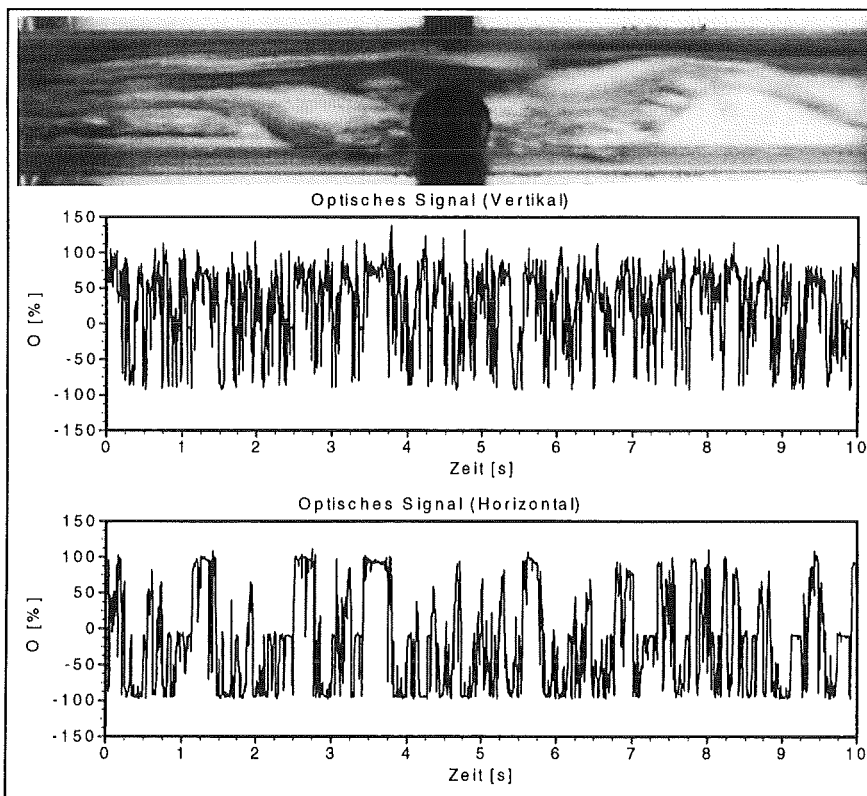


Abb. 2-18: Schwallströmung mit zugehörigen optischen Signalen

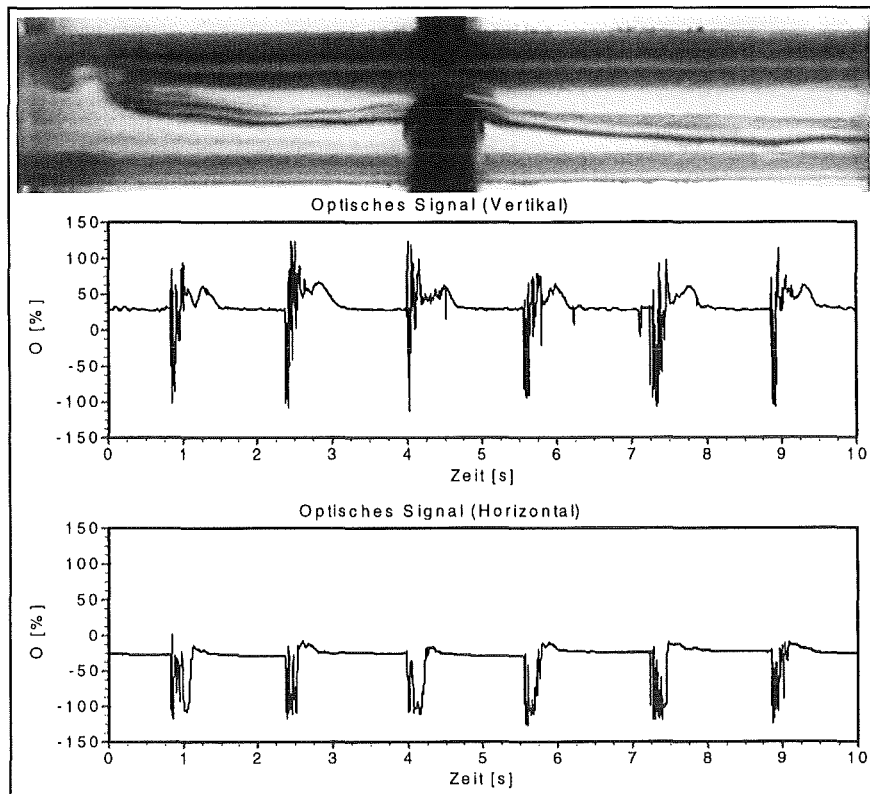


Abb. 2-19: Wellen-Schwallströmung mit zugehörigen optischen Signalen

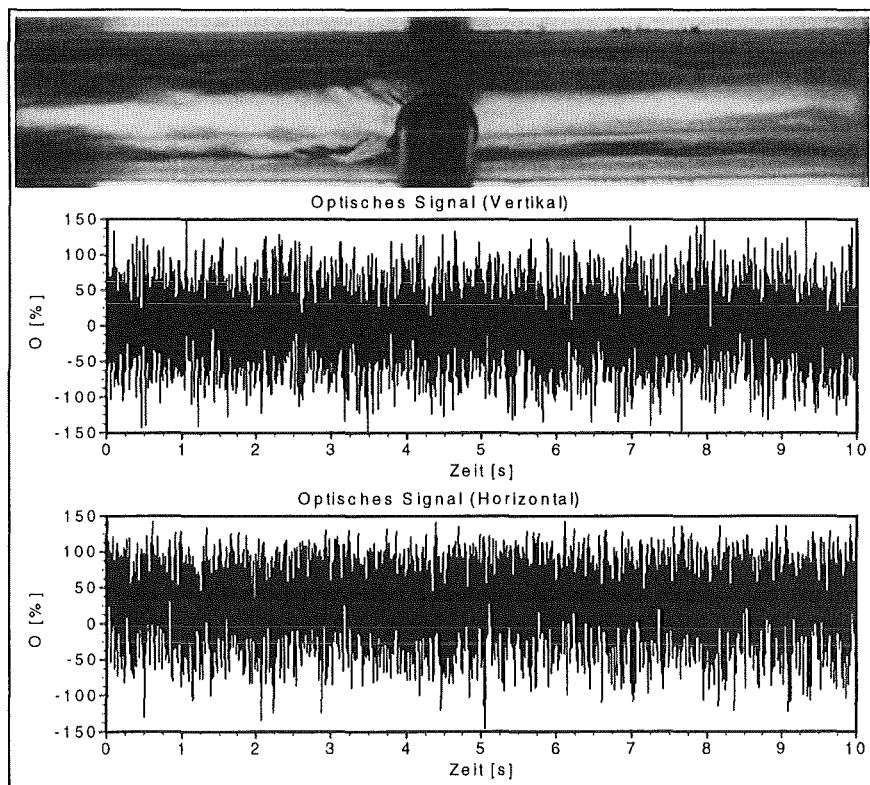


Abb. 2-20: Ringströmung mit zugehörigen optischen Signalen

### **2.3.2 Nachweis der mechanischen Stabilität und der Strömungsformerkennung bei erhöhtem Druck**

In diesem Kapitel sollen alle Aspekte, die durch erhöhte Drücke und erhöhte Temperaturen beeinflusst werden, untersucht werden. Hierzu wurde ein Autoklav mit einem Innendurchmesser von 60 mm und einer Innenhöhe von 180 mm gefertigt (Abb. 2-21). In der Wand sind nach Abb. 2-9 zwei Bohrungen mit Gewinde für die Aufnahme einer Sender- und einer Empfängereinschraubung angebracht. Drei Thermoelemente sind in verschiedenen Höhen im Inneren des Behälters angebracht und ein Thermoelement in der Wand. Zur Druckmessung ist ein Manometer vorhanden.

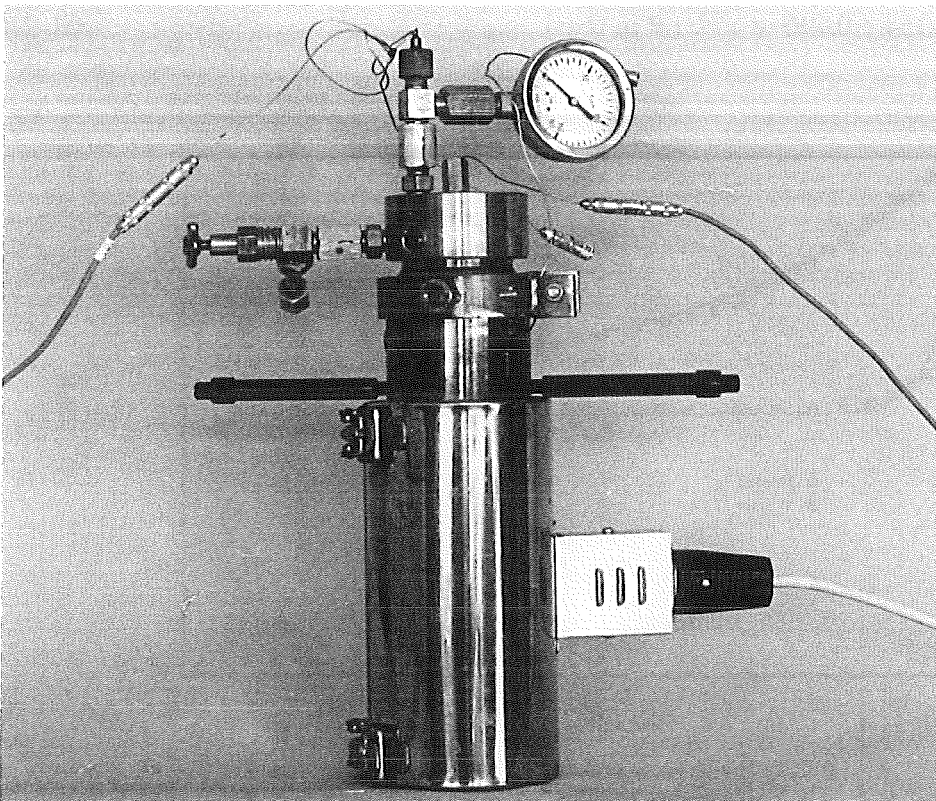


Abb. 2-21: Autoklav mit zwei Einschraubungen für Tests bei erhöhtem Druck

Für die Tests wurde der Autoklav bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, verschlossen und durch eine Wandheizung Wärme zugeführt. Die Einschraubungen waren im oberen Drittel des Behälters angebracht, der drehbar auf einer Achse befestigt wurde. Bei leichtem Überdruck wurde die noch vorhandene Luft aus dem Behälter abgelassen, so daß ein reines Zweiphasengemisch bei Sättigungsbedingungen entstand.

Ein besonderes Interesse galt der mechanischen Stabilität bzw. der Aufrechterhaltung der Meßfunktion während der gleichzeitigen chemischen, thermischen und mechanischen Beanspruchung. Hierzu wurde ein Druck von 130 bar für eine Zeit von über 100 Stunden erzeugt, dann in 5 Zyklen zwischen 1 und 130 bar verfahren und schließlich der Behälter mit den Einschraubungen mit kaltem Wasser mit 150 bar abgedrückt. Das während der Tests gemessene Signal zeigte, daß die Meßfunktion für alle Bedingungen aufrechterhalten werden konnte.

Das Dichteverhältnis von Wasser zu Dampf nimmt mit steigendem Druck ab (vergl. Kapitel 2.2.1). Für die Meßfunktion ist ein ausreichendes Intensitätsverhältnis von Wasser zu Dampf für alle Drücke nötig. Aus diesem Grund wurde in dem Autoklaven die Intensitätsänderung als Funktion von Druck bzw. Temperatur im Wasser und im Dampf untersucht. In ursprünglicher Lage befanden sich die Einschraubungen im Dampf und bei Drehung des Autoklaven um  $180^\circ$  im Wasser. Abb. 2-22 zeigt die Änderung der Intensität im Verhältnis zur Intensität bei Atmosphärendruck ( $I_{0,l}$ ,  $I_{0,g}$ ) für gesättigtes Wasser und gesättigten Wasserdampf als Funktion des Druckes. Eine Exponentialfunktion liefert eine gute Approximation für Dampf:

$$\frac{I_g(P)}{I_{0,g}} = 0.54 + 0.496 \cdot e^{-\left(\frac{P}{33.8}\right)}; P \text{ in [bar]} \quad \text{Gl. 2-6}$$

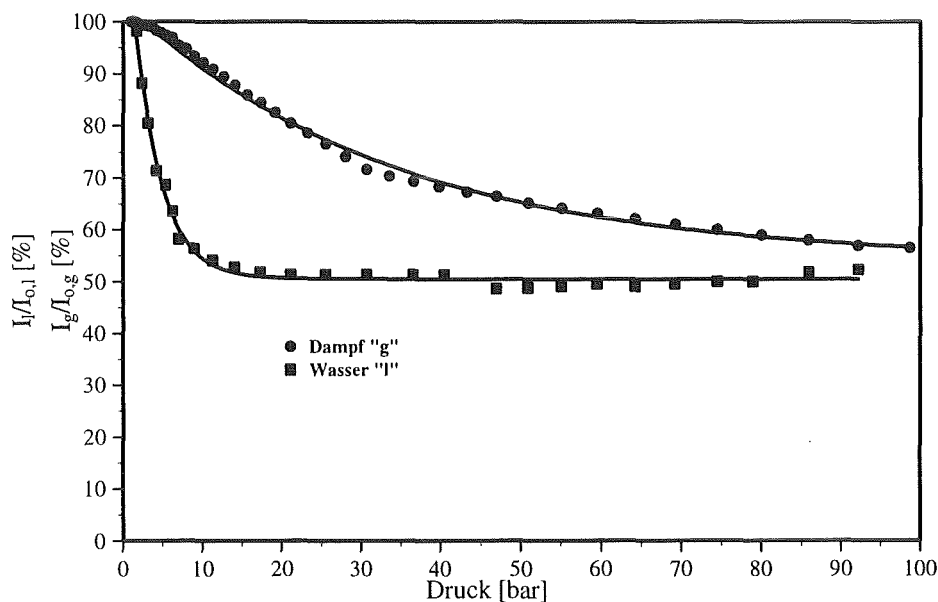


Abb. 2-22: Änderung der Intensität als Funktion des Druckes bei gesättigtem Wasser und Wasserdampf

Für Wasser hat die in Abb. 2-22 gezeichnete Approximationskurve folgenden Verlauf:

$$\frac{I_l(P)}{I_{0,l}} = 0.51 + 0.768 \cdot e^{-\left(\frac{P}{3.38}\right)}; P \text{ in [bar]} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Zur Messung des Intensitätsverhältnisses des Lichtes von Wasser zu Dampf ( $I_l/I_g$ ) wurde der Autoklav beim jeweiligen Druck zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  gedreht, so daß sich in der Position der Einschraubungen entweder Dampf oder Wasser befand. Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 2-23 dargestellt. Das Intensitätsverhältnis liegt bei allen Temperaturen und Drücken bei 0.4, so daß die Meßfunktion im gesamten Betriebsbereich gewährleistet ist. Das Ergebnis bestätigt in etwa die für vereinfachte Bedingungen durchgeführten Berechnungen in Kapitel 2.2.2.

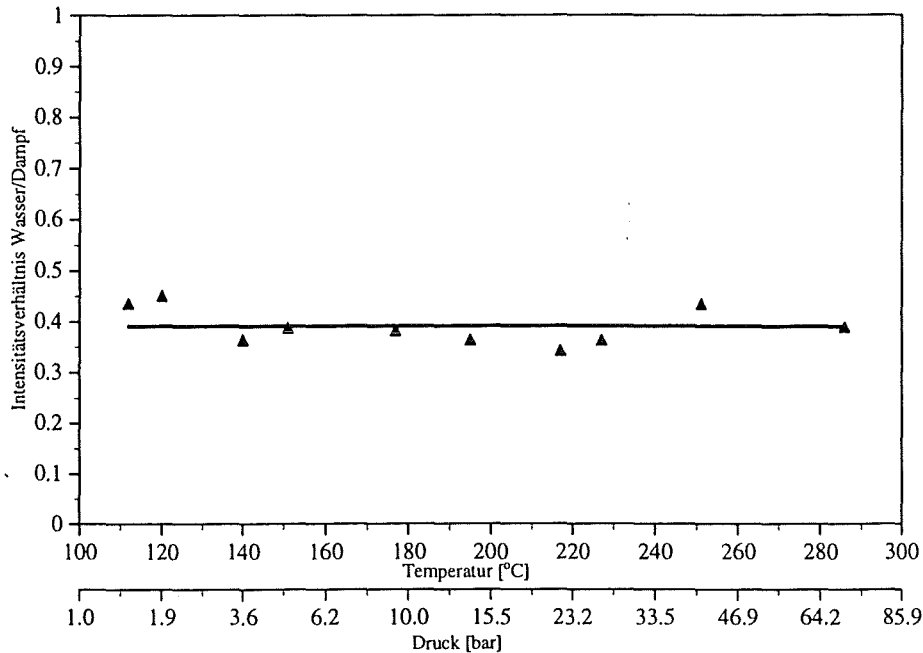


Abb. 2-23: Intensitätsverhältnis Wasser/Dampf bei Sättigungsbedingungen als Funktion von Druck und Temperatur

Mit der Vorrichtung wurden schließlich verschiedene Strömungsformen bzw. Oberflächenstrukturen von Phasengrenzflächen bei Drücken zwischen 1 und 100 bar erzeugt. Die Einphasenströmung (Dampf oder Wasser) entstand in den Positionen  $0^\circ$  und  $180^\circ$ . Durch Drehung des Autoklaven um  $90^\circ$  konnte eine Schichtenströmung erzeugt werden, da sich eine Wasserschicht und eine Dampfschicht senkrecht zur optischen Achse befand. Durch Anregung des Autoklaven durch Stöße entstanden Wellen auf der Phasengrenzfläche, so daß eine Wellenströmung resultierte. Bei allen Drücken und Temperaturen zeigte sich, daß zu allen Strömungsformen eindeutige und charakteristische Signalmuster analog zu den Signalmustern in Kapitel 2.3.1 entstanden.

## 2.4 Automatische Strömungsformbestimmung durch Signalmustererkennung

In Kapitel 2.3 wurde gezeigt, daß zu jeder Strömungsform ein charakteristisches Signalmuster gehört und daß somit durch eine Signalmusterinterpretation die Strömungsform bestimmt werden kann. Die Interpretation der Signale erfolgte bisher durch einen geschulten Menschen, der durch das physikalische Verständnis der Signalentstehung aus der grafischen Darstellung der Signale die jeweilige Strömungsform bestimmte. Bei umfangreichen Messungen kann diese Aufgabe sehr zeitintensiv sein. Das Ziel der automatischen Strömungsformerkennung soll daher eine Zeitersparnis durch eine schnelle Verarbeitung durch einen Rechner sein.

Die automatische Strömungsformerkennung soll für Dampf-Wasser-Versuche eingesetzt werden. Zur Entwicklung und zum Test der Strömungsformerkennung werden daher Meßdaten aus Dampf-Wasser-Versuchen benötigt. Um die Signalmustererkennung als Teil der Meßsystementwicklung geschlossen darstellen zu können, ist hier ein Vorgriff auf Daten von Dampf-Wasser-Versuchen nötig, die in Kapitel 4 beschrieben werden.



### 2.4.1 Vorgehensweise

Bei der Erkennung von Signalverläufen besteht, ähnlich wie bei der Bilderkennung, die Problematik, daß keine einzelnen Größen oder Rechenvorschriften ausreichen, um verschiedene Muster zu unterscheiden. Erst durch die Kombination verschiedener Größen kann eine Klassifizierung vorgenommen werden.

Bekannte Verfahren zur Mustererkennung unterscheiden zwischen einer Phase der Merkmalextraktion und einer Klassifizierungsphase [64,65]. In dieser Arbeit wird ein solches Verfahren auf den Fall der Strömungsformerkennung angepaßt und modifiziert, Abb. 2-24.

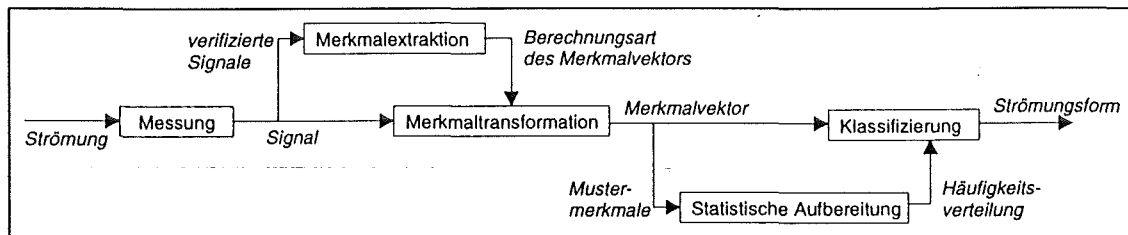


Abb. 2-24: Vorgehensweise bei der Mustererkennung

In der Zweiphasenströmung werden durch Messungen Signale von bekannten Strömungsformen erzeugt. Mit diesen verifizierten Signalen wird eine Merkmalextraktion durchgeführt, wodurch Merkmale, d.h. Werte gefunden werden sollen, die eine bestimmte Strömungsform eindeutig beschreiben bzw. verschiedene Strömungsformen voneinander abgrenzen. Durch die Merkmalextraktion wird die Berechnungsart des Merkmalvektors festgelegt. Die Merkmaltransformation berechnet den Merkmalvektor aus den Signalen. Mustermerkmale aus bekannten Signalen werden statistisch aufbereitet und bilden in Form einer Häufigkeitsverteilung die Grundlage für die Klassifizierung, wo über die Zugehörigkeit zu einer Klasse, d.h. Strömungsform entschieden wird. Das Verfahren wurde in einem Rechenprogramm implementiert.

Aus dem Ablaufdiagramm ergeben sich drei in zeitlicher Abfolge liegende Phasen: Merkmalextraktionsphase, Vorbereitungsphase und Klassifizierungsphase. Diese Phasen und die sich aus Abb. 2-24 ergebenden Pfade werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

### 2.4.2 Merkmalextraktionsphase

Die Vorgehensweise der Merkmalextraktionsphase geht aus Abb. 2-25 hervor. Durch die Merkmalextraktion werden aus verifizierten Signalen, d. h. aus Signalen, zu denen die Strömungsform bekannt ist, Merkmale abgeleitet. Die dabei festzulegende Berechnungsart des Merkmalvektors, dessen Komponenten die Merkmalwerte sind, soll ein Signal eindeutig einer Klasse (Strömungsform) zuordnen. Die Merkmalextraktion ist die Basis und somit die wichtigste und zeitintensivste Phase der Mustererkennung.

Merkmale können beliebige, aus dem zeitabhängigen Signal berechnete Werte sein. In Vorversuchen mit Meßsignalen aus Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen [66] wurde aus einer Vielzahl von Merkmalen eine Vorauswahl getroffen. Dabei zeigte sich, daß für die

meisten Strömungsformen die Auswertung von Merkmalen des Vertikalsignals ausreichend sind. Zur Identifizierung der Ringströmung und für komplexe Mischformen von Strömungsprofilen wird auch das horizontale Signal verwendet. Im folgenden werden nun Merkmale aus dem Amplituden-, Zeit-, und Frequenzbereich beschrieben.

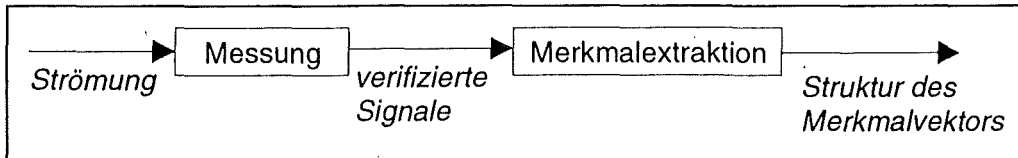


Abb. 2-25: Vorgehensweise in der Merkmalsextraktionsphase

Zur Bewertung der Qualität eines Merkmals werden die Merkmalwerte für bekannte, verifizierte Signale aller Strömungsformen statistisch dargestellt. Es sind mehrere Signale notwendig, da die Strömungsformen und somit auch die Signale stochastischen Charakter haben. Aus der statistischen Verteilung, die aus ca. 30 Mustersignalen pro Strömungsform entsteht, läßt sich erkennen, welche Strömungsformen mit dem betreffenden Merkmal voneinander abgegrenzt werden können. Auf der Ordinate der folgenden Bilder ist jeweils die Häufigkeit und auf der Abszisse sind die Merkmalwerte aufgetragen.

In der Merkmalsextraktionsphase wird versucht, möglichst viele Merkmale zur Unterscheidung von Strömungsformen zu finden, um hohe Trefferquoten für die Strömungsformerkennung zu erreichen.

#### **2.4.2.1 Merkmale im Amplitudenbereich**

Einen guten Überblick über das Amplitudenverhalten des Signals erhält man durch die Berechnung der Amplitudendichteverteilung (Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung, PDF). Im folgenden werden für alle Strömungsformen typische Signale des vertikalen Strahlenganges und die berechnete Amplitudendichteverteilung gezeigt. Die Berechnung erfolgte durch eine dynamische Einteilung des Amplitudenbereiches in 20 Klassen, die in einem Histogramm dargestellt werden. Aus diesem Grund kommt es in Abb. 2-26 bis Abb. 2-31 bei einer festen Abszissenskalierung zu verschiedenen Balkenbreiten.

Die Amplitudendichteverteilung der Blasenströmung (Abb. 2-26) streut über einen weiten Amplitudenbereich. Zwischen den Blasen kehrt das Signal auf das Signalniveau von Wasser (0 %) zurück (vergl. Kapitel 2.3.1, Abb. 2-14), so daß in der Amplitudendichteverteilung ein ausgeprägtes Maximum beim Signalniveau des einphasigen Wassers zu erkennen ist.

Bei der Pfropfenströmung (Abb. 2-27) ergeben sich für die Amplitudendichteverteilung zwei Maxima. Das untere Maximum entsteht durch reines Wasser bei 0 % und ein oberes Maximum, das durch eine Häufung von Meßwerten beim Durchströmen von Pfropfen durch den Meßquerschnitt entsteht, befindet sich zwischen 50 % und 100 %. Das untere Maximum ist ein Maß für die Summe der Zeitintervalle, in denen Wasser durch den Meßquerschnitt geströmt ist und das obere Maximum ist ein Maß für die

Zeitintervalle, in denen ein Pfropfen durch den Meßquerschnitt geströmt ist, also ein Maß für die Ausdehnung des Pfropfens in axialer Richtung des Rohres.

Die Schichtenströmung hat definitionsgemäß eine geringe Amplitudenstreuung und ein Maximum, das sich je nach Schichthöhe zwischen 0 und 100 % befindet (Abb. 2-28).

Die Amplitudendichteverteilung von Wellenströmungen ähnelt einer Gaußverteilung (Abb. 2-29). Der Streubereich (Standardabweichung) hängt von der Ausprägung von Wellbergen und Wellentälern ab.

Schwallströmungen haben einen weit streuenden Signalverlauf, der zu einer breiten und je nach Art der Schwälle relativ gleichmäßigen Amplitudendichteverteilung führt (Abb. 2-30).

Wellen-Schwallströmungen und Pfropfenströmungen haben trotz ihrer unterschiedlichen strömungstechnischen Entstehung ähnliche Signal- und Amplitudendichteverteilungen (Abb. 2-31). Das untere Maximum ist jedoch bei der Wellen-Schwallströmung niedriger, da kein reines Wasser durch den Meßquerschnitt strömt.

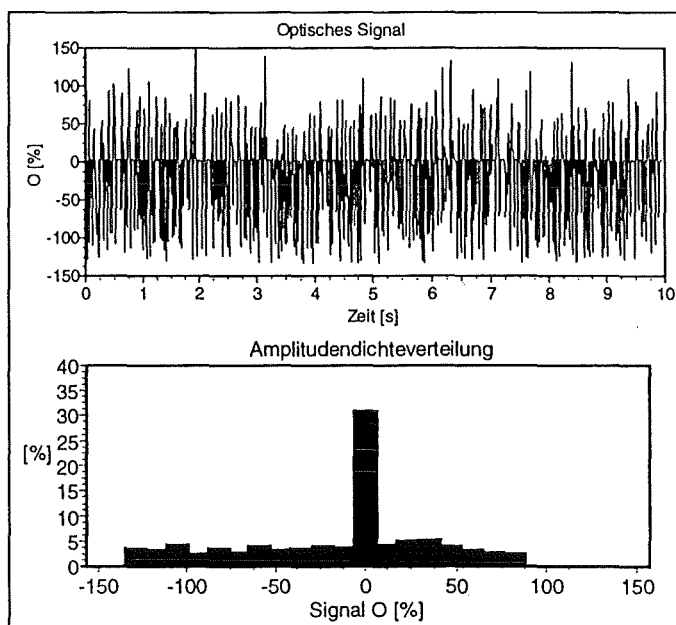


Abb. 2-26: Vertikales Signal für eine Blasenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung

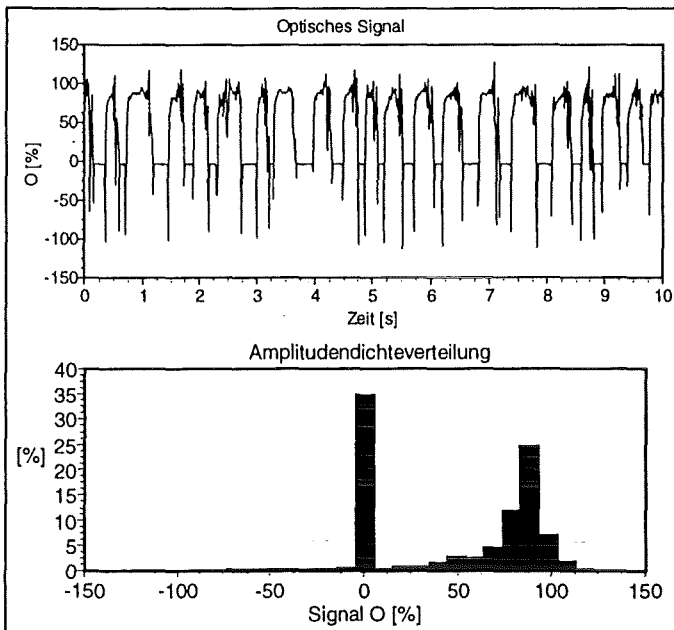


Abb. 2-27: Vertikales Signal für eine Pfropfenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung

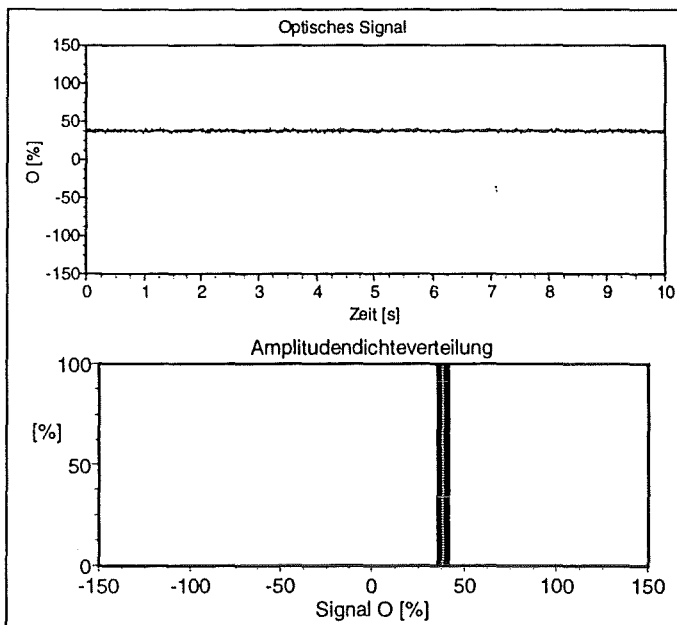


Abb. 2-28: Vertikales Signal für eine Schichtenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung

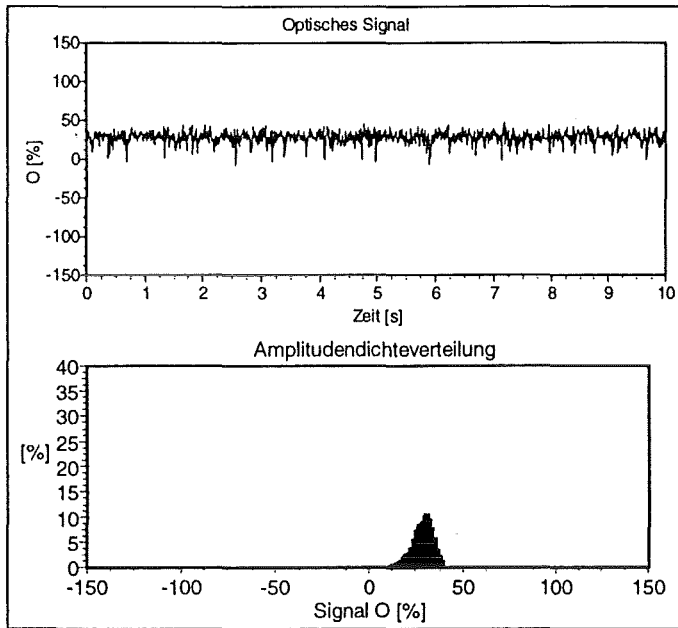


Abb. 2-29: Vertikales Signal für eine Wellenströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung

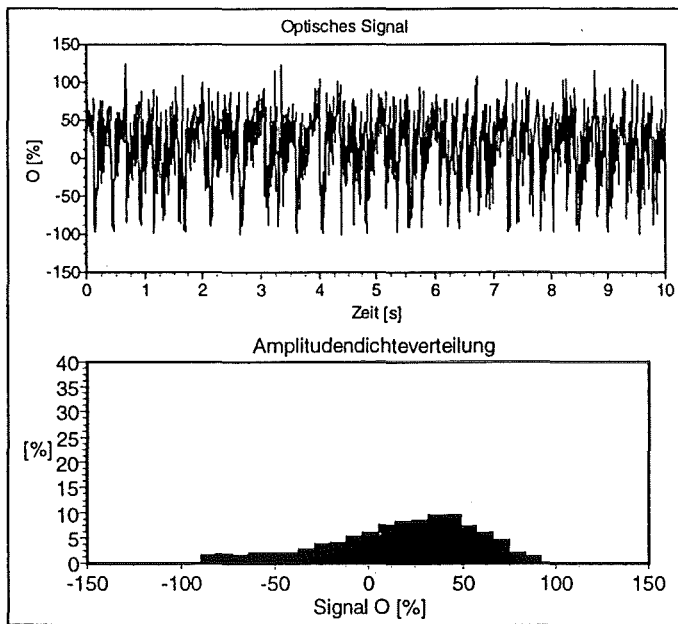


Abb. 2-30: Vertikales Signal für eine Schwallströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung

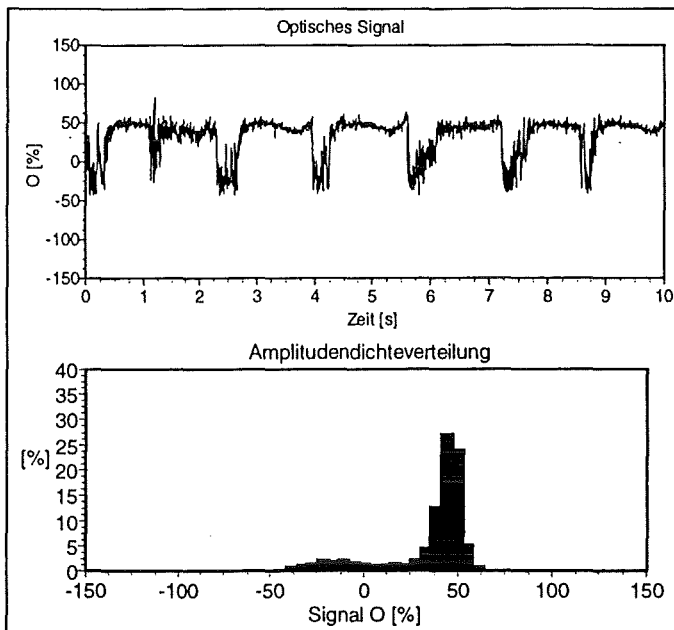


Abb. 2-31: Vertikales Signal für eine Wellen-Schwallströmung mit zugehöriger Amplitudendichteverteilung

Aus den oben diskutierten Amplitudendichteverteilungen können verschiedene Merkmale abgeleitet werden, die in diesem Kapitel beschrieben werden.

Zunächst soll die *Lage des Maximums* der Amplitudendichteverteilung als Merkmal untersucht werden. Hierzu wurde dieses Merkmal für ca. 30 Signale pro Strömungsform berechnet. Bei den Signalen handelte es sich um verschiedene Ausprägungen der selben Strömungsform, die für alle Signale bekannt war. Die Ergebnisse der Merkmalsberechnung werden für alle Strömungsformen in einem Histogramm (Abb. 2-32) dargestellt. Auf der Abszisse ist der Merkmalswert (die Lage des Maximums) und auf der Ordinate die Häufigkeit aufgetragen, die durch eine Einteilung des Wertebereiches in 50 Klassen berechnet wurde.

Anhand der Häufigkeitsverteilung kann die Qualität des Merkmals beurteilt werden. Zur Unterscheidung zwischen Strömungsformen müssen sich die Bereiche, in denen die Merkmalswerte für verschiedene Strömungsformen liegen, voneinander unterscheiden. Das Merkmal in Abb. 2-32 kann zur Unterscheidung zwischen Blasen- und Wellenströmungen dienen, da sich ihre Amplitudenbereiche kaum überschneiden. Weitere Abgrenzungen sind schwerlich möglich, da sich die Bereiche für die anderen Strömungsformen überschneiden.

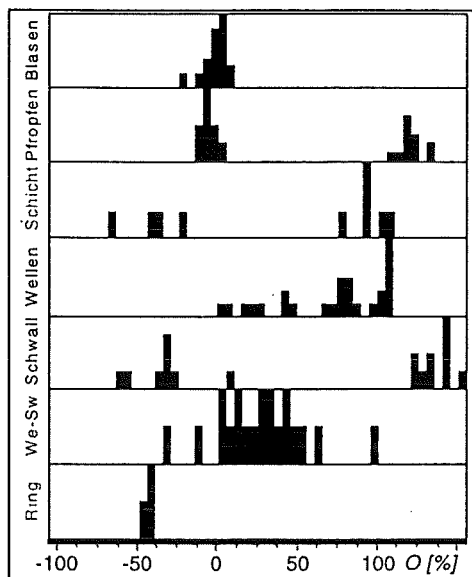


Abb. 2-32: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Lage Maximum'

Als weiteres Merkmal der Amplitudendichteverteilung soll die *Maximumsüberhöhung* untersucht werden. Hierbei wird der Maximalwert der Amplitudendichteverteilung (vergl. Abb. 2-26 bis Abb. 2-31) durch den höheren der beiden Werte der angrenzenden Klasse dividiert. Da die Ergebnisse über mehrere Größenordnungen variieren, wird der Logarithmus des Verhältnisses berechnet.

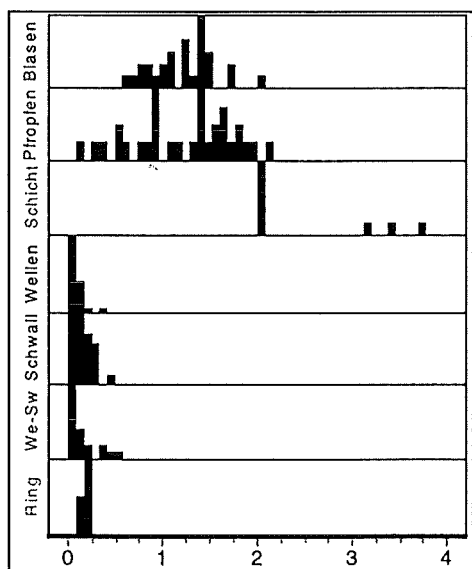


Abb. 2-33: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Maximumsüberhöhung'

Abb. 2-33 zeigt, daß das Merkmal gut zur Unterscheidung zwischen Blasenströmungen und den anderen Strömungsformen, außer Pfropfenströmungen, geeignet ist. Weiterhin können Pfropfenströmungen von den anderen Strömungsformen, außer Blasenströmungen, unterschieden werden. Die Unterscheidung zwischen Blasen- und Pfropfenströmungen kann über ein weiteres Merkmal erfolgen:

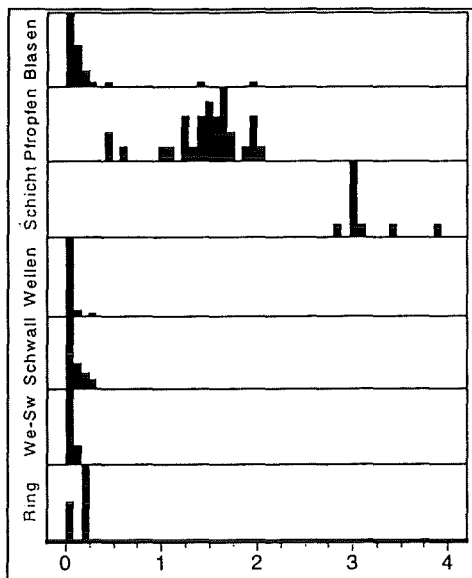


Abb. 2-34: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Maximumsüberhöhung unten'

Die *Maximumsüberhöhung unten* wird wie die Maximumsüberhöhung berechnet, jedoch wird nicht das absolute Maximum, sondern das lokale Maximum mit den niedrigsten Amplitudenwerten ausgewertet (z. B. der linke Balken in Abb. 2-27). Abb. 2-34 zeigt, daß Blasen- und Pfropfenströmungen mit diesem Merkmal gut zu unterscheiden sind.

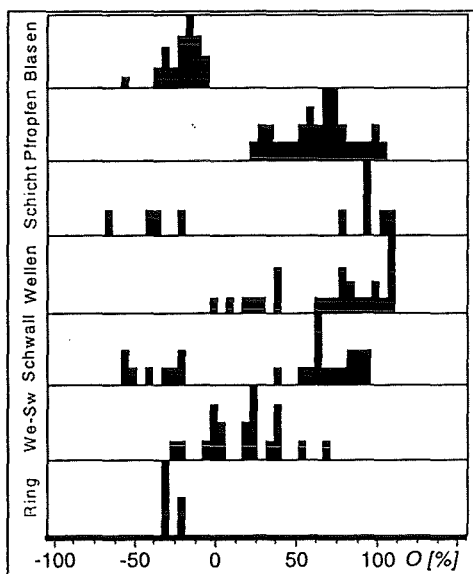


Abb. 2-35: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Arithmetischer Mittelwert'

Ein einfaches Merkmal im Amplitudenbereich ist der *arithmetische Mittelwert* des Signals, der sich aus den diskreten Meßwerten des  $y_i$  des digitalisierten Signals berechnet:

$$\bar{y} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a y_i$$

Gl. 2-8



$a$  ist die Gesamtzahl der Meßwerte. Die Statistik für dieses Merkmal ist für alle Strömungsformen in Abb. 2-35 zu sehen. Auch dieses Merkmal kann zur Unterscheidung zwischen Blasen- und Pfropfenströmungen verwendet werden.

Als weiteres Merkmal wird die *Standardabweichung* des Signals berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{a} \sum_{i=1}^a (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Gl. 2-9}$$

Die Statistik dieses Merkmals in Abb. 2-36 zeigt, daß die Werte der Schichtenströmung als einzige Strömungsform im unteren Bereich liegen, so daß mit dem Merkmal Standardabweichung eine Schichtenströmung erkannt werden kann.

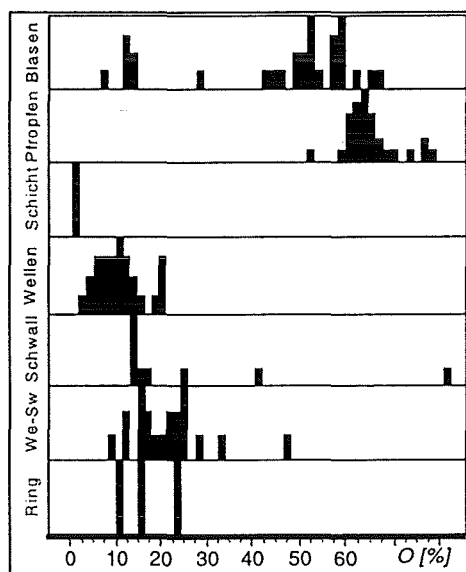


Abb. 2-36: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Standardabweichung'

### 2.4.2.2 Merkmale im Zeitbereich

Durch die Merkmale im Amplitudenbereich können nicht alle Strömungsformen voneinander unterschieden werden. Aus diesem Grund werden auch Informationen über das Zeitverhalten ausgewertet. Es haben sich Merkmale bewährt, die aus Durchgangverteilungen abgeleitet werden. In Durchgangverteilungen werden Zeitintervalle als Häufigkeit aufgetragen, für die das Signal eine Gerade oder Kurve schneidet.

Abb. 2-37 zeigt eine „Durchgangverteilung nach unten“ für eine Wellen-Schwallströmung. Es werden dabei die Zeitintervalle, die das Signal unterhalb einer Grenzgerade verharrt, untersucht und in einem Histogramm die Anteile der insgesamt 60 Zeitintervalle (Klassen) dargestellt. Die Grenze wird unabhängig von der Kalibrierung des Signals berechnet aus:

$$G_u = \bar{y} - \frac{\sigma}{4} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Das Merkmal *Peaks nach unten* erfaßt die kurzen Peaks, die sich nach unten erstrecken und berechnet sich durch die Summe der Werte der beiden kleinsten Zeitintervalle der Durchgangverteilung (die zwei linken Balken mit den niedrigsten Zeitintervallen in Abb. 2-37).

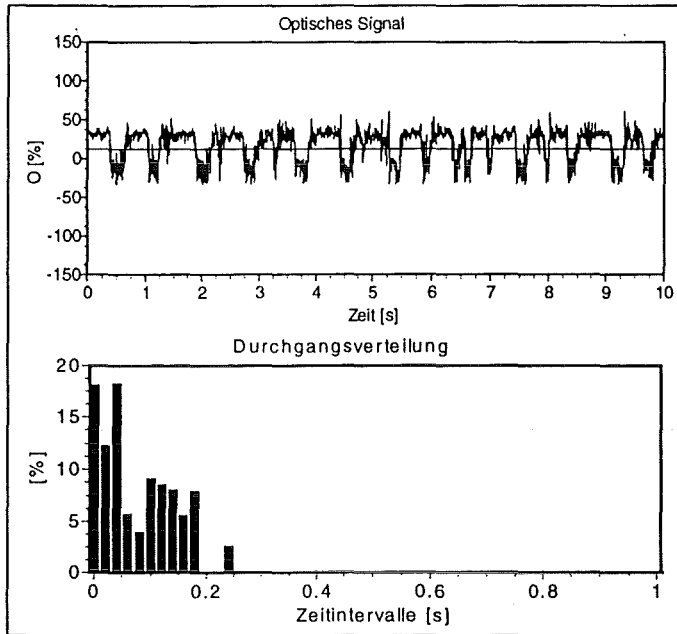


Abb. 2-37: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung mit Grenzgrade und Durchgangverteilung nach unten

Nach Abb. 2-38 lassen sich mit diesem Merkmal Schwall- und Wellen-Schwallströmungen von Wellenströmungen unterscheiden. Weiterhin sind Unterscheidungen zwischen Pfropfen- und Schwall-, bzw. Wellen-Schwallströmungen möglich.

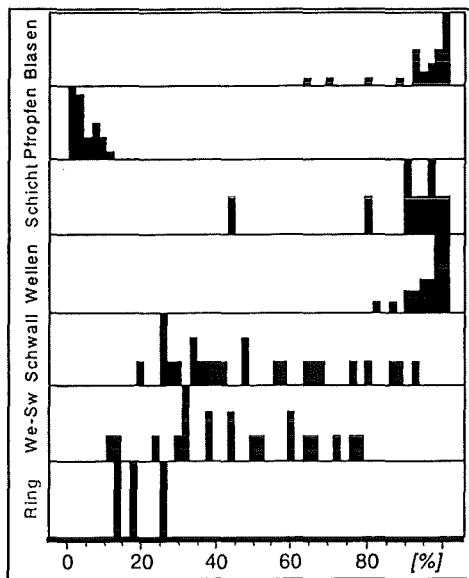


Abb. 2-38: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Peaks nach unten'

Analog zur „Durchgangsverteilung nach unten“ werden durch die „Durchgangsverteilung nach oben“ die Zeitintervalle beschrieben, für die das Signal oberhalb der Grenze

$$G_o = \bar{y} + \frac{\sigma}{4} \quad \text{Gl. 2-11}$$

verharrt. Das Merkmal *Peaks nach oben* wird durch die Summe der Werte der vier kleinsten Zeitintervalle der Durchgangsverteilung berechnet.

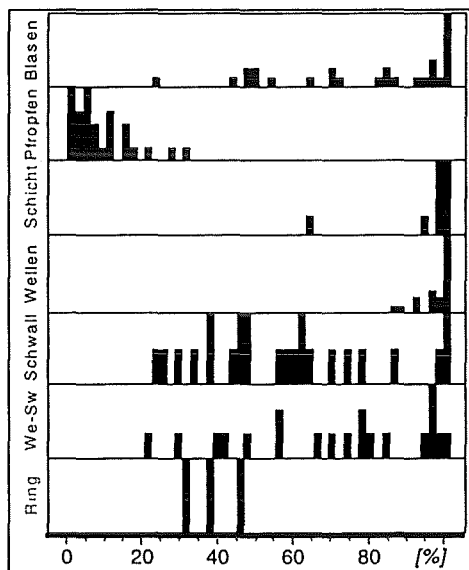


Abb. 2-39: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Peaks nach oben'

Das Merkmal dient, zusammen mit weiteren Merkmalen, zur Identifizierung von Wellenströmungen (vergl. Kapitel 2.4.4).

Weitere Informationen über den Kurvenverlauf lassen sich durch eine Glättungskurve gewinnen. Die Glättungskurve wird durch eine Mittelung der Signalkurve berechnet, bei der die hochfrequenten Anteile herausgefiltert werden.

Aus den beiden Kurven (Abb. 2-40) läßt sich eine Durchgangsverteilung der Signalkurve durch die Glättungskurve berechnen. In Abb. 2-40 ist die Verteilung der Zeitintervalle, in denen die Signalkurve die Glättungskurve schneidet, in einem Histogramm dargestellt.

Das Merkmal *Peaks durch Glättung* entspricht dem Wert des kleinsten Zeitintervalls der Durchgangsverteilung, so daß es ein Maß für die Anteile der kurzzeitigen Peaks der Signalkurve ist.

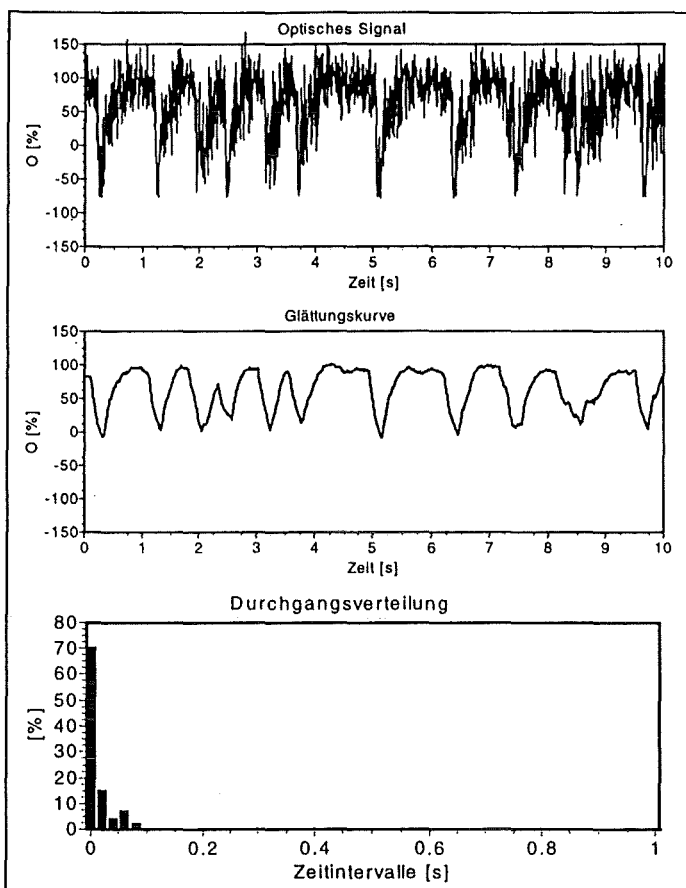


Abb. 2-40: Optisches Signal mit Glättungskurve und Durchgangverteilung

Die Statistik in Abb. 2-41 zeigt viele Überschneidungen bei den verschiedenen Strömungsformen. Das Merkmal erlaubt aber in vielen Fällen eine Trennung zwischen Schwall- und Wellen-Schwallströmungen (vergl. Kapitel 2.4.4).

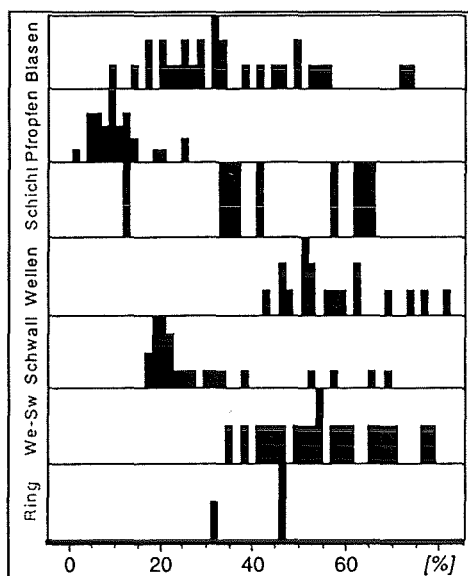


Abb. 2-41: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Peaks durch Glättung'

Die bisher beschriebenen Merkmale erlauben keine Erkennung der Ringströmung. Aufgrund der symmetrischen Anordnung des Flüssigkeitsfilmes ergibt sich ein ähnlicher

Signalverlauf für das horizontale und das vertikale Signal. Die Ähnlichkeit von Signalen wird durch die Kreuzkorrelationsfunktion beschrieben:

$$\phi_{HV}(\tau) = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a [y_H(t_i) \cdot y_V(t_i + \tau)] \quad \text{Gl. 2-12}$$

Die diskreten Meßwerte des Horizontalsignals  $y_H$  und des Vertikalsignals  $y_V$  liegen leicht zeitversetzt vor, da die verschiedenen Kanäle vor der Analog-Digitalwandlung durch einen Multiplexer geschaltet werden. Zur Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion nach Gl. 2-12 wird jeweils der Meßwert des Kanals mit der niedrigeren Meßfrequenz zwischen den beiden angrenzenden Meßwerten linear interpoliert.

Als Merkmal wird der *Kreuzkorrelationskoeffizient* zwischen horizontalem und vertikalem Signal bei einer Zeitverschiebung von  $\tau=0$  verwendet:

$$C_{HV}(\tau = 0) = \frac{\phi_{HV}(0) - \bar{y}_H \bar{y}_V}{\sigma_H \sigma_V} \quad \text{Gl. 2-13}$$

Abb. 2-42 zeigt die Statistik für das Merkmal. Die Ringströmung belegt als einzige Strömungsform den Wertebereich zwischen 90 % und 100 % und kann somit mit dem Merkmal identifiziert werden.

Die Autokorrelationsfunktion beschreibt die Erhaltungstendenz des Signals. Eine Analyse der Autokorrelationsfunktionen von Signalen verschiedener Strömungsformen führte zu keinen brauchbaren Merkmalen.

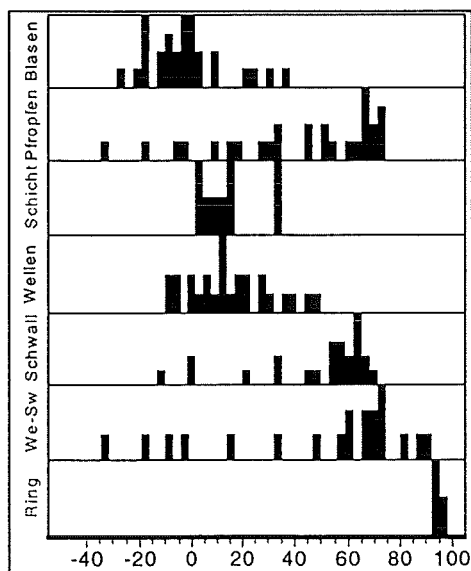


Abb. 2-42: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Kreuzkorrelationskoeffizient'

### 2.4.2.3 Merkmale im Frequenzbereich

Die Frequenzanalyse der Signale wurde durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) durchgeführt. Abb. 2-43 bis Abb. 2-47 zeigt die Spektren für die in Kapitel 2.4.2.1 beschriebenen Signale verschiedener Strömungsformen.

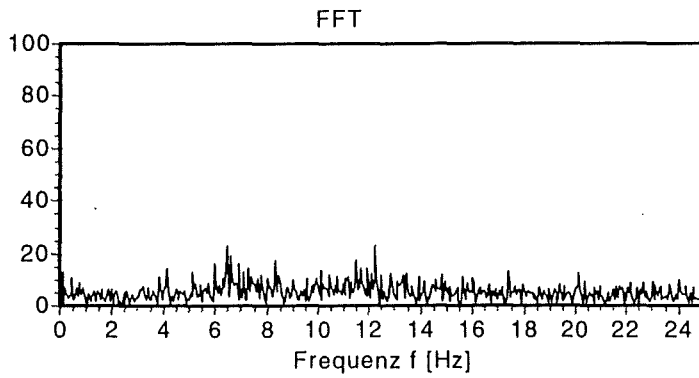


Abb. 2-43: Fouriertransformation des optischen Signals für die Blasenströmung nach Abb. 2-26

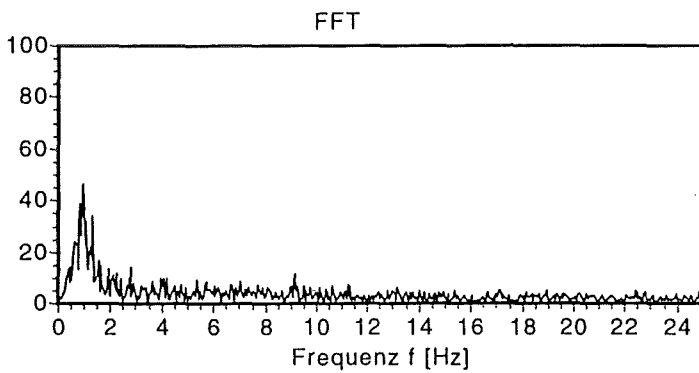


Abb. 2-44: Fouriertransformation des optischen Signals für die Pfropfenströmung nach Abb. 2-27

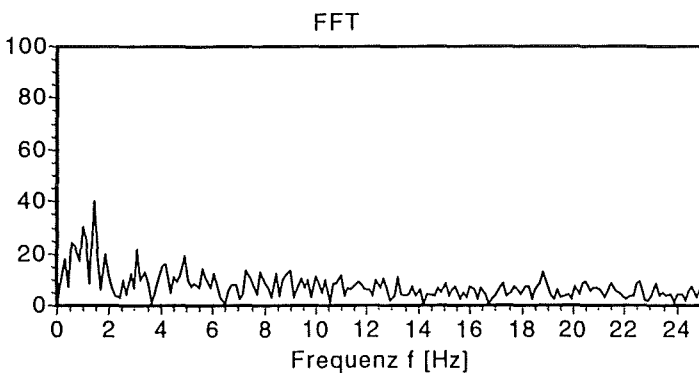


Abb. 2-45: Fouriertransformation des optischen Signals für die Wellenströmung nach Abb. 2-29

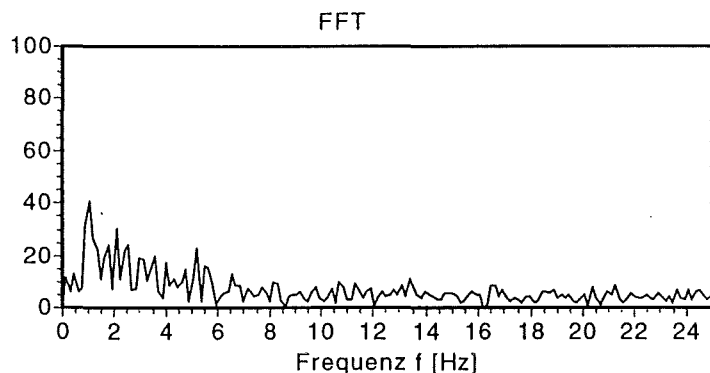


Abb. 2-46: Fouriertransformation des optischen Signals für die Schwallströmung nach Abb. 2-30

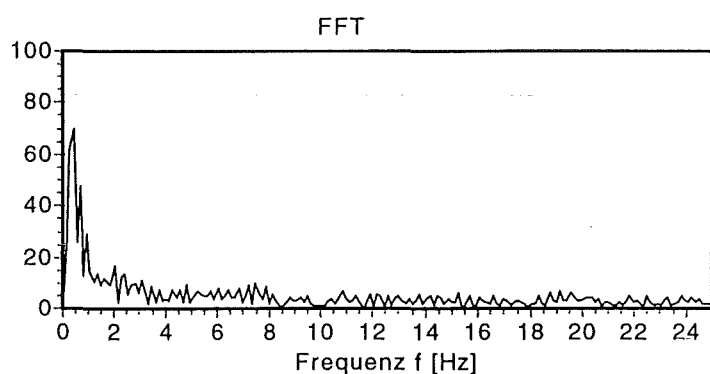


Abb. 2-47: Fouriertransformation des optischen Signals für die Wellen-Schwallströmung nach Abb. 2-31

Das Signal der Blasenströmung besteht aus vielen Frequenzanteilen ohne ausgeprägtes Maximum (Abb. 2-43). Die Fouriertransformation für das Signal der Pfropfenströmung (Abb. 2-44) zeigt ein Maximum bei der Pfropfenfrequenz von ca. 1 Hz, wohingegen für das Spektrum der Wellenströmung (Abb. 2-45) und der Schwallströmung (Abb. 2-46) keine ausgeprägten Maxima vorhanden sind. Ein deutlich ausgeprägtes Maximum zeigt das Spektrum für die Wellen-Schwallströmung (Abb. 2-47) bei der Schwallfrequenz von ca. 0.5 Hz.

Das Spektrum besteht für die meisten Strömungsformen aus vielen Frequenzanteilen, die sich für verschiedene Ausprägungen derselben Strömungsform stark verändern können. Die Maxima liegen für verschiedene Strömungsformen häufig in ähnlichen Bereichen. Beispielsweise können Pfropfenfrequenzen ähnlich den Schwallfrequenzen sein. Aus diesem Grund lassen sich aus dieser Frequenzanalyse keine für die Erkennung von Strömungsformen brauchbaren Merkmale ableiten.

Die Schwallfrequenzen können auf eine andere Weise effektiver bestimmt werden. In Abb. 2-48 ist zu sehen, daß die Wellen-Schwallströmung starke Intensitätsabnahmen beim Durchtritt von Schwällen durch den Meßquerschnitt aufweist (vergl. Kapitel 2.3.1). Um Signalschwankungen von höherfrequenten Wellen auf der Phasengrenzfläche zu eliminieren, wird das Signal geglättet und die Zeiten analysiert, zwischen denen das geglättete Signal jeweils mit negativem Gradienten durch einen Grenzwert

bzw. eine Grenzgerade tritt. Die Durchgangverteilung gibt einen Überblick über die Häufigkeit der Zeitintervalle.

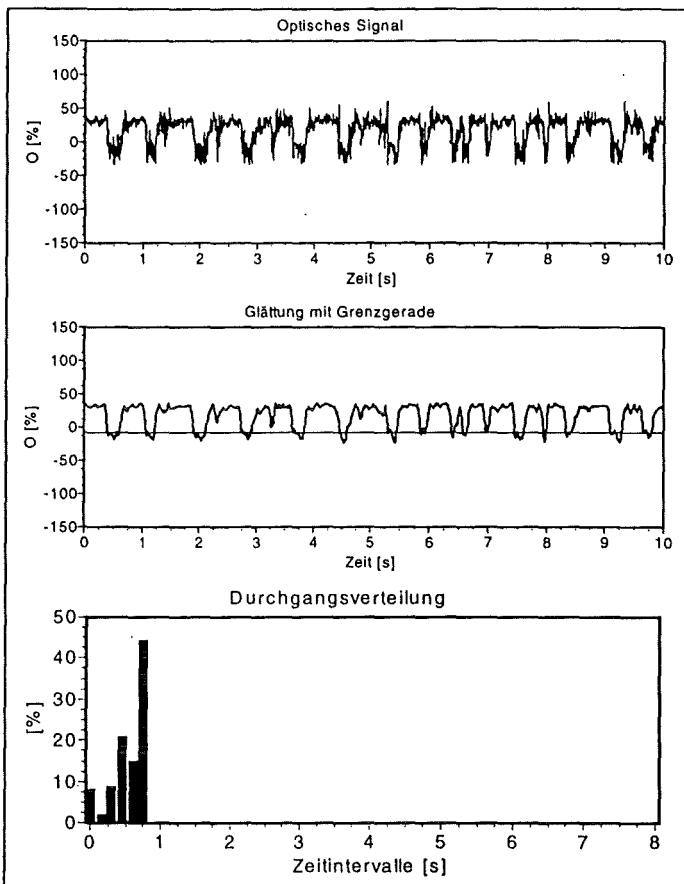


Abb. 2-48: Optisches Signal mit Glättungskurve, Grenzgerade und Durchgangverteilung

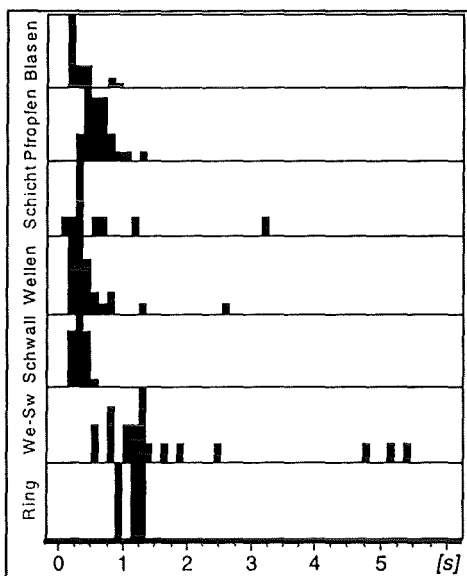


Abb. 2-49: Häufigkeitsverteilung für das Merkmal 'Schwallperiode'

Das Merkmal *Schwallperiode* wird durch eine Mittelung der Durchgangverteilung, bei der die Anteile der Schwallperioden gewichtet werden, berechnet. Die Statistik in Abb.



2-49 zeigt, daß Schwallströmungen kürzere Schwallperioden haben als Wellenschwallströmungen und das Merkmal somit zur Unterscheidung der beiden Strömungsformen geeignet ist.

### 2.4.3 Vorbereitungsphase

Nach Auswahl der Merkmale kann in einer Vorbereitungsphase die Vorbereitung für die eigentliche Mustererkennung in der Klassifizierungsphase durchgeführt werden. Hierzu wird nach Abb. 2-50 in einer bekannten Zweiphasenströmung eine Messung durchgeführt und somit Mustersignale erzeugt und archiviert.

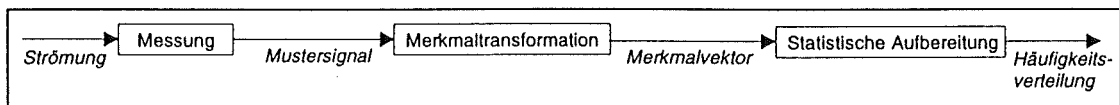


Abb. 2-50: Vorgehensweise in der Vorbereitungsphase

Die in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Merkmale sind in Tab. 2-6 zusammengefaßt. Für die 10 Merkmale wird eine Merkmalstransformation durchgeführt und somit ein Merkmalvektor für das Mustersignal erzeugt. Aus ca. 30 Mustersignalen pro Strömungsform wird dann für die 7 Strömungsformen eine Häufigkeitsverteilung berechnet (vergl. Kapitel 2.4.2).

Merkmal	Bereich
Lage des Maximums	Amplitudenbereich
Maximumsüberhöhung	Amplitudenbereich
Maximumsüberhöhung unten	Amplitudenbereich
Arithmetischer Mittelwert	Amplitudenbereich
Standardabweichung	Amplitudenbereich
Peaks nach unten	Zeitbereich
Peaks nach oben	Zeitbereich
Peaks durch Glättung	Zeitbereich
Kreuzkorrelationskoeffizient	Zeitbereich
Schwallperiode	Frequenzbereich

Tab. 2-6: Zusammenfassung der Merkmale zur Signalmustererkennung

Zur weiteren Bearbeitung der Häufigkeitsverteilungen wird eine Methode aus der Fuzzy Logik verwendet. Die Fuzzy Logik behandelt im Gegensatz zur Binärlogik auch die Bereiche zwischen zwei Grundzuständen. Diese Vorgehensweise ist sinnvoll, da sich Strömungsformen in der Realität nicht immer scharf voneinander trennen lassen, sondern es häufig einen Übergangsbereich mit Anteilen aus mehreren Strömungsformen gibt. Es wird hier versucht, diese Zusammenhänge durch die Anwendung der „unscharfen“ Logik auf die Häufigkeitsverteilungen zu beschreiben. Hierzu wird über

die Häufigkeitsverteilung eines Merkmals und einer Strömungsform ein Trapez gelegt (Abb. 2-51).

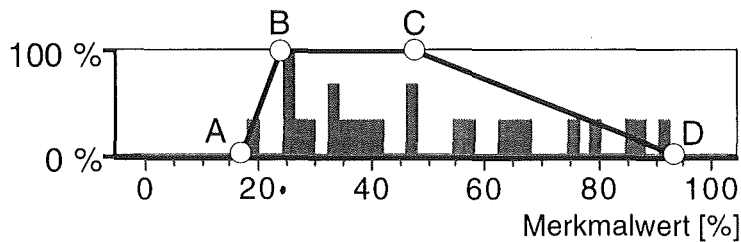


Abb. 2-51: Konstruktion der Zugehörigkeitsfunktion durch Anpassung eines Trapezes an die Häufigkeitsverteilung

Das Trapez wird den in der Vorbereitungsphase sich verändernden Häufigkeitsverteilungen dynamisch angepaßt. Die Randpunkte A und D werden an die Punkte gesetzt, an denen die äußersten Balken der Häufigkeitsverteilung mindestens 5 % des höchsten Balkens betragen. Der Punkt B bzw. C wird an den untersten bzw. obersten Balken gesetzt, der mindestens 35 % des höchsten Balkens beträgt. Diese Schwellenwerte wurden empirisch ermittelt [66]. Das Trapez stellt eine Zugehörigkeitsfunktion dar, die im Bereich des Plateaus einen Wert von 100 %, im Bereich der Flanken einen Wert zwischen 0 % und 100 % und außerhalb des Trapezes einen Wert von 0 % annimmt.

Als Resultat der Vorbereitungsphase stehen zu jedem der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Merkmale für die betreffenden Strömungsformen Zugehörigkeitsfunktionen zur Verfügung. Entsprechend ihrer strömungstechnischen Ähnlichkeit können sich die Zugehörigkeitsfunktionen für verschiedene Strömungsformen überschneiden. Abb. 2-52 zeigt als Beispiel die Zugehörigkeitsfunktionen für das Merkmal 'Peaks nach unten' für die Wellen- und Schwallströmung.

Der Übergang von einer Wellenströmung zu einer Schwallströmung ist durch ein Anwachsen der Wellenamplituden charakterisiert. Im Übergangsbereich sind Eigenschaften beider Strömungsformen zu finden, was durch den Bereich der Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben wird, in dem sich die Flanken überschneiden.

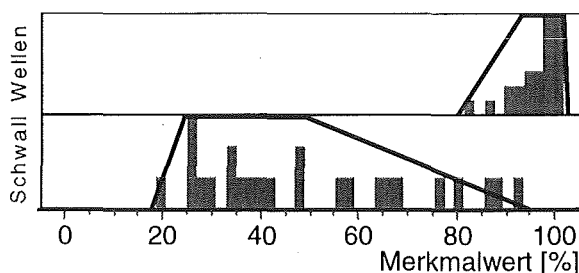


Abb. 2-52: Zugehörigkeitsfunktionen des Merkmals 'Peaks nach unten' für die Wellen- und Schwallströmung

#### 2.4.4 Klassifizierungsphase

Nachdem in der Vorbereitungsphase für jedes Merkmal und jede Strömungsform eine Zugehörigkeitsfunktion erzeugt wurde, kann in der Klassifizierungsphase die Musterer-

kennung vorgenommen werden. Es sollen dabei Messungen mit unbekannter Strömungsform klassifiziert werden. Die Vorgehensweise geht aus Abb. 2-53 hervor.

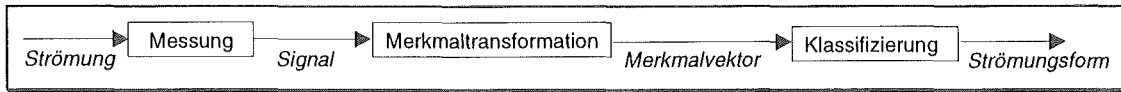


Abb. 2-53: Vorgehensweise in der Klassifizierungsphase

Es wird in einer Zweiphasenströmung mit unbekannter Strömungsform eine Messung durchgeführt. Mit dem gemessenen Signal wird eine Merkmaltransformation durchgeführt und der erzeugte Merkmalvektor einer Klassifizierung zugeführt. Hier wird durch die Anwendung der Merkmalwerte auf die Zugehörigkeitsfunktionen die Entscheidung über die Strömungsform gefällt. In den folgenden Beschreibungen der Klassifizierung wird die Zugehörigkeitsfunktion für eine bestimmte Strömungsform und ein Merkmal mit „Z(Strömungsform, Merkmal)“ abgekürzt.

Zunächst wird in einer Vorauswahl überprüft, ob es sich um eine Einphasen-, Schichten- oder Ringströmung handelt (Abb. 2-54). Wenn diese Strömungsformen nicht zutreffen, werden die restlichen Strömungsformen überprüft. In Tab. 2-7 sind die Kriterien zur Klassifizierung zusammengestellt.

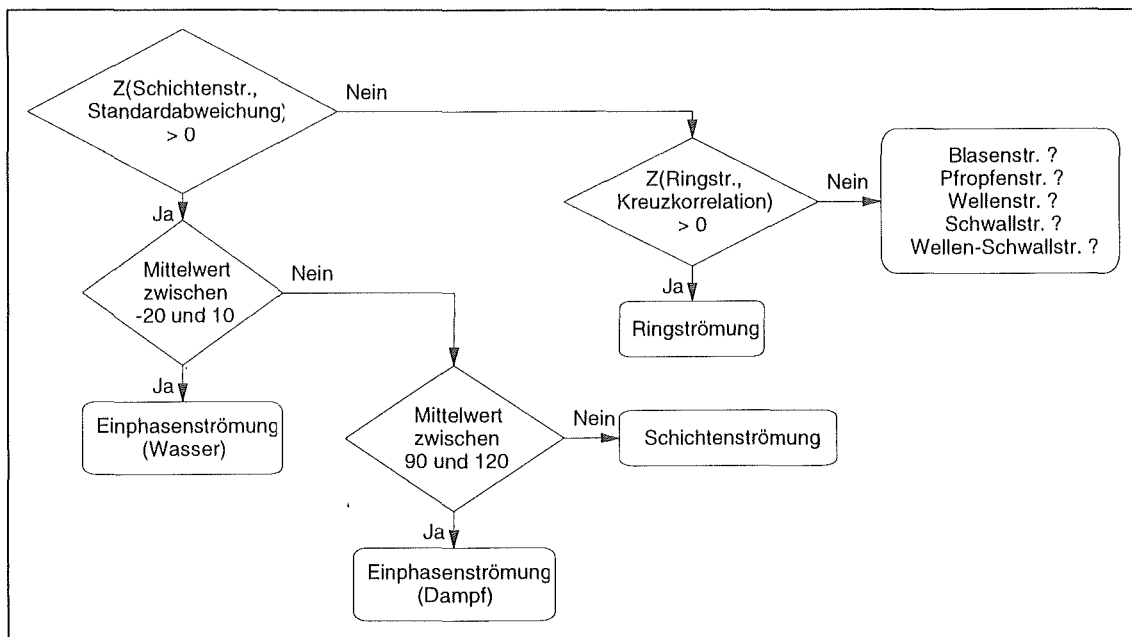


Abb. 2-54: Vorauswahl für Einphasen-, Schichten- und Ringströmungen

Es wird jeweils ein Ergebnis ausgegeben, wenn alle Kriterien für eine Strömungsform erfüllt sind. Dem Ergebnis wird eine Zahl zugefügt, die sich aus einer oder zwei Zugehörigkeitsfunktion berechnet (vergl. Tab. 2-7). Die Strömungsformen werden nicht im Ausschlußverfahren überprüft, so daß es mehrere Ergebnisse geben kann. Hierdurch können Übergangsformen erfaßt (vergl. Kapitel 2.4.3) und die Qualität der Kriterien überwacht werden.

Strömungsform	Kriterien	Ergebnis [%]
Blasen	$Z(\text{Blasen, Peaks nach unten}) > 0$ $Z(\text{Blasen, Maximumsüberhöhung}) > 0$ $Z(\text{Blasen, Lage des Maximums}) > 0$	$Z(\text{Blasen, Peaks unten})$
Pfropfen	$Z(\text{Pfropfen, Maximumsüberhöhung unten}) > 0$ $Z(\text{Pfropfen, Peaks nach unten}) > 0$	$(Z(\text{Pfropfen, Maximumsüberhöhung unten}) + Z(\text{Pfropfen, Peaks unten}))/2$
Wellen	$Z(\text{Wellen, Peaks nach unten}) > 0$ $Z(\text{Wellen, Peaks nach oben}) > 0$ $Z(\text{Wellen, Maximumsüberhöhung}) > 0$	$Z(\text{Wellen, Peaks unten})$
Schwall	$Z(\text{Schwall, Schwallabstand}) > 0$ $Z(\text{Schwall, Peaks nach unten}) > 0$ $Z(\text{Schwall, Maximumsüberhöhung}) > 0$ $Z(\text{Schwall, Peaks durch Glättung}) > 0$	$Z(\text{Schwall, Schwallabstand})$
Wellen-Schwall	$Z(\text{Wellen-Schwall, Peaks durch Glättung}) > 0$ $Z(\text{Wellen-Schwall, Schwallabstand}) > 0$ $Z(\text{Wellen-Schwall, Maximumsüberhöhung}) > 0$ $Z(\text{Wellen-Schwall, Peaks nach unten}) > 0$ $Z(\text{Wellen-Schwall, rel. Lage Maximum}) > 0$	$(Z(\text{Wellen-Schwall, Peaks durch Glättung}) + Z(\text{Wellen-Schwall, Schwallabstand}))/2$

Tab. 2-7: Kriterien für die Klassifizierung von Strömungsformen

### 2.4.5 Bewertung und Grenzen der Mustererkennung

Das beschriebene Verfahren zur Mustererkennung wurde auf etwa 850 Signale aus Versuchen nach Kapitel 4 angewendet und der Signalverlauf mit dem Ergebnis der automatischen Strömungsformerkennung verglichen. Das Resultat kann in zwei Kategorien eingeteilt werden. Bei den Signalen mit einem Ergebnis mit 100 % wurden ca. 99 % der Signale eindeutig erkannt. Bei allen anderen Signalen (ein Ergebnis mit 0 .. 100 % oder mehrere Ergebnisse) wurden ca. 80 % der Signale richtig erkannt. Mit der ersten Kategorie können also Strömungsformen mit einer hohen Sicherheit automatisch erkannt werden. Bei Ergebnissen der zweiten Kategorie kann je nach Anforderung an die Präzision der Strömungsformerkennung eine Kontrolle vorgenommen werden.

Problematisch für die Mustererkennung können Ringströmungen sein, deren Signale einen niedrigen Kreuzkorrelationskoeffizienten haben. Dies kann durch eine wellige Struktur auf der Phasengrenzfläche verursacht werden, die nicht symmetrisch bezüglich der horizontalen und vertikalen Strahlengänge ist, beispielsweise spiralförmig ausgebildete Wellen. Solche Strömungsformen werden dann als Wellenströmungen klassifiziert.

Die Ringströmung kann jedoch durch eine zusätzliche Analyse von Temperatursignalen erkannt werden. Durch die gleichmäßige Benetzung der Rohrwand kommt es bei der Ringströmung im Gegensatz zur Wellenströmung zu kleinen Temperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Temperaturpositionen am Rohrumfang.

### **3 Versuchsstand zur Untersuchung von Strömungsformen in Verdampferrohren**

Zur Untersuchung von während der Verdampfung von Wasser auftretenden Strömungsformen in einem horizontalen oder geneigten Rohr mit Zwangskonvektion wird ein Versuchsstand entwickelt. Hierbei wird das in Kapitel 2 beschriebene optische Meßsystem zur nahezu rückwirkungsfreien Messung der Strömungsformen eingesetzt.

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Versuchsstandes beschrieben, mit dem zum einen die Funktionsfähigkeit des Meßsystems in einem Verdampferrohr unter Beweis gestellt werden soll, und zum anderen die systematische Untersuchung von Strömungsformen bei der Variation verschiedener Versuchsparameter ermöglicht werden soll.

#### **3.1 Kreislauf**

Aus der Einleitung (Kapitel 1.3) ergibt sich als Anforderung an den Versuchsstand ein Druck zwischen Atmosphärendruck und 100 bar. Weiterhin soll das Verdampferrohr bzw. die Meßstrecke zur Horizontalen geneigt werden können.

Durch die Konstruktion des Versuchskreislaufes soll der Einfluß von Komponenten außerhalb des Verdampferrohres minimiert werden. Schmidt [5] berichtet, daß als Folge einer Vorvermischung von Dampf und Flüssigkeit von Kältemitteln nach 214 Innendurchmessern die Strömung noch anlaufbehaftet war. Aus diesem Grund wird bewußt auf eine Vorvermischung von Dampf und Wasser verzichtet, um den Einfluß der Vorvermischungsart auf die Strömungsformen zu vermeiden. Weiterhin wird der Kondensator vom Verdampferrohr entkoppelt, so daß eine Rückwirkung des Kondensationsprozesses auf den Verdampfungsprozeß vermieden wird. Eine Temperatur- und Druckentkopplung des Verdampferrohres von den externen Komponenten soll Temperatur- und Druckschwingungen des Anlagenkreislaufes verhindern. Ohne diese Maßnahmen wären die gemessenen Strömungsformen anlagenabhängig und neben der Konstruktion des Verdampferrohres von der Konstruktion der externen Komponenten abhängig.

Abb. 3-1 zeigt das Kreislaufschema des speziell für die Versuche neu entwickelten Versuchsstandes. Aus einem Vorratsbehälter wird vollentsalztes Wasser mit einer Kolbenpumpe durch die Anlage gefördert. Die Pumpe baut einen maximalen Druck von 100 bar auf. Das Wasser wird in einer Vorheizstrecke auf eine Temperatur aufgeheizt, die je nach Druck knapp unterhalb der Sättigungstemperatur liegt. Die Meßstrecke beinhaltet eine Einlaufstrecke, die für eine ausgebildete Einphasenströmung sorgt. Hieran schließt sich die Verdampferstrecke an, wo auf einer Länge von 5 m durch Wärmezufuhr das Wasser verdampft wird. In einem Dampfabscheider wird das nicht verdampfte Wasser vom Dampf getrennt. Der Dampf wird in einem Dampfdrosselventil auf Umgebungsdruck entspannt und dann in einem Kondensator kondensiert und gekühlt. Das Wasser wird zuerst in einem Kühler gekühlt und dann in einem Ventil auf Umgebungsdruck gedrosselt. Das Wasser gelangt über einen Filter zurück zum Vorratsbehälter. Sämtliche medienführende Materialien außerhalb der Meßstrecke sind aus korrosionsfreien Materialien gefertigt.

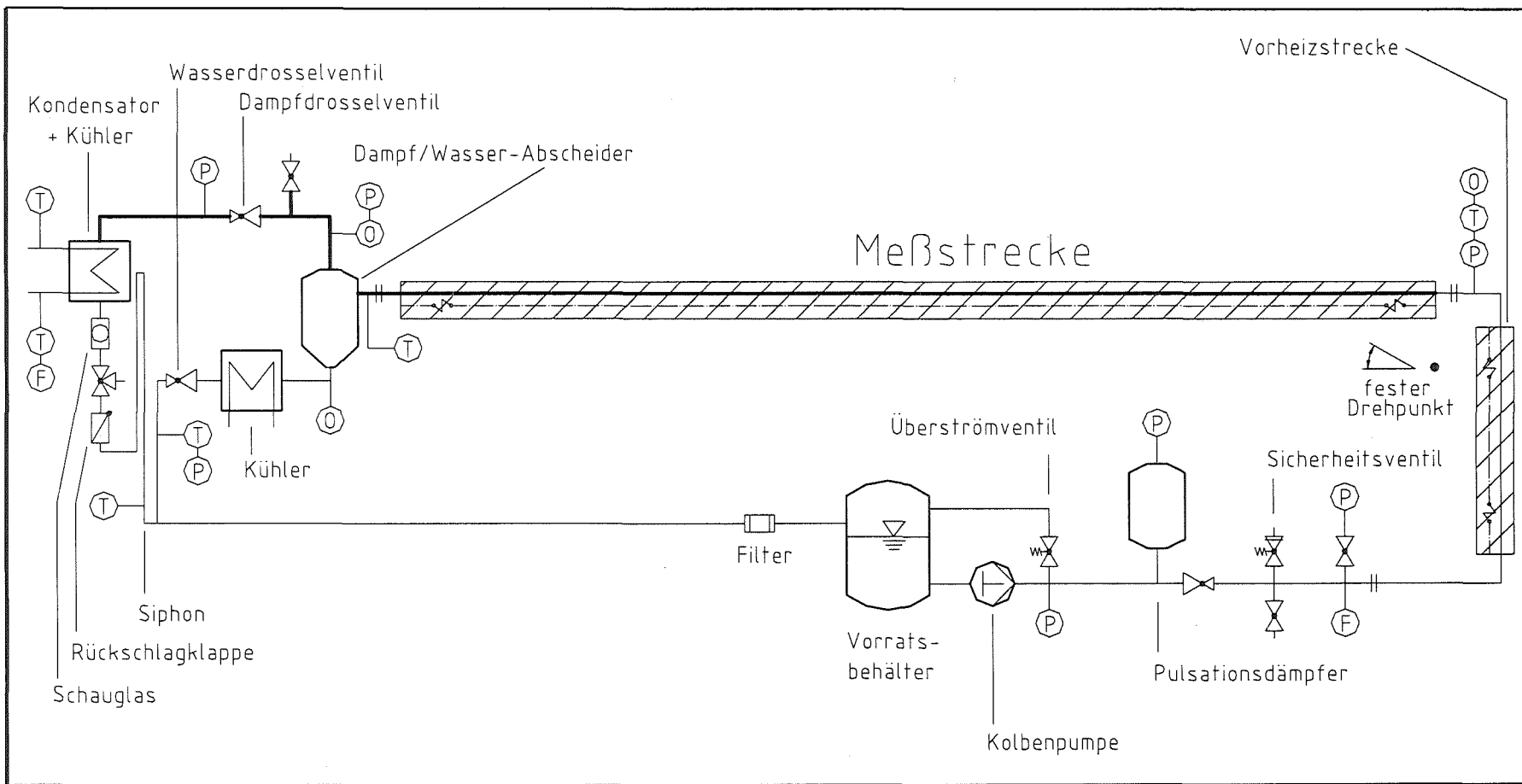


Abb. 3-1: Kreislaufschema des Versuchsstandes

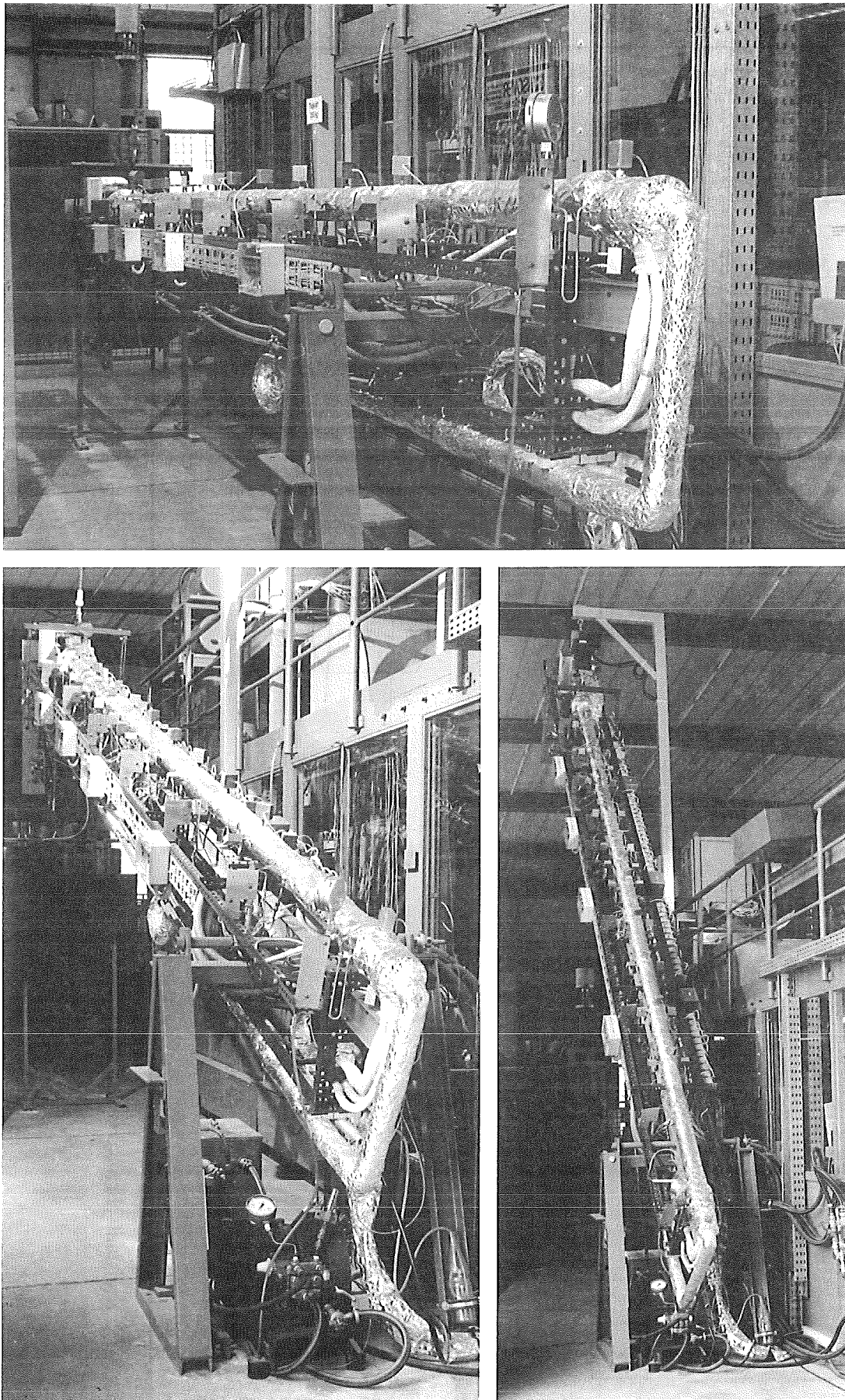


Abb. 3-2: Versuchsstand in horizontaler und geneigter Position

Der gesamte Versuchsstand mit allen Komponenten und Meßeinrichtungen ist um einen Drehpunkt bis zu einem Winkel von  $45^\circ$  drehbar. Die Anlage wird an einem Tragbalken über einen Motorkettenzug bis zu einer maximalen Höhe von 6.10 m angehoben. Der Neigungswinkel der Anlage kann während des Betriebes verändert werden, ohne daß weitere Betriebsparameter verändert werden müssen. Hierdurch wird eine präzise Untersuchung des Neigungswinkeleinflusses während des Versuchsbetriebes ermöglicht. Die am Boden befestigte Pumpe mit Motor wird über Hochdruckschläuche, die eine zusätzliche Schwingungsdämpfung bewirken, mit der Anlage verbunden. Abb. 3-2 zeigt den Versuchsstand in horizontaler und geneigter Position.

Die Druckentkopplung der Meßstrecke von den externen Komponenten erfolgt über 3 Druckstufen: Pumpendruck mit Drosselung auf den Druck in der Meßstrecke und Drosselung nach dem Dampfabscheider auf Umgebungsdruck. Die Temperaturentkopplung wird durch Aufheizen des Wassers in der Vorheizstrecke und Abkühlung des Wassers in den Kühlern auf eine Temperatur unter  $50^\circ\text{C}$  realisiert. Der Vorratsbehälter mit freier Wasseroberfläche und einem 30-fachen Volumen der Anlage bewirkt eine weitere Pufferung zur Vermeidung von Temperaturschwankungen.

In den folgenden Kapiteln werden das Vorheiz- und Druckaufbausystem, die Meßstrecke und das Druckabbau- und Kühlsystem detailliert beschrieben.

### **3.1.1 Vorheiz- und Druckaufbausystem**

Mit diesem Anlagenteil soll Wasser für die Meßstrecke mit einem gleichmäßigen Volumenstrom bei einem konstanten Druck und einer konstanten Temperatur bereitgestellt werden.

Die Aufgabe der Förderung und der Erzeugung eines maximalen Druckes von 100 bar in der Meßstrecke übernimmt eine Kolbenpumpe mit drei Kolben mit einem Hubvolumen von jeweils  $2.5\text{ cm}^3$ . Die Pumpe wird durch einen Elektromotor angetrieben. Die Pumpendrehzahlregelung übernimmt ein Frequenzumrichter, so daß ein Massenstrom von 10 kg/h bis 400 kg/h eingestellt werden kann. Bedingt durch die Kolbenhübe entstehen Druckpulsationen, die durch einen Pulsationsdämpfer gedämpft werden. Der Pulsationsdämpfer hat ein Volumen von  $750\text{ cm}^3$  und eine Membran aus Perbunan, die mit Stickstoff mit einer Vorspannung von  $2/3$  des Arbeitsdruckes gefüllt wird. Um eine Druckdämpfung der Meßstrecke durch den Pulsationsdämpfer zu vermeiden, ist ein Drosselventil vorgesehen, das den Druck an der Pumpe auf einem höherem Niveau hält als den Druck in der Meßstrecke.

Die Vorheizung wird durch eine direkte Erhitzung der Rohrwand der Vorheizstrecke realisiert. Durch die Rohrwand mit einer Wandstärke von 1 mm fließt ein elektrischer Strom von maximal 550 A mit einer maximalen Leistung von 65 kW. Durch den Joule-Effekt erwärmt sich die Rohrwand und somit das durch das Rohr fließende Wasser. Diese Methode erlaubt eine sehr gleichmäßige Erwärmung des Wassers und eine schnelle Regelung der Wassertemperatur. Da das Vorheizrohr unter einer elektrischen Spannung steht, muß es von der Meßstrecke elektrisch isoliert werden. Gleichzeitig muß die Verbindung zwischen Vorheizrohr und Meßstrecke einem Druck von 100 bar und einer Temperatur von  $310^\circ\text{C}$  standhalten können. Nach Versuchen mit vielen Dich-



tungsmaterialien stellte sich heraus, daß Asbest das einzige Material war, das für die gegebenen Bedingungen gleichzeitig eine elektrische Isolierung und eine mechanische Dichtung ermöglichte.

### 3.1.2 Meßstrecke

Zur Materialauswahl des Verdampferrohres wurde Wert auf einen technisch relevanten Werkstoff, d.h. auf den Einsatz eines in Verdampfern verwendeten Stahles gelegt. Um während der Versuchsdauer konstante Bedingungen bezüglich der Innenwandstruktur zu gewährleisten, sollte der Werkstoff eine geringe Korrosionsneigung haben. In [67] wurde die Magnetitbildung in Kesselrohren untersucht, wobei gezeigt werden konnte, daß hochlegierte Kesselstähle deutlich weniger Magnetit bilden als niedriglegierte Kesselstähle. Aus diesem Grund wurde der ferritische warmfeste Stahl X20CrMoV 121 (1.4922) verwendet. Es handelt sich dabei um ein nahtloses Rohr nach DIN 17175 mit einem Innendurchmesser von 15.7 mm und einem Außendurchmesser von 26.9 mm, das vor der Lieferung gebeizt, neutralisiert und entfettet wurde. Die Rauheitsstruktur der Rohrinnenfläche wurde mit einem Tastschnittgerät am Anfang und am Ende der Meßstrecke in verschiedenen Lagen in axialer Richtung überprüft. Abb. 3-3 zeigt repräsentative Profile mit der kleinsten Abweichung, einer mittleren Abweichung und der größten Abweichung. Die niedrigste mittlere Rauhtiefe nach DIN 4768 beträgt  $R_z = 4.7 \mu\text{m}$ , und die höchste mittlere Rauhtiefe beträgt  $R_z = 11.7 \mu\text{m}$ .

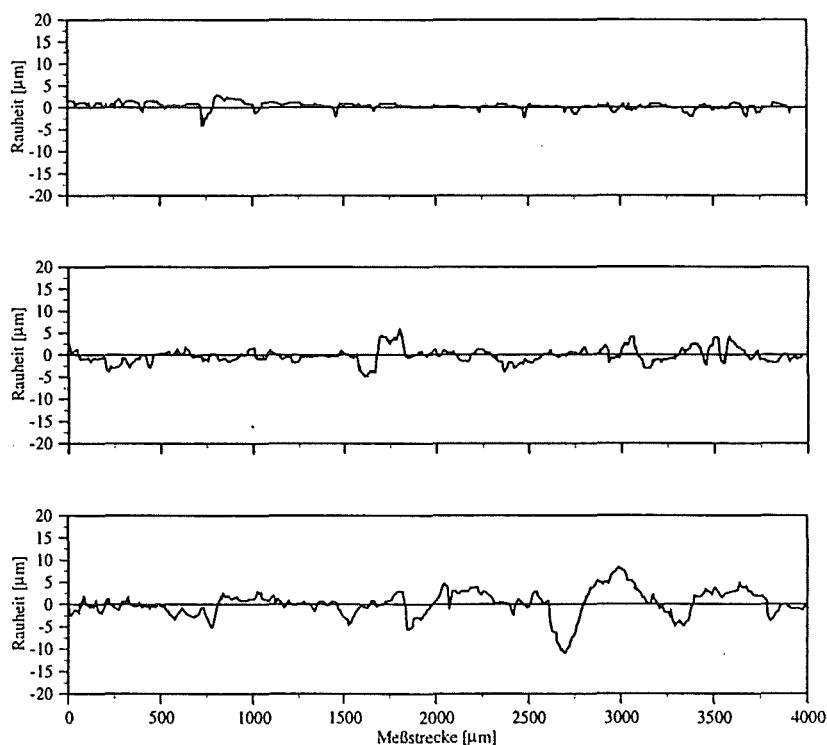


Abb. 3-3: Tastschnittdiagramme des Meßrohres. Minimale, mittlere und maximale Rohrrauigkeit

Die Oberflächenbeschaffenheit wurde weiterhin mit einem Endoskop untersucht. Es zeigten sich dabei Längs- und Querriefen, die in einer Endoskopfotografie in Abb. 3-4 zu sehen sind. Mit einem Zweipunkt-Innenfeinmeßgerät wurde die Durchmesserabwei-

chung in 3 Bereichen des Rohres gemessen. Die maximale Abweichung bei Verschiebung des Meßgerätes in axialer Richtung betrug  $280\ \mu\text{m}$ . Bei Rotation des Meßgerätes an einer axialen Position betrug die maximale Abweichung  $220\ \mu\text{m}$ .

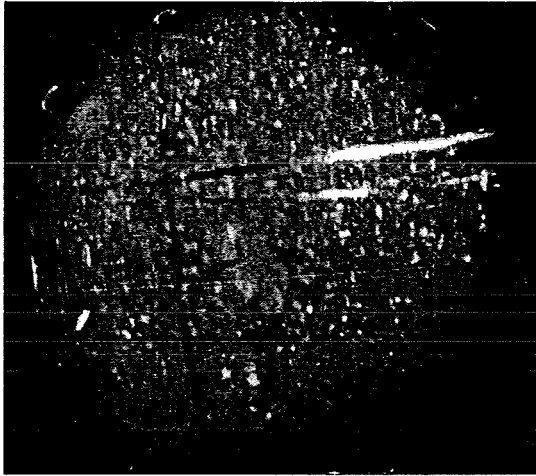


Abb. 3-4: Endoskopaufnahme der Rohrwand mit Längs- und Querriefen

Die Meßstrecke hat eine Gesamtlänge von  $5700\ \text{mm}$ , wobei beim Eintritt des Wassers in die Meßstrecke eine Einlaufstrecke mit einer Länge von  $650\ \text{mm}$  vorhanden ist. Bei der Beheizung der Meßstrecke sollte eine gleichmäßige Wärmestromdichte an der inneren Rohrwand, wo der Wärmeübergang zum Wasser/Dampfgemisch stattfindet, gewährleistet sein. Weiterhin sollte ausreichend Platz für die Einschraubungen der optischen Meßtechnik vorhanden sein. Zur Erfüllung beider Forderungen wird die Wärme über Heizleiter zugeführt, die in 8 Längsnuten in der Rohraußenwand angebracht sind (Abb. 3-5).

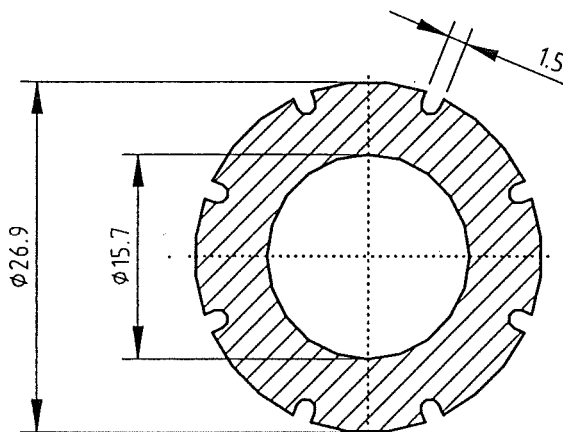


Abb. 3-5: Schnitt durch das Verdampferrohr mit Nuten

Die Heizleiter haben einen Durchmesser von  $1.5\ \text{mm}$ . Sie wurden mit einer Rändelmaschine so in den Nuten befestigt, daß sie durch eine plastische Verformung der Nutenkante in den Nutgrund gedrückt wurden. Durch diese Methode wurde ein guter Wärmeübergang vom Heizleiter zum Rohr erreicht. Die Heizleiter sind in axialer Richtung in 4 Heizerguppen aufgeteilt (vergl. Abb. 3-8), die mit steuerbaren Transfor-

matoren mit einer Wechselspannung mit 50 Hz betrieben werden. Mit der Anordnung wird eine maximale Heizleistung von 25 kW erreicht.

In dem für die Versuche vorgesehenen Temperaturbereich von 100 °C bis 400 °C erfährt das Rohr eine maximale Langdehnung von ca. 20 mm. Aus diesem Grund ist am Ende der Meßstrecke ein Festlager angebracht und im Abstand von jeweils 1 m Loslager, die auf dem die Anlage tragenden I-Profil gleiten. Die Loslager sind in der Höhe einstellbar, um die Biegung des I-Profils auszugleichen und eine gerade Lage des Rohres zu gewährleisten. Hierzu wurden die Lager mit einer Schlauchwasserwaage eingestellt und das Ergebnis mit einem Laser überprüft.

Zur Isolierung der Meßstrecke wurden Isover-Schalen mit einer Dämmdicke von 40 mm verwendet.

### **3.1.3 Druckabbau- und Kühlsystem**

Um Rückwirkungen vom Kondensations- und Druckabbauprozess auf die Zweiphasenströmung in der Meßstrecke zu vermeiden, wird der Dampf zunächst von dem Wasser getrennt. Hierzu wurde ein Hochdruck-Dampfabscheider nach Abb. 3-6 konstruiert.

Zur Trennung des Dampfes vom Wasser wird zum einen die Zentrifugalkraft genutzt, die durch eine exzentrische Anordnung des Einlaßstutzens erzeugt wird und zum anderen eine mehrfache Strömungsumkehr durch die inneren Einbauten. Das Volumen des Dampfabscheiders entspricht etwa dem Volumen der Meßstrecke, so daß er bei instationären Strömungszuständen als Puffer für schwankende Dampf- und Wassermassenströme fungiert.

Der durch den oberen Stutzen des Dampfabscheiders entweichende Dampf wird vor der Kondensation entspannt. Der Kondensator wird durch den bei der Entspannung entstehenden Druckverlust von der Meßstrecke entkoppelt. Der Regelbereich des Dampfventils ist sehr groß, da der Dampf beim maximalen Druckabfall von 100 bar eine hohe Dichte und beim minimalen Druckabfall von 1 bar eine geringe Dichte hat. Zur Berechnung von Ventilen dient der Ventilkoeffizient  $k_v$ . Es ergibt sich ein Regelbereich von  $0.005 \leq k_v \leq 2$ . Zur Zeit der Konstruktion des Versuchsstandes war kein Ventil für den erforderlichen Regelbereich für Temperaturen bis 350 °C auf dem Markt verfügbar. Aus diesem Grund wurde ein Ventil konstruiert, das aus einem Außenteil mit einer Bohrung und einer Welle als Innenteil besteht. Der Druckverlust wird durch die Strömung durch den entstehenden Ringspalt erzeugt, der in einem weiten Bereich durch eine Verschiebung des Innenteiles relativ zum Außenteil reguliert werden kann. Die Feineinstellung des Druckabfalles erfolgt durch eine an dem Innenteil befestigte Gewindestange mit Handrad, die das Innenteil über einen Bereich von 120 mm verschiebt. Zur Abdichtung ist eine Manschettenpackung aus PTFE vorgesehen. In Abb. 3-7 ist auf der Oberseite des Ventils die Dampfleitung zum Kondensator und ein Schlauch zur Zuführung des Kühlwassers zu sehen.

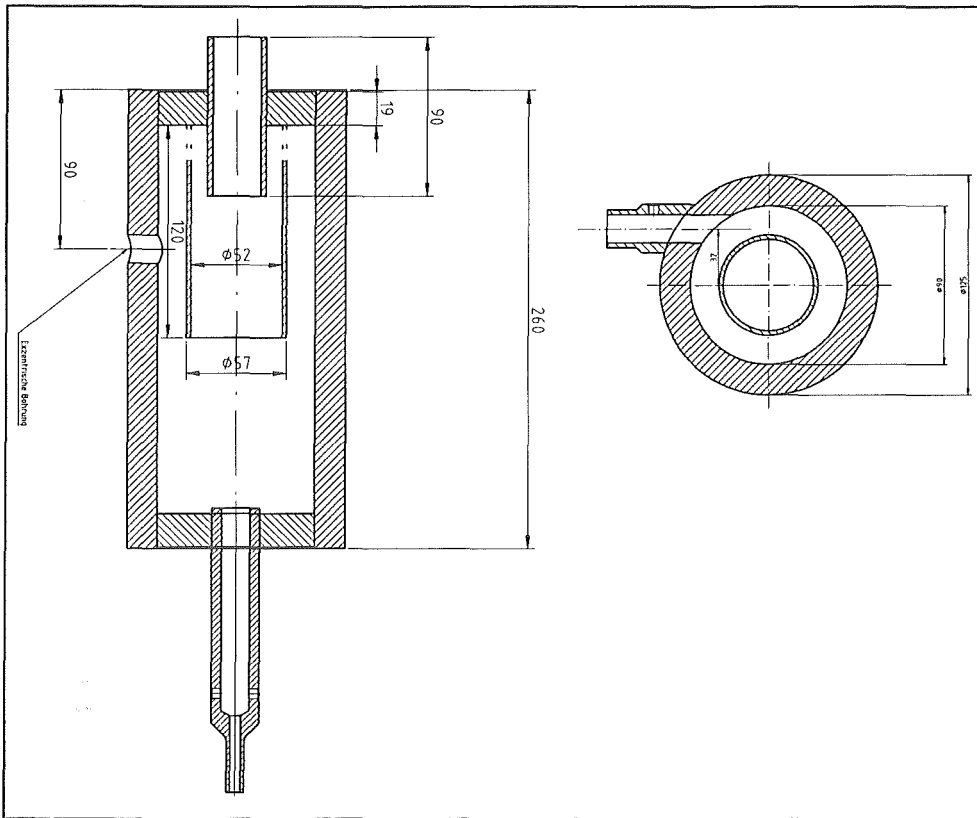


Abb. 3-6: Hochdruck-Dampfabscheider

Der Kondensator (Abb. 3-7) besteht aus einem kommerziellen Plattenwärmetauscher mit einer Austauschfläche von  $1.2 \text{ m}^2$ . Der Wasserstand im Kondensator wird über einen Siphon so geregelt, daß das Wasser beim Austritt eine Temperatur von maximal  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  hat.

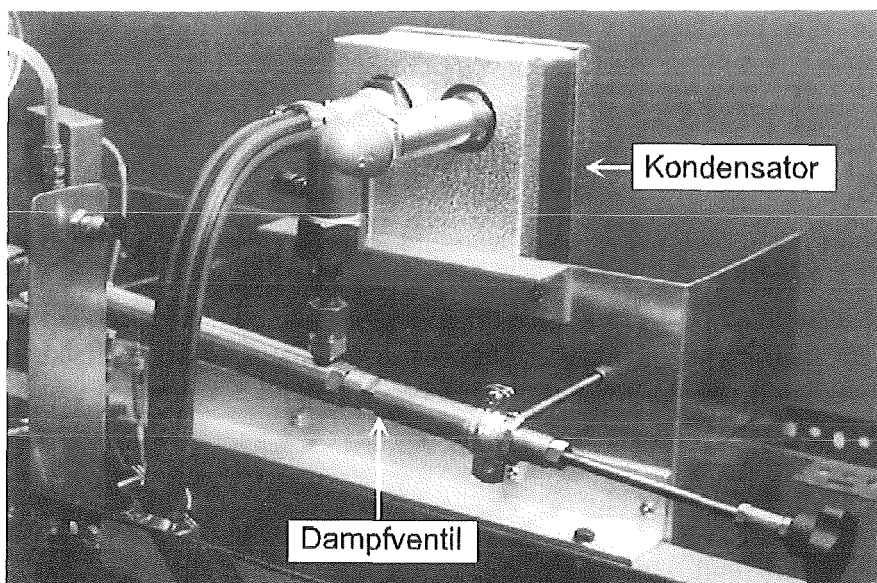


Abb. 3-7: Dampfdruckventil mit Kondensator

Das Wasser wird über den unteren Stutzen aus dem Dampfabscheider abgeführt und in einem Wärmetauscher auf eine Temperatur von maximal  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  abgekühlt. Das

abgekühlte Wasser wird durch zwei parallel geschaltete Regulierventile auf Umgebungsdruck gebracht.

Die Kühlung des Kondensators und des Kühlers erfolgt durch die Umwälzung von Wasser aus einem temperaturgeschichteten Behälter mit einem Volumen von  $10 \text{ m}^3$ .

### **3.1.4 Sicherheitseinrichtungen**

Die Anlage wurde vom Technischen Überwachungs-Verein Südwest abgenommen. Hierfür war eine Prüfung der Konstruktionszeichnungen von druckbehafteten Komponenten und eine Druckprüfung nötig. Aktive Sicherheitskomponenten sind vorhanden für:

#### ***Drucküberschreitung:***

Ein Sicherheitsventil öffnet bei einem Druck von 110 bar.

#### ***Temperaturüberschreitung an der Meßstrecke:***

Jeder der vier Heizgruppen ist mit einem Thermoelement, das an einer Stelle angebracht ist, wo die höchsten Temperaturen zu erwarten sind, gegen eine Temperaturüberschreitung abgesichert. Die Stromversorgung des entsprechenden Heizkreises wird bei Temperaturüberschreitung von  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  abgeschaltet. Temperaturen höher als die Sättigungstemperatur von Wasser können auftreten durch Wandüberhitzung bzw. Dampfüberhitzung.

#### ***Temperaturüberschreitung an der Vorheizstrecke:***

Die Stromversorgung der Vorheizstrecke wird bei Temperaturüberschreitung von  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  abgeschaltet.

#### ***Temperaturüberschreitung des Vorratsbehälters:***

Die Stromversorgung aller Heizkreise wird bei Temperaturüberschreitung von  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  abgeschaltet.

## **3.2 Meßtechnik**

Neben der Bestimmung der Strömungsform während des Verdampfungsvorganges durch das in Kapitel 2 beschriebene Meßverfahren werden zur weiteren Analyse und Auswertung Druck-, Temperatur-, Volumenstrommessungen benötigt. Die zu diesem Zweck eingesetzten Meßeinrichtungen und die Betriebsinstrumentierung des Kreislaufes und der Meßstrecke werden in diesem Kapitel beschrieben.

### **3.2.1 Meßtechnik an der Meßstrecke**

Das Ziel von Temperatur- und Druckmessungen soll die Zuordnung der jeweils gefundenen Signalart zur Strömungsform sein. Aus diesem Grund wurde die Meßstrecke in 12 Meßpositionen eingeteilt, in denen die Strömungsform-, Temperatur-, und Druckmessungen durchgeführt werden. Abb. 3-8 zeigt eine Übersicht der Instrumentierung an der Meßstrecke. Die Meßpositionen sind jeweils in einem Abstand von  $0.5 \text{ m}$

angeordnet. Die Meßstellen 6 und 10 befinden sich im Abstand von 0.25 m zu den angrenzenden Meßpositionen. An den Stellen wird nur die Strömungsform gemessen, um eventuelle kurzreichweitige Strömungsformänderungen erfassen zu können.

Die Wandbohrungen für die Druckmessungen sind in einem Abstand von 1 m installiert, da für das Drucksignal keine starken Änderungen in kurzen Abständen zu erwarten sind. Für den in den Versuchen abzudeckenden Druckbereich von Umgebungsdruck bis 100 bar sind zwei Arten von Meßumformer vorhanden: 6 kapazitive Drucktransmitter mit einem Meßbereich von 0 - 4 bar. Es wird der Absolutdruck gegen eine Vakuumkammer gemessen. Für den Meßbereich von 0 - 110 bar sind 3 piezoresistive Drucktransmitter vorhanden, die den Druck gegen die Atmosphäre messen. Bei Versuchen mit hohen Drücken werden sie an den Positionen P0, P7 und P12 installiert. Die Druckmeßumformer haben eine Sprungantwortkonstante von  $t_{63\%} = 10$  ms. Abb. 3-9 zeigt eine Fotografie eines installierten Druckmeßumformers. Die Anschlußleitung mit U-förmigem Bogen dient zur Abkühlung des Wassers auf eine für den Sensor unkritische Temperatur. Durch einen Kugelhahn läßt sich die Anschlußleitung entlüften, um eine Dämpfung des Drucksignals durch ein Luftpolster zu verhindern. Die Druckmeßumformer sind federnd befestigt, um die thermische Ausdehnung des Rohres zuzulassen.

In Abb. 3-9 sind weiterhin die Einschraubungen der optischen Meßtechnik zu sehen. Oben und auf der linken Seite (in Strömungsrichtung rechts) sind jeweils die Sender und unten und auf der rechten Seite die Empfänger installiert. Die zylinderförmigen Teile der Einschraubungen befinden sich im Betrieb der Anlage innerhalb der Isolierung.

Die Temperaturen werden durch NiCr-Ni-Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0.5 mm gemessen. Die Thermospannung wird durch Temperaturmeßumformer mit einem Meßbereich von 0 °C bis 400 °C mit integrierter Kaltstellenkompensation in ein temperaturlineares Analogsignal gewandelt. Für ein schnelles Antwortverhalten haben die Meßumformer eine Sprungantwortkonstante von  $t_{63\%} = 21$  ms. Es sind Thermoelemente in der Rohrwand zur Messung des Einflusses der Strömungsform auf die Rohrwandkühlung und in der Strömung zur Messung der Temperatur der Phasen vorhanden. Abb. 3-10 zeigt einen Schnitt durch das Rohr mit den Bohrungen für die Wandthermoelemente.

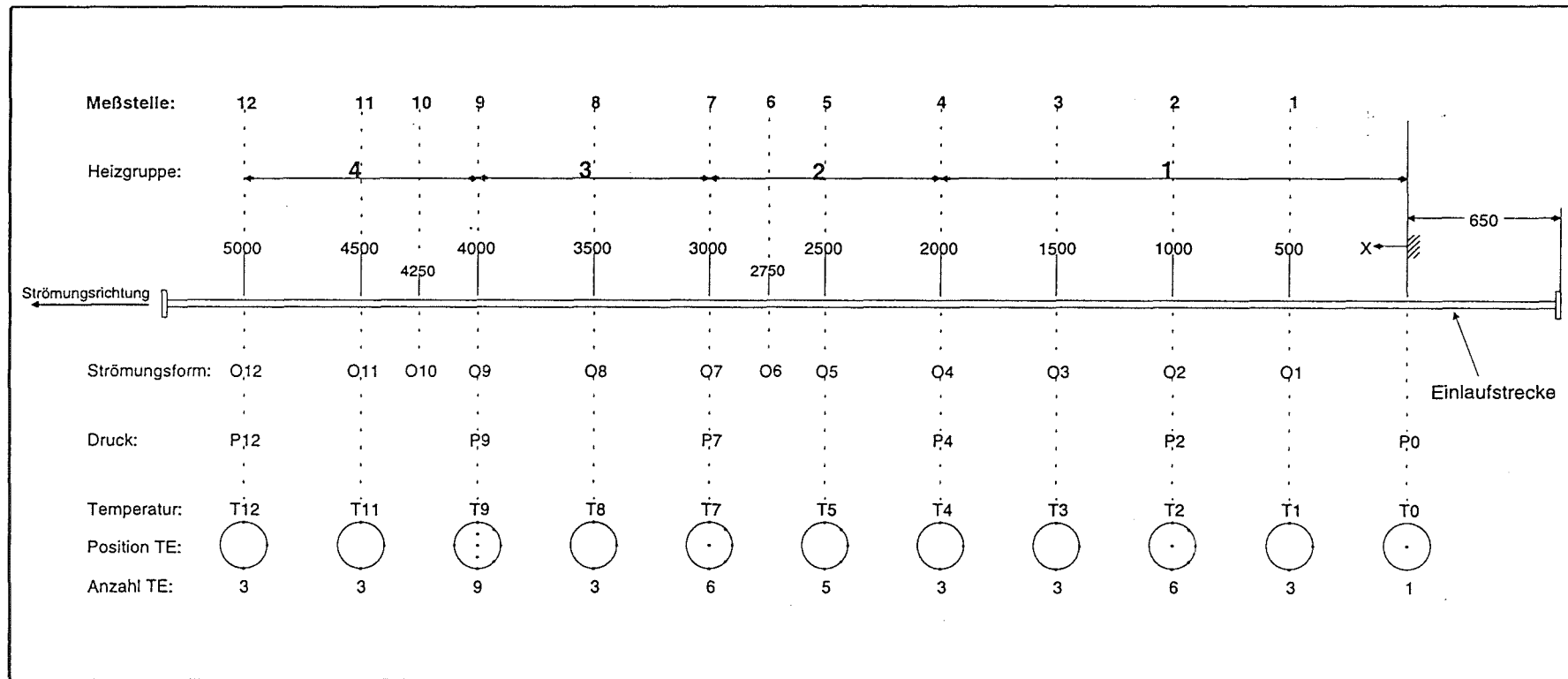


Abb. 3-8: Instrumentierung der Meßstrecke

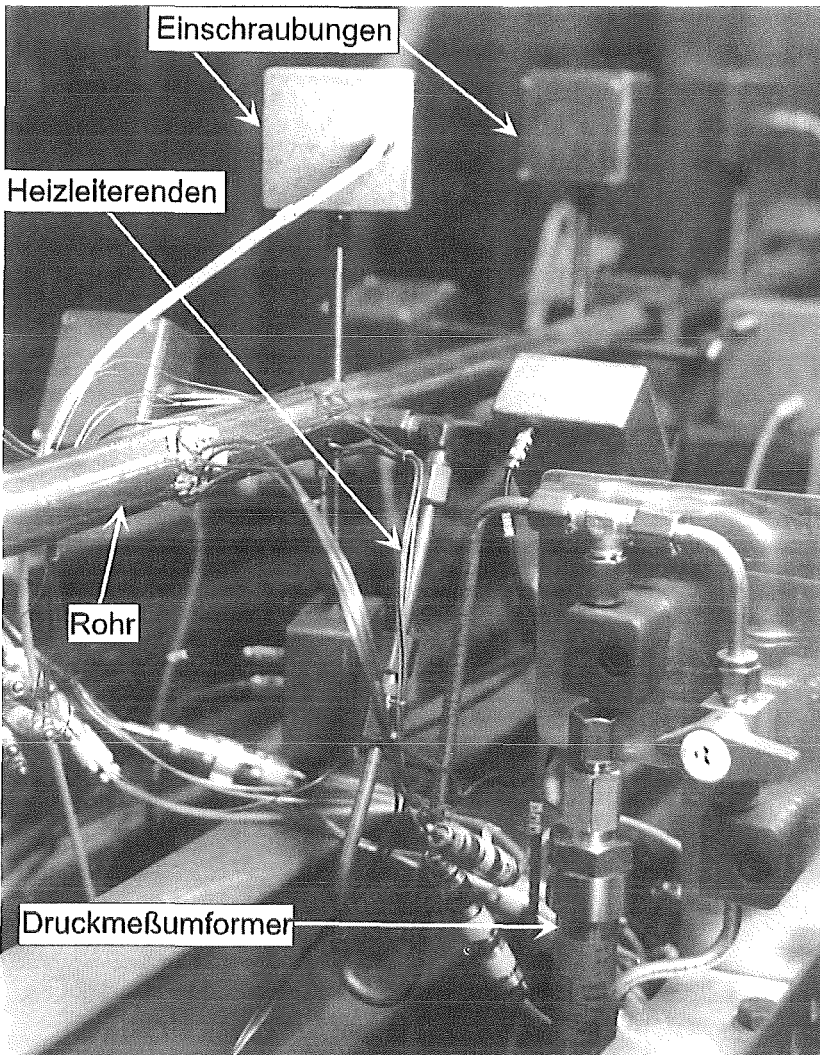


Abb. 3-9: Einschraubungen der optischen Meßtechnik und Druckmeßumformer an der Meßstrecke

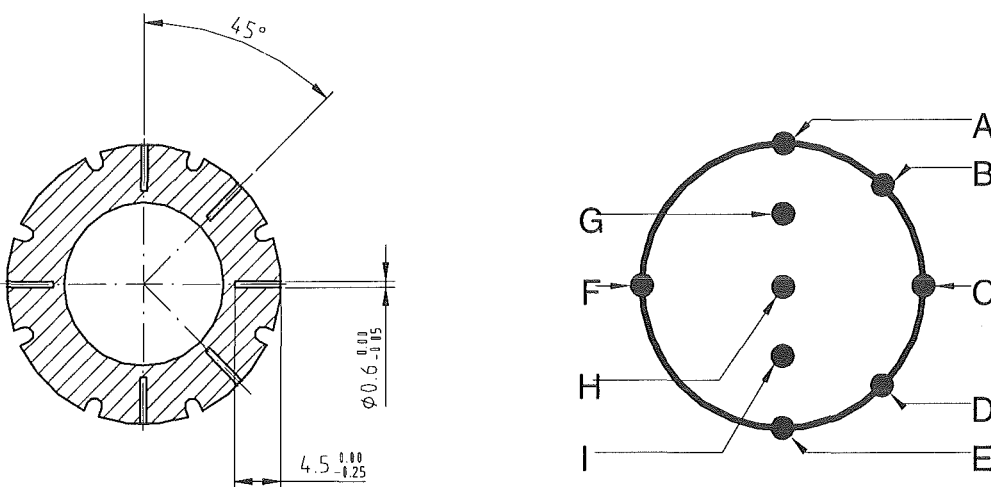


Abb. 3-10: Position und Bezeichnung der Thermoelemente an der Meßstrecke



Die Thermoelemente werden in die Sacklöcher durch einen Federdruck gepreßt, so daß ein guter Wärmeübergang von der Rohrwand an das Thermoelement entsteht. Die Beschriftung der Thermoelementpositionen geht ebenfalls aus Abb. 3-10 hervor. Die Besetzung aller Thermoelementpositionen an allen Meßpositionen würde zu einer zu hohen Kanalanzahl führen und ist aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials nicht notwendig. Die Verteilung der Thermoelemente an den verschiedenen Meßpositionen geht aus Abb. 3-8 hervor. Alle Meßpositionen haben Thermoelemente an den Positionen A (Oben), C (Seite) und E (Unten). An der Meßposition T9 sind alle Thermoelementpositionen besetzt.

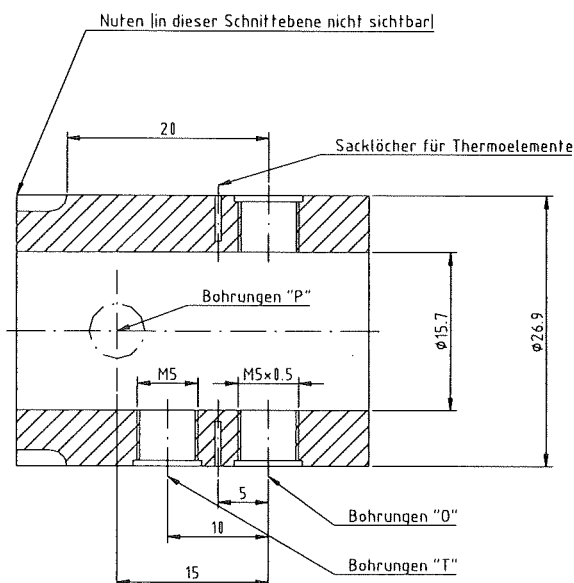


Abb. 3-11: Schnitt durch eine Meßposition mit Bohrungen für die Einschraubungen der optischen Meßtechnik 'O', für die Temperaturmessungen 'T' und für die Druckmessungen 'p'

Einen Schnitt durch eine Meßposition zeigt Abb. 3-11. Die Bohrungen für die Einschraubungen der optischen Meßtechnik „O“, die Bohrungen für die Einschraubungen für die Fluidtemperaturmessung „T“, die Bohrungen für die Druckmessungen „P“ und die Sacklöcher für die Wandtemperaturmessung sind in einem engen Bereich zusammengefaßt, um eine realistische Zuordnung von Strömungsformen, Drücken und Temperaturen vornehmen zu können. Für die Temperaturmessungen in der Rohrwand an den Positionen A bis F (Abb. 3-10) sind die Sacklöcher in Abb. 3-10 und Abb. 3-11 vorgesehen. Die Thermoelemente für die Fluidtemperaturmessungen an den Positionen G bis I werden in einem axialen Abstand von 5 mm zu den Wandtemperaturmessungen über die Bohrungen „T“ in das Rohr eingebracht.

### 3.2.2 Meßtechnik außerhalb der Meßstrecke

Der Volumenstrom als eine der wichtigsten strömungstechnischen Größen wird vor der Vorheizstrecke durch einen hochdruckfesten magnetisch-induktiven Strömungsmesser gemessen. Das Meßprinzip erlaubt eine präzise Volumenstrommessung auch bei kleinen Massenströmen.

Am Ende der Vorheizstrecke ist eine optische Meßposition vorhanden, durch die überwacht wird, ob es in der Vorheizstrecke nicht zur Dampfbildung kommt, um beim Eintritt in die Meßstrecke eine Einphasenströmung zu gewährleisten. Weiterhin wird am Dampfaustrittstutzen und am Wasseraustrittstutzen (vergl. Abb. 3-1) des Dampfabseiders eine optische Messung durchgeführt. Durch diese optischen Signale werden im Versuchsbetrieb das Dampfdrosselventil und das Wasserdrosselventil eingestellt (vergl. Kapitel 4.1).

Je ein Thermoelement am Anfang und am Ende der Meßstrecke überwachen die Eintritts- und Austrittstemperatur des Fluids. Zur Bestimmung der Kondensatorleistung wird an diesem sekundärseitig die Ein- und Austrittstemperatur und der Volumenstrom gemessen.

Der Neigungswinkel der Anlage wird über einen Drehwinkelmeßumformer erfaßt. Für die Messung der Heizleistung sind für die 4 Heizgruppen Leistungsmeßumformer vorhanden.

### **3.2.3 Meßwerterfassung**

Die beschriebenen Meßsignale werden von den Sensoren über Koaxialkabel zu insgesamt 3 Signalverteilungskästen geführt. Über mehradrige, abgeschirmte Kabel werden die insgesamt 94 Signale dann 3 in einem PC eingebauten Meßdatenerfassungskarten mit Multiplexer, Sample & Hold-Verstärker und 12-Bit Analog-Digitalwandler zugeführt.

Die nötigen Meßfrequenzen wurden empirisch ermittelt und betragen für die Signale der optischen Meßtechnik 350 Hz, für die Fluidtemperaturmessungen 200 Hz, für die Wandtemperaturmessung 50 Hz und für die Druckmessungen 200 Hz.

Zur Minimierung von Störsignalen sind alle signalführenden Kabel und Verteilungskästen von der Signalentstehung bis zu den Meßdatenerfassungskarten abgeschirmt. Die Abschirmung wird nur an den Meßdatenerfassungskarten mit der Masse des Versuchstandes verbunden, die in einem Sternpunkt für alle Massen zusammengeführt wird. Der Frequenzumrichter wird durch einen HF-Filter und Motordrosseln entstört.

Es wurde eine Prozeßvisualisierung zur Überwachung und Einstellung der Anlage beim Versuchsbetrieb programmiert, welche die wichtigsten Prozeßgrößen online auf dem Bildschirm darstellt. Weiterhin können die zeitlichen Verläufe der optischen Signale und der Temperatur- und Drucksignale online für alle Meßpositionen überwacht werden.

### **3.2.4 Kalibrierung und Fehler der Meßeinrichtungen**

Für die optische Meßtechnik zur Strömungsformerkennung wurde eine Konstantstromschaltung aufgebaut, die den Strom durch die Leuchtdioden konstant hält. Bei der Aufprägung einer konstanten Spannung würde sich der Diodenstrom und somit die emittierte Lichtleistung in Abhängigkeit von der Temperatur verändern. Zur Kontrolle ist für ein Senderelement ein Temperatursensor und ein Amperemeter vorhanden, die

einen Vergleich von Temperatur und Strom im Versuchsbetrieb erlauben. Der Diodenstrom wird mit Spindelpotentiometern für jeden Sender so eingestellt, daß das Signal aller Empfänger, wenn sich Luft im Rohr befindet, auf gleichem Niveau ist (Hardwarekalibrierung). Eine weitere Softwarekalibrierung wird bei Beginn eines jeden Versuchstages durchgeführt (vergl. Kapitel 2.3.1).

Die kapazitiven und die piezoresistiven Druckmeßumformer haben einen maximalen Fehler von 0.1 % vom Meßbereichsendwert. Für alle Druckmeßumformer wurde vom Hersteller ein Prüfprotokoll für variierende Drücke und Temperaturen am Sensor geliefert.

Die Temperaturmeßumformer haben bei der Addition aller Fehlerarten einen maximalen Fehler von 0.4 % vom Meßbereichsendwert, was einem maximalen Fehler von 1.6 °C entspricht. Die Temperaturmessungen dienen insbesondere zum Vergleich des Rohrwandtemperaturprofils mit der Strömungsform, um bei geschichteten Strömungsformen zusätzlich zu den optischen Signalen eine Information über eine Austrocknung der Wand zu erhalten. Da die bei einer ausgetrockneten Wand auftretenden Temperaturdifferenzen an einer Meßposition weit über einem Wert von 1.6 °C liegen, sind die Meßumformer für diesen Zweck einsetzbar.

Der Durchflußmesser hat eine Fehlertoleranz von 0.6 % vom jeweiligen Meßwert.

## **4 Versuchsergebnisse**

Mit Hilfe des in Kapitel 2 beschriebenen Meßsystems zur Bestimmung von Strömungsformen und des in Kapitel 3 beschriebenen Versuchsstandes werden Untersuchungen von Strömungsformen, die während der Verdampfung von Wasser unter Zwangskonvektion in einem horizontalen und geneigten Stahlrohr auftreten, durchgeführt.

In diesem Kapitel wird nach einer Beschreibung der Versuchsdurchführung der Einfluß des Neigungswinkels auf die Ausbildung von Strömungsformen beschrieben. Für das horizontale Rohr wird der Einfluß von Druck, Massenstromdichte und Wärmestromdichte auf die Strömungsformausbildung untersucht. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit einer Strömungsformenkarte zur Vorhersage von Strömungsformen werden Vergleiche mit Meßdaten durchgeführt. Durch die Entwicklung einer empirischen Strömungsformenkarte sollen die Übergänge zwischen den Strömungsformen beschrieben werden.

### **4.1 Versuchsdurchführung**

Der Versuchsstand wurde so konstruiert, daß eine Variation des Massenstromes, des Druckes, der Heizleistung und des Neigungswinkels möglich ist. Die gewählten Versuchsparameter und die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung werden im folgenden erläutert.

#### **4.1.1 Versuchsvorbereitung**

Vor dem Beginn eines Versuchstages befindet sich die Anlage im drucklosen Zustand bei Umgebungstemperatur. Zur Kalibrierung der optischen Meßtechnik wird das Meßrohr mit Luft gefüllt und die optischen Signale aufgezeichnet. Dann wird Wasser durch die Anlage gepumpt und die Luft aus der gesamten Anlage entfernt. Durch die Regelung der Drosselventile wird der gewünschte Druck eingestellt und durch das Hochfahren der Vorheizstrecke eine Temperatur am Eintritt in die Meßstrecke erzeugt, die ca. 5 °C unterhalb der Sättigungstemperatur beträgt. Vor Beginn der Verdampfung wird dann die Kalibrierung der optischen Meßtechnik im Wasser durchgeführt.

Durch Einschalten der Heizleiter an der Meßstrecke beginnt die Verdampfung und durch Einstellen des Dampfdrosselventils und des Wasserdrosselventils wird der Druck eingestellt und für eine Dampf-Wasser-Trennung gesorgt. Die Einstellung erfolgt mit Hilfe der optischen Sensoren, die sich am Dampfaustrittstutzen und am Wasseraustrittstutzen befinden. Die Ventile werden so eingestellt, daß sich am Dampfaustrittstutzen nur Dampf und am Wasseraustrittstutzen nur Wasser befindet. Wenn sich ein stationärer Zustand eingestellt hat, wird eine Messung durchgeführt. Die erste Messung wird jeweils in horizontaler Position durchgeführt. Der Neigungswinkel der Anlage wird dann erhöht und weitere Messungen vorgenommen, ohne daß andere Parameter dabei verändert werden. Bei Steigerung der Wärmezufuhr werden die Drosselventile so eingestellt, daß ein neuer stationärer Zustand eintritt.

Nach Beendigung der Versuche wird das Wasser abgelassen und die Meßstrecke zur Vermeidung von Korrosion mit Stickstoff befüllt.

Vor und nach den Versuchen wird eine Leitfähigkeitsmessung und eine Messung des pH-Wertes des Wassers durchgeführt. Die Leitfähigkeit betrug bei allen Versuchen zwischen 8 und 27  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei einer Temperatur von 40°C und der pH-Wert lag zwischen 7.0 und 7.8. Während des Versuchsbetriebes wurde am Wasserrücklauf der Anlage eine Ausliterung zur Kontrolle des Durchflußmessers vorgenommen.

Die Wärmeverluste an der Meßstrecke wurden durch die Erzeugung einer Einphasenströmung durch das Meßrohr bestimmt. Die Heizleistung wurde dabei so geregelt, daß nach einer Zeit von 20 Minuten die Eintrittstemperatur des Wassers gleich der Austrittstemperatur war. Die Heizleistung entspricht dann der Verlustleistung. Abhängig von der Rohrtemperatur betrug die Verlustleistung zwischen 0.25 kW (120 °C) und 0.6 kW (300 °C).

#### 4.1.2 Anlagentests

Durch die Konstruktion des Versuchsstandes (vergl. Kapitel 3.1) wurde versucht, die Zweiphasenströmung in der Meßstrecke unabhängig von peripheren Komponenten zu halten. Entscheidende Komponenten für diesen Zweck sind der Dampfabscheider und die getrennten Ventile für die Dampf- und Wasserdrosselung. Zur Untersuchung des Effektes der Dampf-Wasser-Trennung wurde in einem Verdampfungsversuch das Wasserdrosselventil abgesperrt, so daß beide Phasen ohne Dampf-Wasser-Trennung durch das Dampf-drosselventil strömen mußten.

Abb. 4-1 zeigt das optische Signal vor dem Dampf-drosselventil und das optische Signal und der Druckverlauf für die Meßstelle 12, die sich am Ende der Meßstrecke, kurz vor dem Dampfabscheider, befindet (siehe Abb. 3-8). Es zeigt sich eine Korrelation zwischen den Schwällen, die auf das Dampfventil treffen und Druckerhöhungen. Die Schwälle bewirken eine zeitweise Verengung des Ventilquerschnitts für den Dampf, wodurch der Druckverlust ansteigt.

In Abb. 4-2 ist zum Vergleich das optische Signal und der Druckverlauf an der Meßstelle 12 bei einem Versuch mit Dampf-Wasser-Trennung zu sehen. Der Druck ist jetzt unabhängig von den Schwällen der Zweiphasenströmung, so daß mittels der Konstruktion eine Druckstabilisierung und eine Entkopplung der Drosselungsvorgänge von der Zweiphasenströmung in der Meßstrecke erreicht wird.

Ein Vergleich der Drucksignale mit und ohne Pulsationsdämpfer zeigte, daß mit Pulsationsdämpfer die Druckpulsationen nicht mehr meßbar waren.

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen wurden im Abstand von einigen Wochen jeweils Versuche wiederholt und die Ergebnisse mit den vorherigen Versuchen verglichen. Für die Strömungsformen und den Einfluß des Neigungswinkels auf die Strömungsform zeigten sich dabei übereinstimmende Ergebnisse.

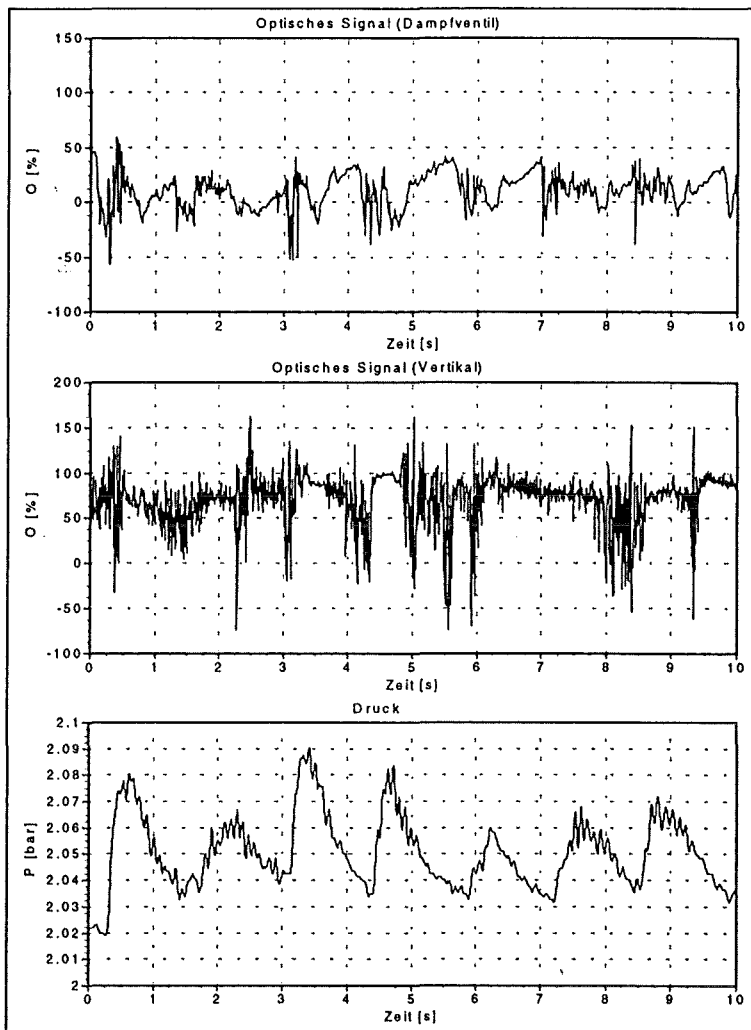


Abb. 4-1: Optische Signale und Drucksignal ohne Dampf-Wasser-Trennung

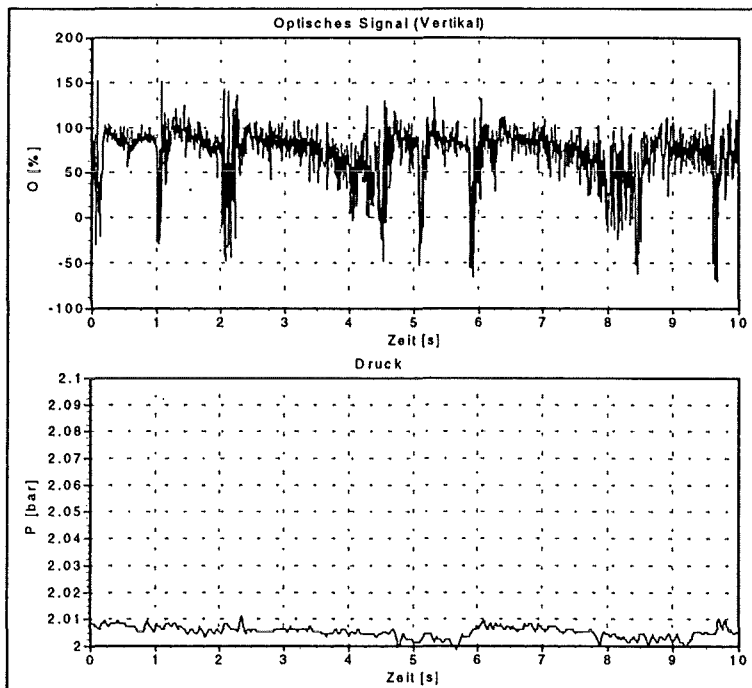


Abb. 4-2: Optisches Signal und Drucksignal mit Dampf-Wasser-Trennung

### 4.1.3 Versuchsparameter

Bei der Wahl der Versuchsparameter wurde versucht, Parameterbereiche zu wählen, die sich einerseits mit anderen Arbeiten überschneiden und andererseits eine Relevanz in technischen Anlagen besitzen. Einschränkungen ergaben sich durch die vorhandene Infrastruktur des Instituts. Folgende Parametervariationen wurden gewählt:

- Druck: 2, 10, 20, 50, 100 bar
- Massenstromdichte: 70, 140, 280 kg/m<sup>2</sup>s
- Wärmestromdichte: 20, 40, 60, 80, 100 kW/m<sup>2</sup>
- Neigungswinkel: 0°, 3°, 8°, 15°, 30°, 45°

Die Untersuchung des Druckeinflusses auf die Strömungsform ist besonders interessant, da sich das Dichteverhältnis von flüssiger Phase zur Dampfphase bei gesättigtem Zustand mit dem Druck stark ändert (Tab. 4-1).

Druck [bar]	2	10	20	50	100
Dichteverhältnis $\rho_l/\rho_g$	835	172	85	31	12

Tab. 4-1: Dichteverhältnis Wasser/Dampf bei verschiedenen Drücken

Um den Einfluß des Dichteverhältnisses detailliert untersuchen zu können, wurde die Druckstufung so gewählt, daß sich das Dichteverhältnis bei jeder Abstufung mindestens halbiert. Die niedrigste Druckstufe mußte 2 bar betragen, da zur Entkopplung der Meßstrecke vom Kondensator eine Druckabsenkung von mindestens 1 bar notwendig war. Die niedrigste Druckstufe ist für die solare Prozeßdampferzeugung in kleinen bis mittleren Solaranlagen von Bedeutung. Weiterhin werden Dampferzeugeranlagen bei niedrigen Drücken in der Lebensmittel- und Textilindustrie eingesetzt. Die hohen Druckstufen führen zu Stoffgrößen, die ähnlich denen von Kältemitteln sind, für die Strömungsformuntersuchungen veröffentlicht sind. Die Druckstufen 50 und 100 bar sind weiterhin für Dampfkessel von fossil befeuerten Kraftwerken relevant.

Die höchste Massenstromdichte wurde so gewählt, daß bei maximaler Heizleistung ein Dampfmassengehalt von mindestens 20 % erreicht wurde, um den Bereich für den untersuchten Dampfmassengehalt nicht zu klein zu halten. Die niedrigste Massenstromdichte ergibt sich aus einem maximalen Dampfmassengehalt von 100 % bei maximaler Heizleistung. Die Zwischenstufe wurde durch Vorversuche festgelegt, in denen die Massenstromdichte bestimmt wurde, bei der sich die Strömungsformen von denen der anderen Massenstromdichten deutlich unterscheiden. Die Massenstromdichte von 280 kg/m<sup>2</sup>s ist wiederum für den Dampfkesselbau von fossil befeuerten Kraftwerken relevant. Die gewählten Massenstromdichten überschneiden sich zu einem großen Teil mit Untersuchungen an Kältemitteln, die bei Massenstromdichten zwischen 50 und 500 kg/m<sup>2</sup>s durchgeführt wurden [5,6,10].

Die maximale Wärmestromdichte von 100 kW/m<sup>2</sup> ergibt sich aus der maximalen Heizleistung der Heizleiter. Die Wärmestromdichten 80 und 100 kW/m<sup>2</sup> findet man in Dampfkesseln von fossil befeuerten Kraftwerken. Die maximale Wärmestromdichte bei hochkonzentrierenden Parabolrinnensolarkollektoren vom Typ LUZ LS-III [68] beträgt ca. 80 kW/m<sup>2</sup>. Die niedrigste Wärmestromdichte von 20 kW/m<sup>2</sup> wurde so gewählt, daß

bei der höchsten Massenstromdichte an der Meßstelle 1 eine Verdampfung stattfindet. Bei Untersuchungen an Kältemitteln wurden Wärmestromdichten zwischen 5 und 70 kW/m<sup>2</sup> untersucht [5,6,10]. Ein großer Teil des genannten Bereiches wird also von den gewählten Versuchsparametern abgedeckt.

Neben der Verdampfung im horizontalen Rohr wurde als niedrigster Winkel des geneigten Rohres 3° gewählt. In Vorversuchen [46] wurde bei diesem Winkel eine deutliche Änderung der Strömungsform bei allen Parametern festgestellt. Der Neigungswinkel von 8° wurde von M. Müller [12] untersucht. Die weiteren Winkel 15°, 30° und 45° wurden durch Vorversuche so festgelegt, daß sich durch eine Winkeländerung eine Änderung der Strömungszustände ergibt.

## 4.2 Einfluß des Neigungswinkels auf die Strömungsform

Die Änderung der Strömungsform mit dem Neigungswinkel wurde systematisch für alle Drücke und Massenstromdichten untersucht. Der Versuchsstand wurde zu diesem Zweck ausgehend von der horizontalen Position im Neigungswinkel verändert, bis sich eine Strömungsformänderung zeigte. Außer dem Neigungswinkel wurden dabei keine Versuchs- oder Betriebsparameter verändert. Es hat sich gezeigt, daß hinsichtlich der Einflußfaktoren auf die Strömungsformänderung zwischen 2 Fällen unterschieden werden kann:

- Die Strömungsform ist im horizontalen Fall schwallfrei und ringfrei, d.h. es herrscht Schichten- oder Wellenströmung vor.
- Im horizontalen Fall sind Schwallanteile vorhanden, d.h. Schwall- oder Wellenschwallströmung ist vorherrschend, oder es ist eine Ringströmung vorhanden.

Für den ersten Fall ändert sich bei allen Druckstufen die Strömungsform ab einem Grenzwinkel von einer Schichten- oder Wellenströmung in eine Wellen-Schwallströmung. Abb. 4-3 bis Abb. 4-6 zeigen ein typisches Beispiel für den Einfluß des Neigungswinkels auf die Strömungsform für diesen Fall. In Abb. 4-3 ist anhand des optischen Signals zu sehen, daß eine Wellenströmung vorliegt. Die Temperaturen T9A und T9B befinden sich im oberen Teil der Rohrwand und die Temperatur T9G im oberen Drittel des Strömungskanals (vergl. Abb. 3-10). Nach Abb. 4-3 besteht eine mittlere Temperaturdifferenz von 18 °C zwischen der obersten Position am Rohr und der Temperatur im Rohr. Die obere Rohrwand ist gegenüber der Temperatur im Rohr überhitzt, da der sich im oberen Abschnitt des Rohres befindende Dampf schlechte Wärmeleiteigenschaften hat. Die Temperaturmeßstelle T9G befindet sich im leicht überhitzten Dampf. Die Sattdampftemperatur beträgt 270 °C (vergl. Abb. 4-4).

Bei einem Neigungswinkel von 0,3° zeigt Abb. 4-4, daß die Wellenströmung durch Schwälle unterbrochen wird. Die Schwallperiodendauer beträgt zwischen 6 und 10 Sekunden. Die Schwälle bewirken eine zeitweise Benetzung der oberen Rohrwand, wodurch die mittlere Temperaturdifferenz zwischen T9A und T9G auf 15 °C sinkt. Das untere Temperaturniveau (270 °C) von T9G entspricht der Wassertemperatur. Sinkt der Füllstand des Wassers unterhalb der Temperaturmeßstelle, steigt T9G auf die Dampftemperatur.



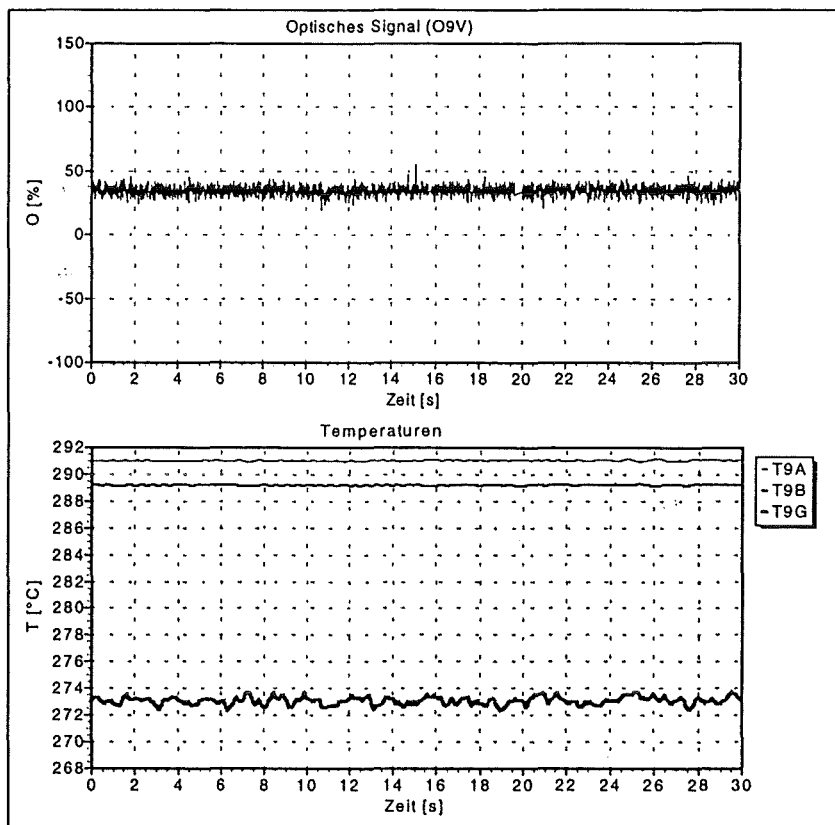


Abb. 4-3: Optisches Signal und Temperatursignale im horizontalen Rohr (Wellenströmung)

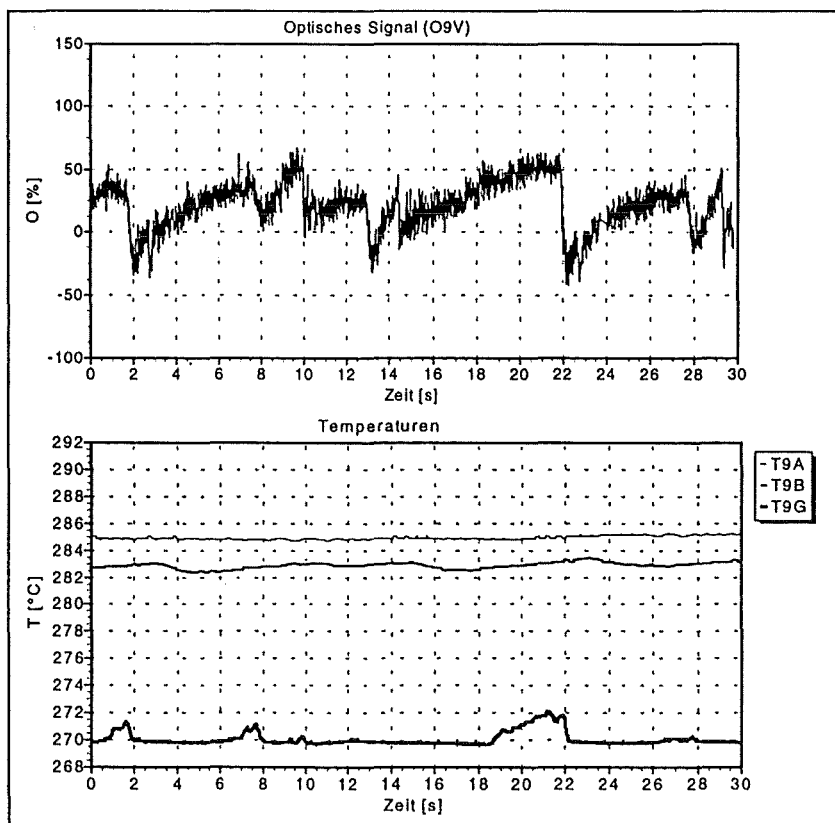


Abb. 4-4: Optisches Signal und Temperatursignale bei  $0.3^\circ$  Neigung (Wellen-Schwallströmung)

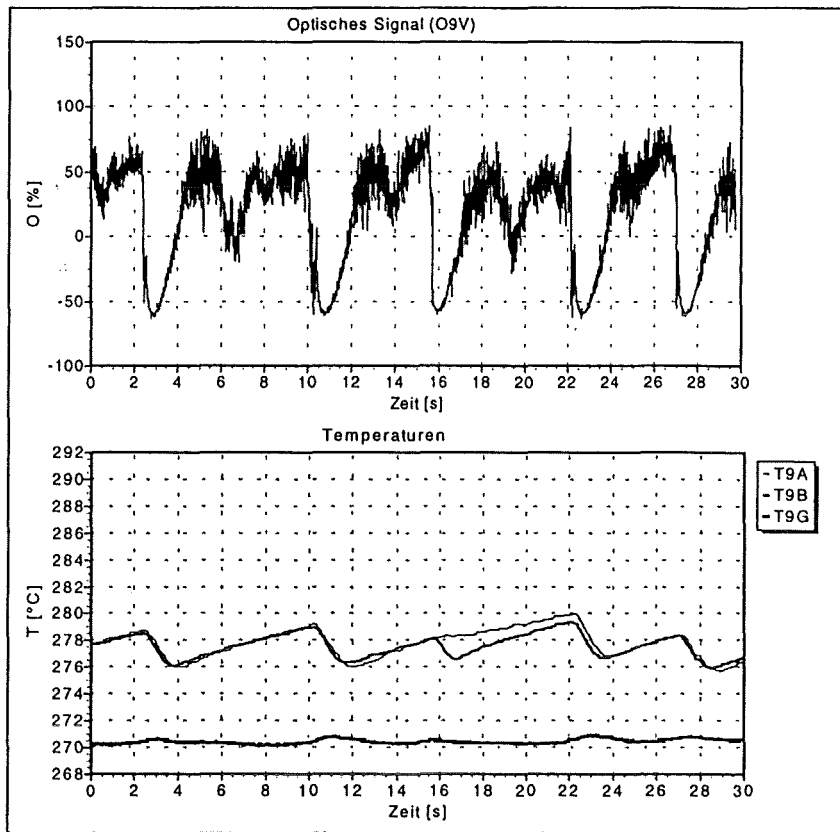


Abb. 4-5: Optisches Signal und Temperatursignale bei 1° Neigung (Wellen-Schwallströmung)

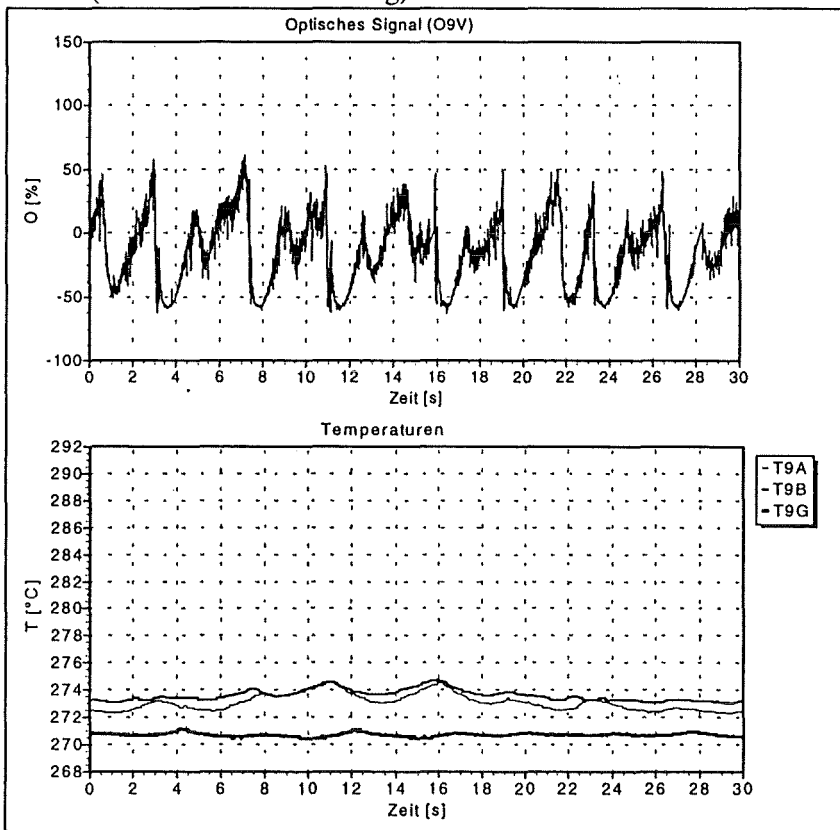


Abb. 4-6: Optisches Signal und Temperatursignale bei 3° Neigung (Wellen-Schwallströmung)

Bei  $1^\circ$  Neigung (Abb. 4-5) werden die Schwallabstände kürzer. Die obere Rohrwand wird hierdurch besser benetzt, wodurch die mittlere Temperaturdifferenz zwischen T9A und T9G auf  $7^\circ\text{C}$  sinkt. Durch die abwechselnde Benetzung und Nichtbenetzung zeigen T9A und T9B Schwankungen, die mit den Schwallen korrelieren.

Ein Neigungswinkel von  $3^\circ$  führt nach Abb. 4-6 zu noch kürzeren Schwallperiodendauern. Durch die im zeitlichen Mittel bessere Benetzung der oberen Rohrwand sinkt die mittlere Temperaturdifferenz zwischen T9A und T9G auf ca.  $3^\circ\text{C}$ .

Der Grenzwinkel für die Änderung von einer Schichten- oder Wellenströmung zu einer Wellen-Schwallströmung betrug unabhängig vom Druck für alle Versuchsparameter zwischen  $0.1^\circ$  und  $0.4^\circ$ , wobei der Durchschnitt bei  $0.3^\circ$  lag. Die Schwallfrequenz nimmt mit steigendem Neigungswinkel stets zu. Durch leichtes Neigen des Rohres kann also die Rohrwand besser benetzt bzw. gekühlt werden und somit der Wärmeübergangskoeffizient im Vergleich zum horizontalen Rohr gesteigert werden.

Anders als bei Schichten- oder Wellenströmungen im horizontalen Rohr verhält es sich, wenn im horizontalen Fall schon Schwallanteile vorhanden sind. Die Strömungsform ändert sich in diesen Fällen nicht qualitativ, sondern nur in Bezug auf die Schwallfrequenzen.

Abb. 4-7 zeigt eine Wellen-Schwallströmung im horizontalen Rohr. Bei einem Neigungswinkel von  $3^\circ$  ist in Abb. 4-8 zu sehen, daß die Schwallfrequenzen steigen, ohne daß sich die Strömungsform dabei ändert. In manchen Fällen kommt es zu einem Übergang von einer Wellen-Schwallströmung zu einer Schwallströmung, was jedoch nicht als Änderung der Strömungsform gewertet wird, da die Wellen-Schwallströmung als Sonderfall der Schwallströmung eingeordnet wird.

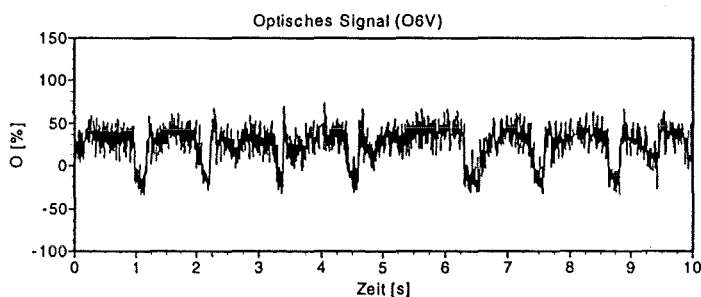


Abb. 4-7: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung im horizontalen Rohr

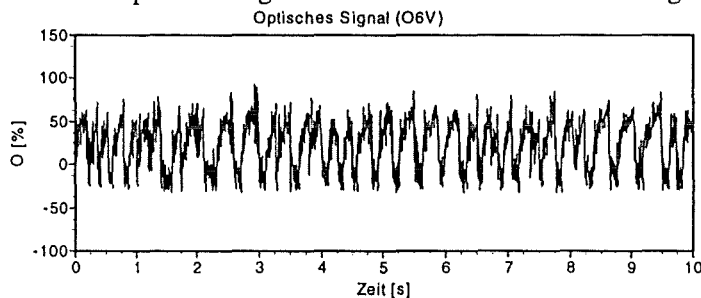


Abb. 4-8: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei  $3^\circ$  Neigung

In Abb. 4-9 ist eine Schwallströmung im horizontalen Rohr zu sehen. Bei einer Neigung bis  $45^\circ$  bleibt die Schwallströmung erhalten, wobei wiederum die Schwallfrequenz mit

dem Neigungswinkel steigt. Ebenso bleiben die beobachteten Ringströmungen bei verschiedenen Neigungswinkeln erhalten.

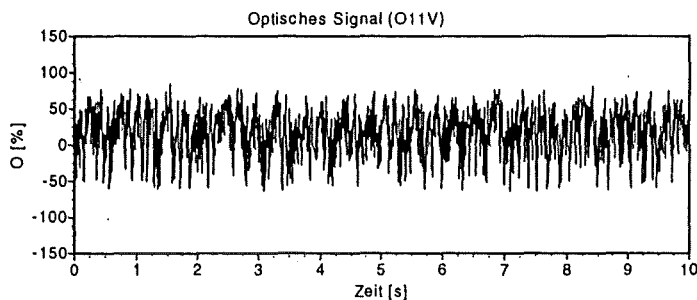


Abb. 4-9: Optisches Signal einer Schwallströmung im horizontalen Rohr

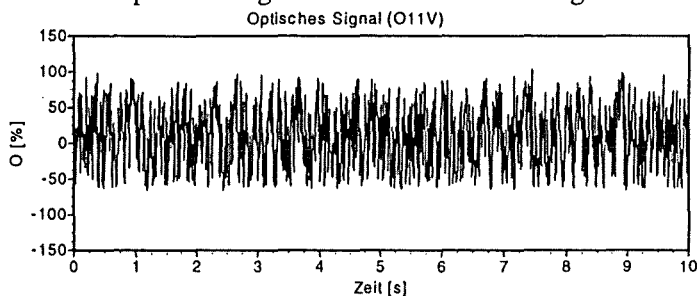


Abb. 4-10: Optisches Signal einer Schwallströmung bei 45° Neigung

Ein Vergleich der Strömungsformen bei einem Neigungswinkel von  $8^\circ$  mit den von M. Müller [12] beschriebenen Ergebnissen zeigt eine große Diskrepanz. Der von Müller beschriebene Übergang zwischen Schichtenströmungen und Ringströmungen kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht verglichen werden, da bei einem Neigungswinkel von  $8^\circ$  hier in keinem Fall eine Schichtenströmung beobachtet wurde. Als Erklärung könnte die auf den Spezialfall von Parabolrinnen-Solarkollektoren ausgerichtete Konstruktion des Versuchstandes von Müller dienen. Die Vorvermischung von Dampf und Wasser mit der zweifachen Strömungsumlenkung in den Rohrbögen kann zu einem nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Strömungsformausbildung in der Meßstrecke führen (vergl. Kapitel 1.1). Sekoguchi et. al. [69] zeigten in horizontalen Luft/Wasser-Zweiphasenströmungen, daß nach einem Rohrbogen eine Strecke von bis zu 100 Innendurchmessern nötig war, um einen Einfluß des Anlaufes auszuschließen. Die Versuchsergebnisse von Müller sind somit nicht ohne weiteres auf Strömungen ohne Vorvermischung und ohne Rohrbögen übertragbar.

Für den untersuchten Grenzwinkel zwischen geschichteten und intermittierenden Strömungsformen kommt es zu ähnlichen Ergebnissen wie bei Luft-Wasser-Versuchen. Barnea et. al. [70] fanden in einem Plexiglasrohr mit einem Innendurchmesser von 25 mm und einer Länge von 10 m, daß es bei Winkeln unter  $1^\circ$  zu Übergängen von geschichteten zu intermittierenden Strömungsformen kommt. Offensichtlich ist dieser Neigungswinkeleinfluß unabhängig von der Wärmezufuhr.

### 4.3 Parametereinflüsse im horizontalen Rohr

Um den Einfluß des Druckes, der Massenstromdichte und der Wärmestromdichte auf die Strömungsformen im horizontalen Rohr systematisch untersuchen zu können, wurde jeweils nur ein Parameter verändert und die anderen Parameter konstant gehalten. Ein Überblick über sämtliche, an allen Meßpositionen des Verdampferrohres gemessenen Strömungsformen zeigte, daß vorwiegend Wellen-, Wellen-Schwall-, und Schwallströmungen vorhanden waren. Blasen- und Pfropfenströmungen wurden nur selten bei Dampfmassengehalten zwischen 0,6 % und 4 % beobachtet. Ringströmungen wurden ebenfalls selten und nur bei der Druckstufe von 2 bar beobachtet (vergl. Kapitel 4.4).

Das Ziel bei der Auslegung von horizontalen Verdampferrohren sollte die Vermeidung von geschichteten Strömungsformen (Schichten- oder Wellenströmungen) sein, um schlechte Wärmeübergangskoeffizienten und kritische Rohrwandtemperaturen infolge der Wandaustrocknung zu vermeiden. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der Parameter für den Übergang von geschichteten Strömungsformen mit einer Teilbenetzung der Rohrwand zu Strömungsformen mit einer vollständigen Benetzung wichtig. Bei Wellen-Schwallströmungen oder Schwallströmungen kann es zu einer intermittierenden Benetzung kommen. Um einen Überblick über den Einfluß von Druck und Massenstromdichte auf die Strömungsformausbildung zu erhalten, wurde aus 850 gemessenen Strömungsformen der Anteil der geschichteten Strömungsformen an der Gesamtzahl der Strömungsformen in Abhängigkeit von Massenstromdichte und Druck bestimmt und in Abb. 4-11 als Grenzfläche dargestellt. Das Diagramm beschreibt die Abhängigkeiten für alle gemessenen Strömungsformen an allen Meßpositionen für alle Dampfmassengehalte, d.h. es wurde keine Unterscheidung nach der Wärmestromdichte bzw. Lage der Meßposition in Strömungsrichtung getroffen.

Für die Auswertung werden die Leerrohrgeschwindigkeiten (superficial velocities) ausgewertet, die sich ergeben, wenn jeweils eine der Phasen alleine im Rohr strömen würde. Die Gas-Leerrohrgeschwindigkeit wird berechnet durch:

$$u_{gs} = \frac{\dot{M}_g}{\rho_g A} = \frac{\dot{m} \dot{x}}{\rho_g} \quad \text{Gl. 4-1}$$

und die Flüssigkeits-Leerrohrgeschwindigkeit durch:

$$u_{ls} = \frac{\dot{M}_l}{\rho_l A} = \frac{\dot{m}(1 - \dot{x})}{\rho_l} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Der Dampfmassengehalt  $\dot{x}$  wird durch eine Enthalpiebilanz berechnet (vergl. Kapitel 4.4).

Im folgenden wird der Einfluß von Druck, Massenstromdichte und Wärmestromdichte auf die Strömungsformen beschrieben.

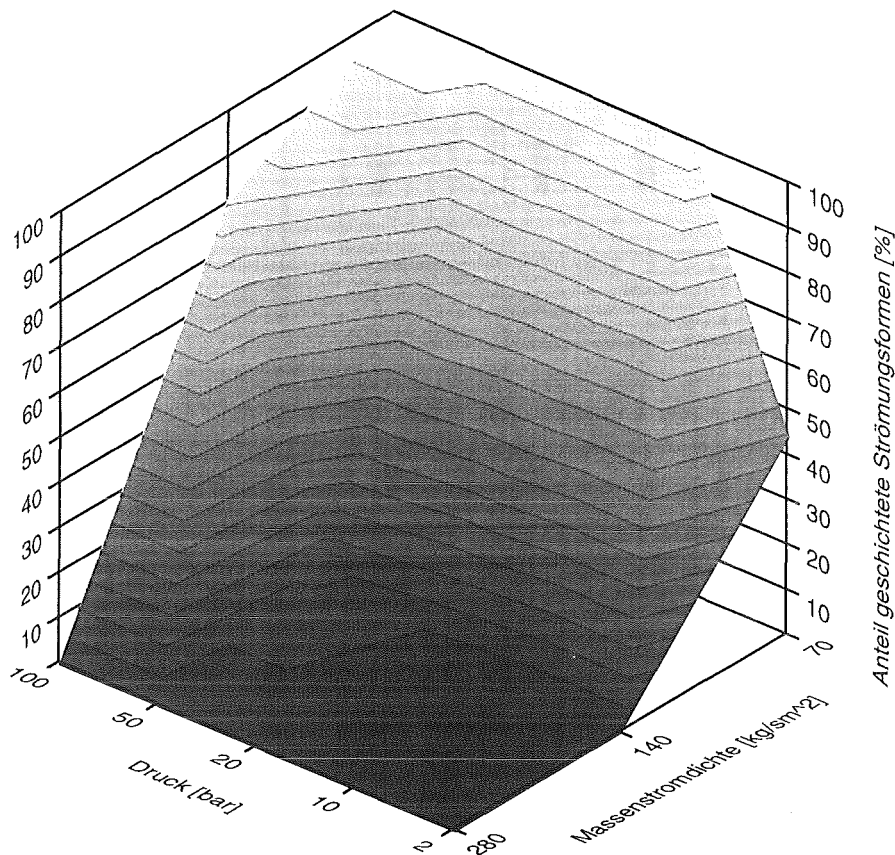


Abb. 4-11: Anteil der geschichteten Strömungsformen an der Gesamtzahl von 850 gemessenen Strömungsformen im horizontalen Rohr als Funktion von Druck und Massenstromdichte

### 4.3.1 Einfluß des Druckes

In Abb. 4-11 ist zu erkennen, daß eine Druckerhöhung zu höheren Anteilen von geschichteten Strömungsformen führen. Die Untersuchung des Druckeinflusses bei jeweils gleichen Dampfmassengehalten zeigt, daß diese Tendenz für den gesamten Bereich von kleinen bis zu großen Dampfmassengehalten vorhanden ist.

In Abb. 4-12 sind in einem Beispiel die optischen Signale für unterschiedliche Drücke, sonst aber gleiche Parameter zu sehen. Bei einem Druck von 2 bar ist eine Wellenschwallströmung vorhanden. Zeitweise ist das Signal einer Wellenströmung zu erkennen. Dieser Wellenströmung sind Schwälle überlagert, die an Intensitätsabnahmen zu erkennen sind (vergl. Kapitel 2.3.1). Bei einem Druck von 20 bar ist qualitativ die selbe Strömungsform wie beim Druck von 2 bar vorhanden. Die Strömungsformen unterscheiden sich lediglich in ihrer Feinstruktur. Bei einem Druck von 50 bar ist eine Wellenströmung zu beobachten. Es sind noch leichte Ansätze von Schwällen zu erkennen, die jedoch nicht mehr bis zur oberen Rohrwand reichen. Ein Druck von 100 bar zeigt eine reine Wellenströmung, zu erkennen an dem Signal mit wenig Intensitätsschwankungen.

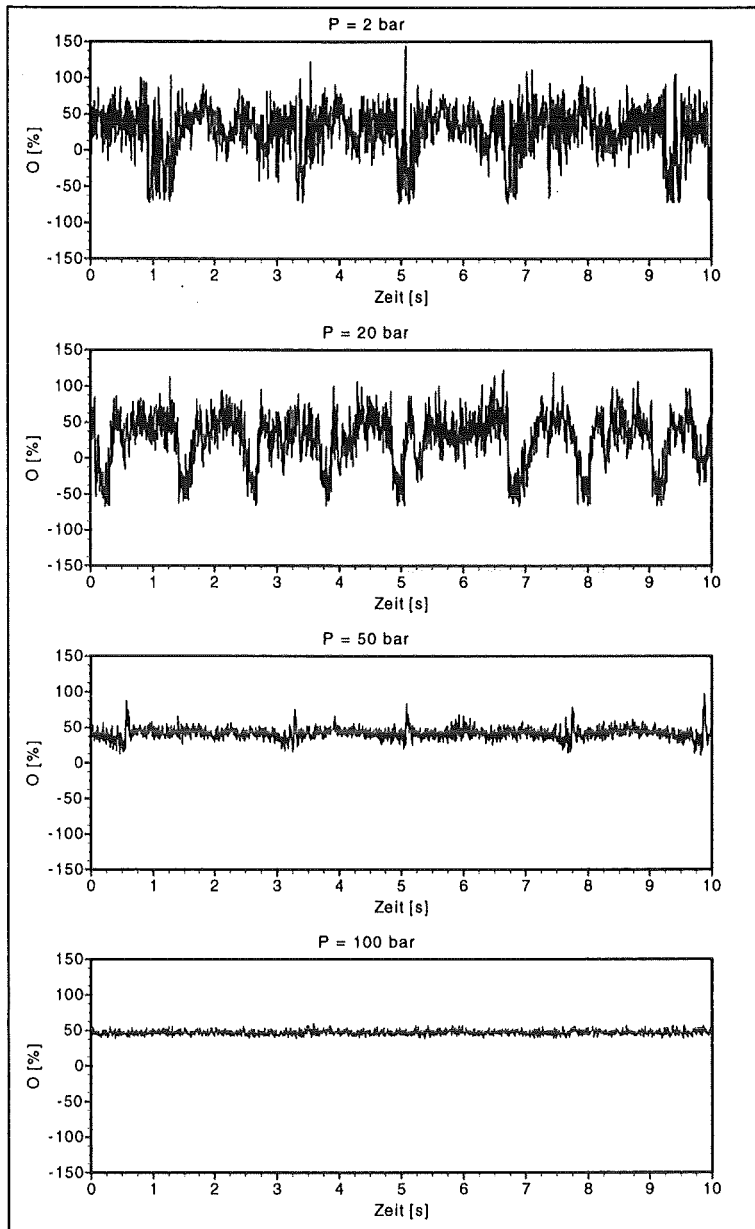


Abb. 4-12: Optische Signale bei verschiedenen Drücken, Änderung der Strömungsform von einer Wellen-Schwallströmung zu einer Wellenströmung ( $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ )

Neben der Betrachtung bei gleichen Dampfmassengehalten wurden die Strömungsformen bei gleichen Leerrohrgeschwindigkeiten und sonst gleichen Parametern aber unterschiedlichen Drücken verglichen. Es zeigte sich, daß sowohl für gleiche Gas-Leerrohrgeschwindigkeiten  $u_{gs}$  als auch für gleiche Flüssigkeits-Leerrohrgeschwindigkeiten  $u_{ls}$  die Schwallanteile in der Strömung mit steigendem Druck abnehmen.

Eine Abnahme von Schwallströmungen mit steigendem Druck wurde auch von Reimann und John [15] in adiabaten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen und ebenso von Nakamura et. al. [18] festgestellt. Der Druckeinfluß auf die Schwallbildung ist offenbar nicht an die Wärmezufuhr gekoppelt.

### 4.3.2 Einfluß der Massenstromdichte

Abb. 4-11 zeigt, daß mit steigender Massenstromdichte der Anteil der geschichteten Strömungsformen abnimmt und der Schwallanteil zunimmt. Bei hohen Massenstromdichten ( $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) sind bei allen Drücken keine geschichteten Strömungsformen vorhanden. Es existieren vorwiegend Wellen-Schwallströmungen und Schwallströmungen. Bei kleinen Massenstromdichten ( $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) sind im untersuchten Parameterbereich nur bei einem Druck von 2 bar Schwallanteile vorhanden, ab einem Druck von 10 bar sind nur noch geschichtete Strömungsformen zu finden.

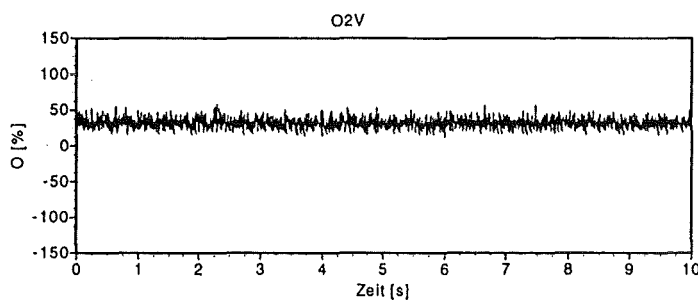


Abb. 4-13: Optisches Signal bei  $\dot{m} = 70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 13 \%$ ,  $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ ,  $P = 10 \text{ bar}$  (Wellenströmung)

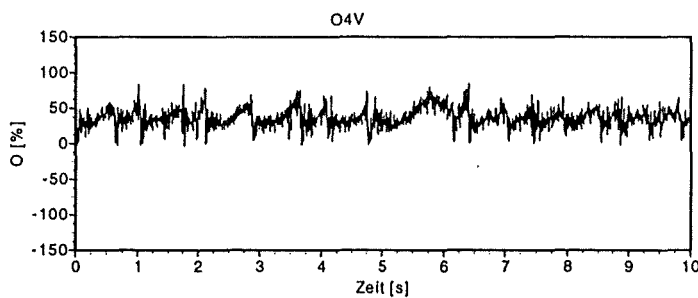


Abb. 4-14: Optisches Signal bei  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 13 \%$ ,  $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ ,  $P = 10 \text{ bar}$  (Wellen-Schwallströmung)

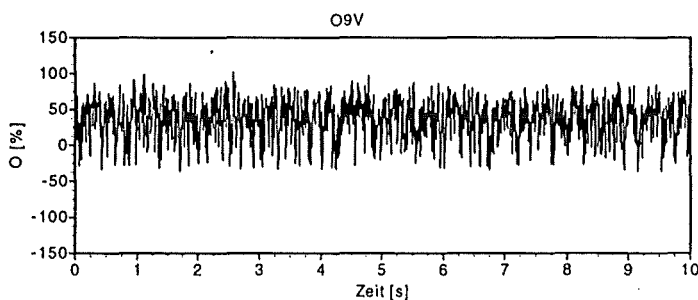


Abb. 4-15: Optisches Signal bei  $\dot{m} = 280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 13 \%$ ,  $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$ ,  $P = 10 \text{ bar}$  (Schwallströmung)

Der Einfluß der Massenstromdichte auf die Strömungsformausbildung bei konstantem Dampfmassengehalt wurde durch einen Vergleich der Strömungsformen an verschiedenen Strömungsquerschnitten mit jeweils gleichem Dampfmassengehalt und verschiedener Massenstromdichte untersucht. Auch bei gleichem Dampfmassengehalt nimmt der Schwallanteil mit steigender Massenstromdichte zu.



Bei Steigerung der Massenstromdichte von  $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (Abb. 4-13) auf  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (Abb. 4-14) findet man bei gleichem Dampfmassegehalt einen Übergang von Wellenströmungen zu Wellen-Schwallströmungen. Bei Steigerung der Massenstromdichte von  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  auf  $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (Abb. 4-15) zeigt sich bei gleichem Dampfmassegehalt ein Übergang von Wellen-Schwallströmungen zu Schwallströmungen.

Ein Vergleich der Strömungsformen bei gleichen Gas-Leerrohrgeschwindigkeiten  $U_{gs}$  und sonst gleichen Parametern, aber verschiedenen Massenstromdichten machte deutlich, daß dieselbe Abhängigkeit existiert wie bei der Betrachtung bei gleichen Dampfmassegehalten. Mit steigender Massenstromdichte nehmen ebenfalls die Schwallanteile in der Strömung zu.

Bei Untersuchungen mit Kältemitteln wurden ähnliche Tendenzen festgestellt. Ha und Bergles [6] stellten geschichtete Strömungsformen und eine Unterdrückung von Schwallströmungen bei Massenstromdichten von  $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  fest. Mit steigenden Massenstromdichten stiegen die Wellenamplituden an.

### 4.3.3 Einfluß der Wärmestromdichte

Zur Klärung des Einflusses der Wärmezufuhr auf die Strömungsformausbildung wurden die Strömungsformen bei verschiedenen Wärmestromdichten und sonst gleichen Versuchsparametern verglichen. Bei steigender Heizleistung findet man einen Zustand mit gleichem Dampfmassegehalt in einem stromaufwärts liegenden Strömungsquerschnitt. Da die Strömungsformen an mehreren Stellen in Strömungsrichtung gemessen wurden, konnten diese an verschiedenen Strömungsquerschnitten mit jeweils gleichem Dampfmassegehalt, gleicher Massenstromdichte, gleichem Druck aber unterschiedlicher Wärmestromdichte verglichen werden. Die Auswertung von 330 Meßpunkten zeigte, daß die Strömungsformen in 95 % der Fälle im untersuchten Parameterbereich trotz unterschiedlicher Wärmestromdichte unverändert blieben. Dieser Zusammenhang wurde gleichsam bei Dampfmassegehalten zwischen 1 % und 100 % gefunden.

Abb. 4-16 verdeutlicht dies anhand eines Beispiels bei einem Druck von 50 bar und einer Massenstromdichte von  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Dargestellt sind schematisch die im Verlauf der Verdampfung sich bildenden Strömungsformen im Rohr bei unterschiedlicher Wärmezufuhr. Bei einer Wärmestromdichte von  $20 \text{ kW/m}^2$  befindet sich im vorderen Teil des Rohres (stromaufwärts) eine Blasenströmung. Im mittleren Teil des Rohres bildet sich eine Wellenströmung und im hinteren Teil eine Wellen-Schwallströmung. Der maximale Dampfmassegehalt beträgt 10 %.

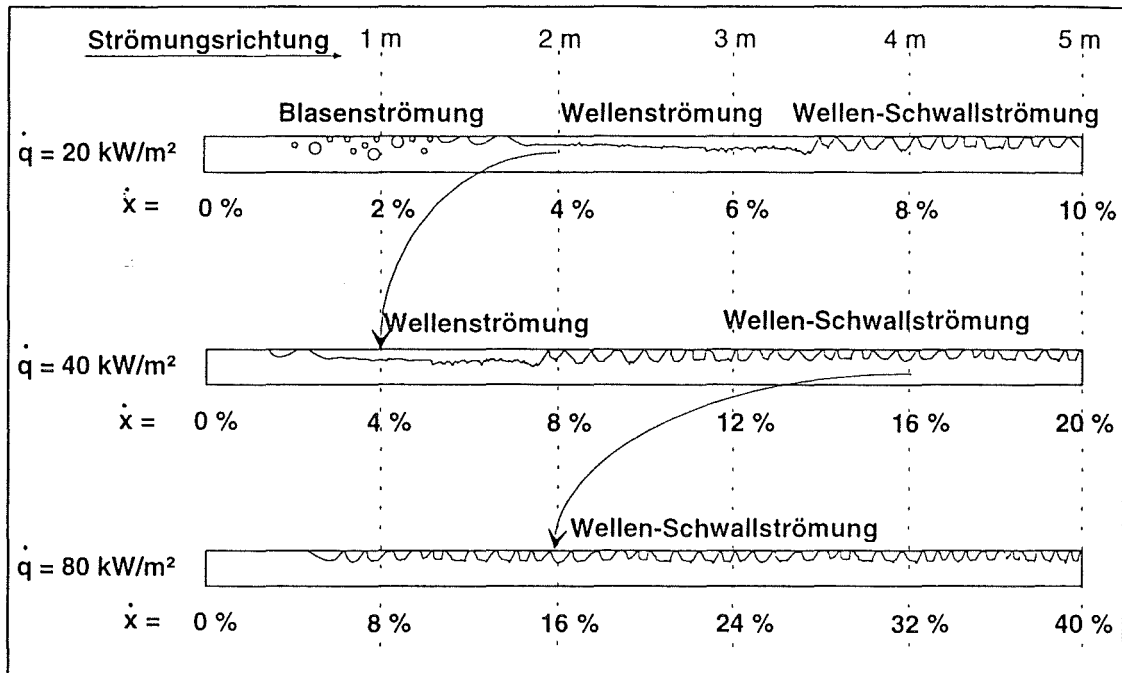


Abb. 4-16: Schematische Darstellung der Strömungsformen im Rohr bei verschiedenen Wärmestromdichten ( $P = 50 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )

In Abb. 4-17 ist das optische Signal für die Position 2 m mit einem Dampfmassegehalt von 4 % bei einer Wärmestromdichte von  $20 \text{ kW/m}^2$  dargestellt. Es ist eine Wellenströmung zu erkennen.

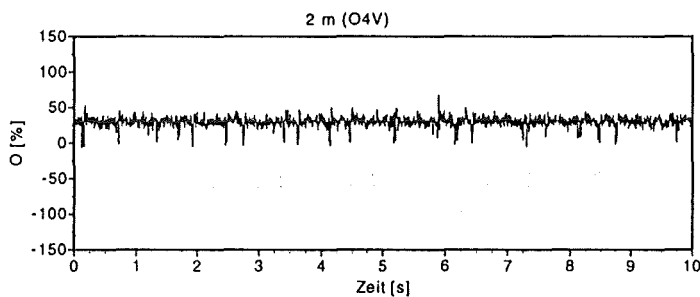


Abb. 4-17: Optisches Signal an der Position 2 m bei  $P = 50 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 4\%$ ,  $\dot{q} = 20 \text{ kW/m}^2$  (Wellenströmung)

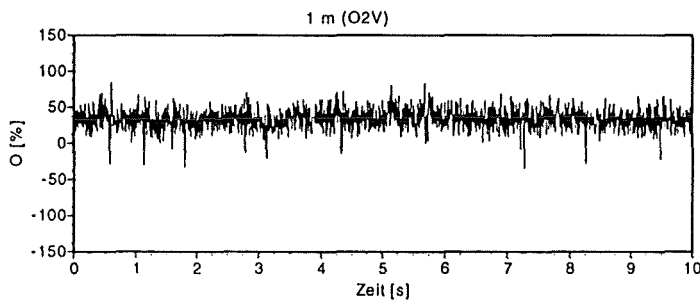


Abb. 4-18: Optisches Signal an der Position 1 m bei  $P = 50 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 4\%$ ,  $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$  (Wellenströmung)

Bei einer Wärmestromdichte von  $40 \text{ kW/m}^2$  verschiebt sich, wie in Abb. 4-16 angedeutet, der Wellenströmungsbereich stromaufwärts. Durch die höhere Wärmestromdichte befindet sich der Zustand mit dem vorher betrachteten Dampfmassegehalt von 4 % jetzt an der Position 1 m (siehe Pfeil in Abb. 4-16). Anhand von Abb. 4-18 ist zu erkennen, daß an dieser Position jetzt eine Wellenströmung vorhanden ist.

Bei einem Dampfmassegehalt von 16 % liegt bei einer Wärmestromdichte von  $40 \text{ kW/m}^2$  nach Abb. 4-19 eine Wellen-Schwallströmung vor. Eine Wärmestromdichte von  $80 \text{ kW/m}^2$  führt zu einem Zustand mit dem Dampfmassegehalt von 16 % an der Position 2 m (siehe Pfeil in Abb. 4-16). Wie schon in der Skizze in Abb. 4-16 angedeutet, befindet sich nach Abb. 4-20 an dieser Position eine Wellen-Schwallströmung. In beiden Signalen (Abb. 4-19 und Abb. 4-20) sind Wellenanteile und Schwallanteile vorhanden. Es handelt sich um verschiedene Ausprägungen von Wellen-Schwallströmungen.

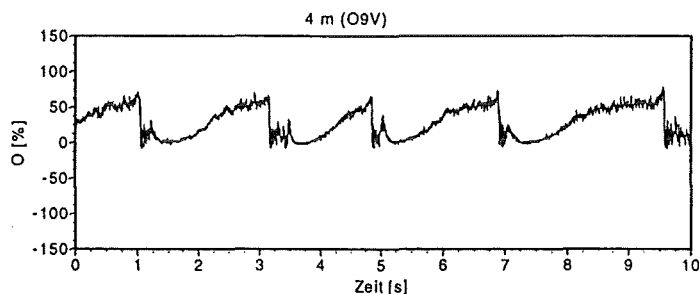


Abb. 4-19: Optisches Signal an der Position 4 m bei  $P = 50 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 16 \%$ ,  $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$  (Wellen-Schwallströmung)

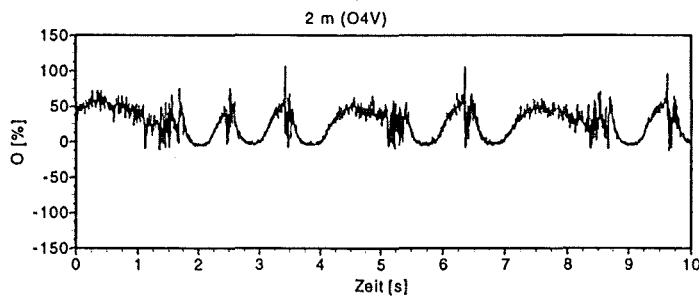


Abb. 4-20: Optisches Signal an der Position 2 m bei  $P = 50 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 16 \%$ ,  $\dot{q} = 80 \text{ kW/m}^2$  (Wellen-Schwallströmung)

Bei steigender Wärmestromdichte verschieben sich also die Strömungsformbereiche entsprechend ihrem Dampfmassegehalt stromaufwärts, so daß bei gleichen Dampfmassegehalten aber unterschiedlichen Wärmestromdichten gleiche Strömungsformen vorhanden sind.

Aus Abb. 4-21 und Abb. 4-22 geht hervor, daß bei einem Druck von 10 bar, einer Massenstromdichte von  $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$  und einem Dampfmassegehalt von 6 % bei verschiedenen Wärmestromdichten eine Wellen-Schwallströmung vorliegt. Die Verdopplung der Wärmestromdichte hat jedoch eine Erhöhung der Schwallfrequenz zur Folge. Dieser Zusammenhang wurde bei allen Druckstufen und allen Massenstromdichten gefunden.

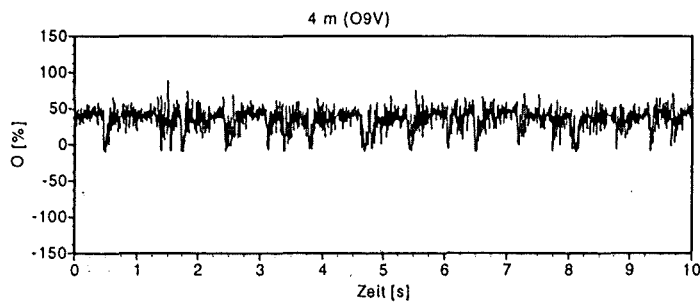


Abb. 4-21: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei  $P = 10 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 6 \%$ ,  $\dot{q} = 40 \text{ kW/m}^2$

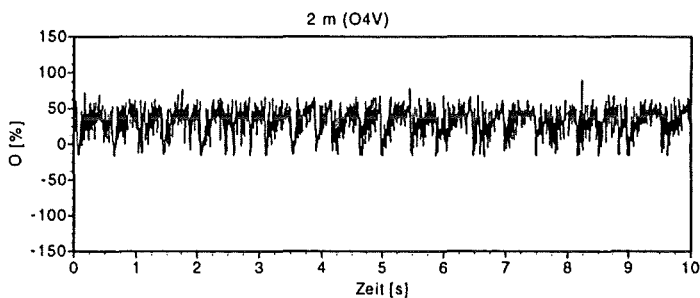


Abb. 4-22: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei  $P = 10 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 280 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x} = 6 \%$ ,  $\dot{q} = 80 \text{ kW/m}^2$

In Gl. 4-1 und Gl. 4-2 zur Berechnung der Leerrohrgeschwindigkeiten wird der Wärmestrom nicht berücksichtigt, so daß bei gleichem Dampfmassengehalt, gleicher Massenstromdichte und gleichem Druck, aber verschiedener Wärmestromdichte auch gleiche Leerrohrgeschwindigkeiten vorhanden sind. Die Strömungsformenbereiche verschieden sich somit bei verschiedenen Wärmestromdichten auch entsprechend ihrer Leerrohrgeschwindigkeiten.

Die beschriebenen 5 % der Fälle, bei denen eine Veränderung der Strömungsform bei unterschiedlichen Wärmestromdichten beobachtet wurde, betreffen ausschließlich kleine Massenstromdichten ( $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ). Es wurde hier ein Übergang von Wellen-Schwallströmungen oder Schwallströmungen zu Wellenströmungen bei steigender Wärmestromdichte beobachtet. Da Strömungen mit Schwallanteilen bei Massenstromdichten von  $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$  nur bei der Druckstufe von 2 bar gefunden wurden (vergl. Abb. 4-11), konnte dieser Effekt nur bei der niedrigen Druckstufe beobachtet werden.

Als Beispiel zeigt Abb. 4-23 das optische Signal einer Wellen-Schwallströmung bei einem Druck von 2 bar, einer Massenstromdichte von  $71 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , einem Dampfmassengehalt von 15 % und einer Wärmestromdichte von  $20 \text{ kW/m}^2$ . Bei doppelter Wärmestromdichte und sonst unveränderten Parametern kommt es nach Abb. 4-24 zu einer Wellenströmung.

Schmidt [5] beobachtete bei Versuchen mit Kältemitteln ebenfalls eine Unterdrückung von Schwallen bei steigenden Wärmestromdichten. In Übereinstimmung mit den hier beschriebenen Ergebnissen stellte auch Schmidt als Tendenz fest, daß bei hohen Massenstromdichten die Schwalle nicht mehr unterdrückt werden. Der quantitative Vergleich der Ergebnisse von Schmidt mit den hier untersuchten Dampf/Wasser-Strömungen zeigt jedoch große Unterschiede, da Schmidt erst ab Massenstromdichten

von  $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$  beobachtete, daß auch bei hohen Wärmestromdichten Schwallanteile in der Strömung vorhanden waren. Die Versuchsergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, daß bei Massenstromdichten ab  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  die Schwälle stets erhalten blieben, auch für Wärmestromdichten bis  $100 \text{ kW/m}^2$ , die höher als die von Schmidt verwendeten Wärmestromdichten liegen.

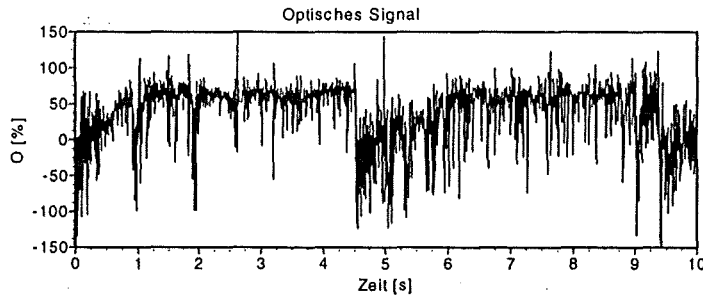


Abb. 4-23: Optisches Signal einer Wellen-Schwallströmung bei  $P=2 \text{ bar}$ ,  $\dot{m}=71 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x}=15 \%$ ,  $\dot{q}=20 \text{ kW/m}^2$

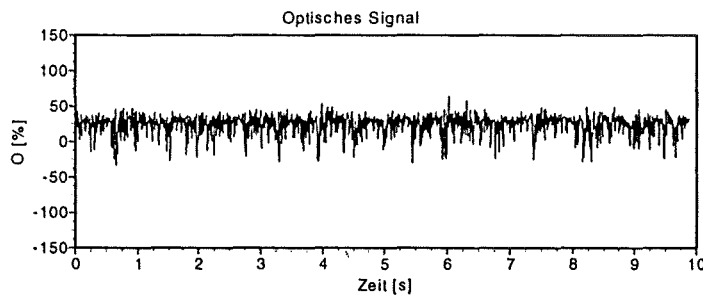


Abb. 4-24: Optisches Signal einer Wellenströmung bei  $P=2 \text{ bar}$ ,  $\dot{m}=71 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $\dot{x}=15 \%$ ,  $\dot{q}=40 \text{ kW/m}^2$

#### 4.4 Vergleich von Meßdaten mit einer Strömungsformenkarte

Strömungsformenkarten dienen zur Vorhersage der zu erwartenden Strömungsform. Die nach heutigem Stand der Technik veröffentlichten Strömungsformenkarten basieren auf Modellen, die für adiabate Zweiphasenströmungen entwickelt wurden. Eine Anwendbarkeit der Karten bzw. Modelle für nicht-adiabate Zweiphasenströmungen ist nicht eindeutig geklärt, insbesondere nicht für die Verdampfung von Wasser in metallischen Rohren.

Die häufig verwendete Strömungsformenkarte von Taitel und Dukler [9] wurde von Kattan et. al. [71] mit Meßdaten aus verdampfenden Kältemitteln in horizontalen Rohren verglichen. Abb. 4-25 zeigt die Strömungsformenkarte nach Taitel und Dukler mit Meßpunkten für das Kältemittel R402. Auf der Abszisse ist der Martinelli-Parameter aufgetragen. Auf der Ordinate, eine mit der Leerrohrgeschwindigkeit  $u_{gs}$  gebildete Froude-Zahl  $F$  für die Grenzkurve zwischen Wellen- und Intermittierenden oder Ringströmungen aufgetragen. Für die Grenzkurve zwischen Blasen- und Pfropfenströmungen ist auf der Ordinate eine mit dem bezogenen Druckabfall in der flüssigen Phase gebildete Froude-Zahl  $T$  aufgetragen (vergl. [71]). Aus der Abbildung ist zu entnehmen, daß die Strömungsformen mit intermittierenden Anteilen und die geschichteten Strömungsformen im Bereich der Ringströmung liegen. Anhand solcher Vergleiche

haben die Autoren gezeigt, daß die Übereinstimmung der Meßdaten mit der Strömungsformenkarte gering ist, so daß die Anwendbarkeit für nicht-adiabate Zweiphasenströmungen zweifelhaft erscheint.

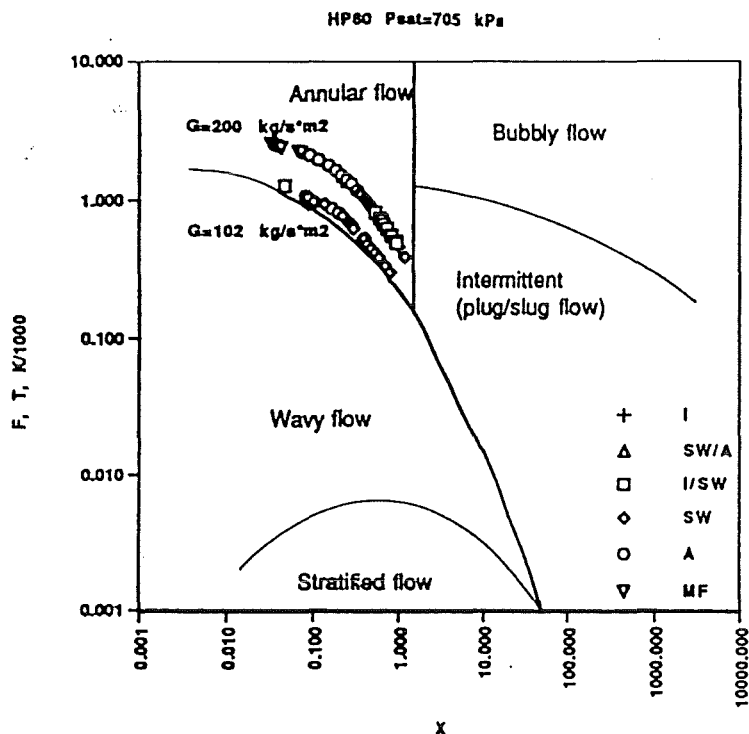


Abb. 4-25: Strömungsformenkarte nach Taitel und Dukler [9] mit Meßpunkten für das Kältemittel R402 nach Kattan et. al.[71]  
(I=Intermittent, SW=Stratified Wavy, A=Annular, MF= Mist Flow)

Steiner [7] modifizierte die Karte von Taitel und Dukler [9] und veröffentlichte seine Strömungsformenkarte im VDI-Wärmeatlas [8], Abb. 4-26. Der Autor hat den Einfluß der Oberflächenspannung in das Modell integriert und die Bereichsgrenzen überarbeitet. Die Karte wurde mit gemessenen Strömungsformen von verdampfenden Kältemitteln (R12 und R22) verglichen. Die Meßdaten sind in Abb. 4-26 als Meßpunkte in der Strömungsformenkarte für ein horizontales Rohr mit einem Innendurchmesser von 14 mm eingezeichnet. Steiner fand unter der Annahme von Grenzbändern statt Grenzkurven eine zufriedenstellende Übereinstimmung von Meßdaten mit der Strömungsformenkarte.

Kattan et. al. [10] haben ebenfalls einen Vergleich von gemessenen Strömungsformen in Kältemitteln (R123 u.a.) mit der Strömungsformenkarte im VDI-Wärmeatlas [8] vorgenommen. 84 % von 600 Meßpunkten wurden richtig vorhergesagt, so daß eine gute Übereinstimmung herrscht. Die meisten der falsch vorhergesagten Meßpunkte waren Nebelströmungen.

Da von den verschiedenen Autoren für die Strömungsformenkarte des VDI-Wärmeatlas eine gute bzw. zufriedenstellende Übereinstimmung mit Meßdaten aus Kältemitteln gefunden wurde, scheint die Karte für die Vorhersage von Strömungsformen in nicht-adiabaten Zweiphasenströmungen mit Kältemitteln geeignet zu sein.

Durch einen Vergleich von in dieser Arbeit gemessenen Strömungsformen in nicht-adiabaten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen im horizontalen Rohr mit der VDI-Strömungsformenkarte soll im folgenden untersucht werden, ob wie bei den Kältemitteln eine gute bzw. zufriedenstellende Übereinstimmung herrscht. Die Meßpunkte sollen dabei wie in Abb. 4-26 in die Strömungsformenkarte eingetragen werden.

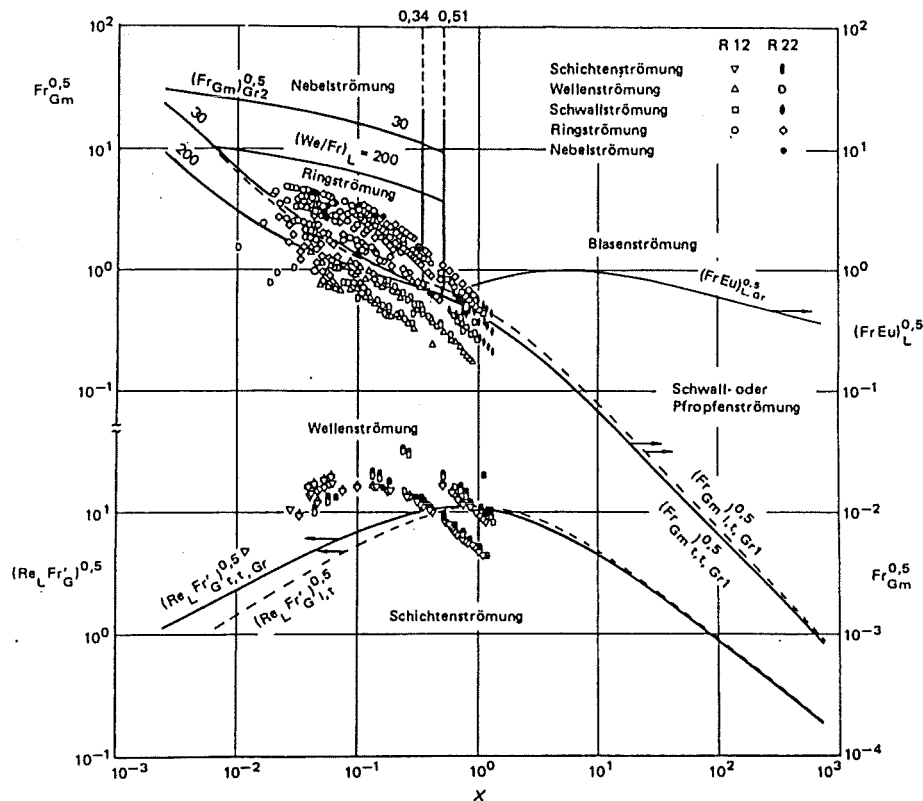


Abb. 4-26: Strömungsformenkarte nach Steiner [7] (VDI-Wärmeatlas [8]) mit Meßpunkten für die Kältemittel R12 und R22

Die Berechnung der druck-, durchmesser-, und mediumabhängigen Grenzkurven wird nach [8] durchgeführt, wobei die Herleitung der Bedingungen für die Übergänge zwischen den Strömungsformen und deren physikalische Begründung in [7] beschrieben sind.

Zur Berechnung der Zuordnung des Martinelli-Parameters  $X$  zu den Grenzkurven wird eine mittlere Flüssigkeitshöhe  $h$  bei Zugrundelegung einer Schichten- oder Wellenströmung berechnet. Daraus ergeben sich die Querschnittsanteile der Phasen  $f_g$  und  $f_l$  und die Umfangsanteile  $U_g$  und  $U_l$  und die Phasengrenzfläche  $U_i$ . Durch den Bezug auf den Rohrdurchmesser  $d$  werden die Größen dimensionslos gemacht:

$$\tilde{h}_l = \frac{h}{d} \quad \text{Gl. 4-3}$$

$$\tilde{U} = \frac{U}{d} \quad (\text{für die Phasen 'g' und 'l' und die Phasengrenzfläche 'i'}) \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$\tilde{f} = \frac{f}{d^2} \quad (\text{für die Phasen 'g' und 'l'}) \quad \text{Gl. 4-5}$$

Zwischen den dimensionslosen Querschnitts- und Umfangsanteilen und der dimensionslosen Flüssigkeitshöhe bestehen folgende Zusammenhänge:

Für  $\tilde{h}_1 \leq 0.5$  gilt:

$$\tilde{U}_1 = \left[ 8\sqrt{\tilde{h}_1} - 2\sqrt{\tilde{h}_1(1-\tilde{h}_1)} \right] / 3 \quad \text{Gl. 4-6}$$

$$\tilde{U}_g = \pi - \tilde{U}_1 \quad \text{Gl. 4-7}$$

$$\tilde{f}_1 = \left[ 12\sqrt{\tilde{h}_1(1-\tilde{h}_1)} + 8\sqrt{\tilde{h}_1} \right] \cdot \tilde{h}_1 / 15 \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$\tilde{f}_g = \frac{\pi}{4} - \tilde{f}_1 \quad \text{Gl. 4-9}$$

Für  $\tilde{h}_1 > 0.5$  gilt:

$$\tilde{U}_g = \left[ 8\sqrt{1-\tilde{h}_1} - 2\sqrt{\tilde{h}_1(1-\tilde{h}_1)} \right] / 3 \quad \text{Gl. 4-10}$$

$$\tilde{U}_1 = \pi - \tilde{U}_g \quad \text{Gl. 4-11}$$

$$\tilde{f}_g = \left[ 12\sqrt{\tilde{h}_1(1-\tilde{h}_1)} + 8\sqrt{1-\tilde{h}_1} \right] \cdot (1-\tilde{h}_1) / 15 \quad \text{Gl. 4-12}$$

$$\tilde{f}_1 = \frac{\pi}{4} - \tilde{f}_g \quad \text{Gl. 4-13}$$

Für  $0 \leq \tilde{h}_1 \leq 1$  gilt:

$$\tilde{U}_i = 2\sqrt{\tilde{h}_1(1-\tilde{h}_1)} \quad \text{Gl. 4-14}$$

$\tilde{h}_1$  und X werden iterativ berechnet durch Gl. 4-6 bis Gl. 4-14 und:

$$X = \sqrt{\left( \frac{\tilde{U}_g + \tilde{U}_i}{\pi} \right)^{0.25} \left( \frac{\pi^2}{64\tilde{f}_g^2} \right) \left( \frac{\tilde{U}_g + \tilde{U}_i}{\tilde{f}_g} + \frac{\tilde{U}_i}{\tilde{f}_1} \right) \left( \frac{\pi}{\tilde{U}_1} \right)^{0.25} \left( \frac{64\tilde{f}_1^3}{\pi^2\tilde{U}_1} \right)} \quad \text{Gl. 4-15}$$

Die Grenzkurve zwischen Schichten- und Wellenströmung wird berechnet durch:

$$(\text{Re}_l \text{Fr}_g')_{\text{Gr}}^{0.5} = \left( \frac{(2263)^2}{\pi^3} \cdot \tilde{f}_1 \cdot \tilde{f}_g^2 \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-16}$$



Zur Berechnung der Grenzkurve zwischen Wellenströmung und Schwall- oder Pfropfen- oder Ringströmung dient:

$$(\text{Fr}_{\text{gm}})_{\text{Gr1}}^{0.5} = \left( \frac{16 \tilde{f}_g^3}{\pi^2 \sqrt{1 - (2\tilde{h}_1 - 1)^2}} \left( \frac{\pi^2}{25\tilde{h}_1^2} \left( \frac{\text{Fr}}{\text{We}} \right)_1 + 1 \right) \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-17}$$

Die Grenzkurve zwischen Blasenströmung und Schwall- oder Pfropfenströmung wird bestimmt durch:

$$(\text{FrEu})_{\text{l,Gr}}^{0.5} = \left( \frac{128 \tilde{f}_g \tilde{f}_l^2}{\pi^2 \tilde{U}_l} \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-18}$$

Der Übergang von der Schwall- zur Ringströmung ist bei turbulenter Gas- und Flüssigkeitsströmung ( $\text{Re}_l \geq 1187$ ,  $\text{Re}_g \geq 1187$ ):

$$X = 0.34 \quad \text{Gl. 4-19}$$

und bei turbulenter Gas- und laminarer Flüssigkeitsströmung ( $\text{Re}_l < 1187$ ,  $\text{Re}_g \geq 1187$ ):

$$X = 0.51 \quad \text{Gl. 4-20}$$

Die Grenzkurve zwischen Ring- und Nebelströmung wird berechnet durch:

$$(\text{Fr}_{\text{gm}})_{\text{Gr2}}^{0.5} = \left( \frac{7680 \tilde{f}_g^2}{\pi^2 \xi_{\text{Ph}}} \left( \frac{\text{Fr}}{\text{We}} \right)_1 \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-21}$$

Die programmierten Grenzkurven sind in Abb. 4-28 bis Abb. 4-40 für die Drücke 2, 10, 20, 50 und 100 bar zu sehen. Die Aufteilung in verschiedene Diagramme ist notwendig, da die Grenzkurve zwischen der Wellenströmung und der Schwall-, Pfropfen-, oder Ringströmung und die Grenzkurve zwischen Ring- und Nebelströmung druckabhängig ist.

Zur Eintragung der Meßpunkte in die Strömungsformenkarte wird zunächst der Martinelli-Parameter berechnet:

$$X = \left( \frac{1 - \dot{x}}{\dot{x}} \right)^{0.875} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \left( \frac{\eta_l}{\eta_g} \right)^{0.125} \quad \text{Gl. 4-22}$$

Die Berechnung der folgenden Kenngrößen liefert durch einen Vergleich mit den Grenzkurven die Strömungsform und ermöglicht die Eintragung der Meßpunkte in die Strömungsformenkarte:

$$(\text{Re}_l \text{Fr}_g')^{0.5} = \left( \frac{\dot{m}^3 \dot{x}^2 (1 - \dot{x})}{\rho_g (\rho_l - \rho_g) \eta_l g} \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-23}$$

$$Fr_{Gm}^{0.5} = \left( \frac{\dot{m}^2 \dot{x}^2}{dg\rho_l\rho_g} \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-24}$$

$$(FrEu)_1^{0.5} = \left( \frac{\xi_1 \dot{m}^2 (1-\dot{x})^2}{2d\rho_l(\rho_l - \rho_g)g} \right)^{0.5} \quad \text{Gl. 4-25}$$

$$\left( \frac{We}{Fr} \right)_1 = \frac{gd^2\rho_l}{\sigma} \quad \text{Gl. 4-26}$$

mit

$$\xi_1 = \frac{0.3164}{Re_1^{0.25}} \quad \text{Gl. 4-27}$$

$$Re_1 = \dot{m}(1-\dot{x})d / \eta_l \quad \text{Gl. 4-28}$$

Die zur Berechnung von Gl. 4-3 bis Gl. 4-28 notwendigen Stoffgrößen und Versuchsparameter werden für jeden Datenpunkt mit der hier erstellten Software aus den Meßdaten ermittelt. Der Dampfmassegehalt  $\dot{x}$  wird über eine Enthalpiebilanz für den jeweiligen Meßquerschnitt aus den Meßdaten berechnet. Es wird dabei von thermodynamischem Gleichgewicht ausgegangen und die Verlustwärme und die Unterkühlung des Wassers am Eintritt in die Meßstrecke berücksichtigt. Die Stoffwerte werden für jeden Datenpunkt durch den gemessenen Sättigungsdruck nach den in [72] angegebenen Formeln berechnet.

Im folgenden werden die Kennzahlen für verschiedene Meßpunkte berechnet und in die Strömungsformenkarte eingezeichnet. Durch einen Vergleich von insgesamt 850 gemessenen Strömungsformen mit der Strömungsformenkarte soll die Übereinstimmung von Meßdaten mit der Karte untersucht werden. Da sich die Grenzkurven bei verschiedenen Drücken aufgrund verschiedener Stoffwerte verschieben, werden die Meßpunkte nach Drücken getrennt in die Karte eingezeichnet. Hierzu werden die in Abb. 4-27 angegebenen Symbole verwendet.

- |   |                        |
|---|------------------------|
| ● | Schichtenströmung      |
| ■ | Wellenströmung         |
| ▼ | Schwallströmung        |
| ▲ | Wellen-Schwallströmung |
| * | Blasenströmung         |
| + | Pfropfenströmung       |
| ◆ | Ringströmung           |

Abb. 4-27: Legende für die Meßpunkte in den Strömungsformenkarten

#### 4.4.1 Wellen- und Schwallströmungen

Die Summe der gemessenen Wellen-, Schwall- und Wellen-Schwallströmungen beträgt bei allen Druckstufen circa 140. Zum statistischen Vergleich der Übereinstimmung bei verschiedenen Drücken werden für die Meßpunkte dieser Strömungsformen die modifizierte Froude-Zahl nach Gl. 4-24 und der Martinelli-Parameter nach Gl. 4-22 berechnet und in Abb. 4-28 bis Abb. 4-32 in die Strömungsformenkarte eingezeichnet. In den Abbildungen sind die Meßpunkte für die Massenstromdichten von  $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  und  $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$  jeweils gekennzeichnet. Die richtig vorhergesagten Strömungsformen werden durch geschlossene Symbole und die falsch vorhergesagten Strömungsformen durch offene Symbole dargestellt.

Bei einem Druck von 2 bar (Abb. 4-28) beträgt die Übereinstimmung der Meßdaten mit der Strömungsformenkarte 49 %. Etwa die Hälfte der Meßpunkte liegen in falschen Bereichen. Insbesondere sind Wellen-Schwallströmungen im Wellenströmungsbereich und Schwallströmungen im Ringströmungsbereich zu finden. Für eine Massenstromdichte von  $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$  sind Überschneidungen von verschiedenen Strömungsformen zu beobachten. Für Wellenströmungen und Wellen-Schwallströmungen kommt es in mehreren Fällen zu gleichen Froude-Zahlen und Martinelli-Parametern, obwohl eine verschiedene Strömungsform vorliegt. Die Ursache ist der in Kapitel 4.3.3 beschriebene Einfluß der Wärmestromdichte. Die in dem Beispiel gezeigte Wellen-Schwallströmung in Abb. 4-23 und die Wellenströmung in Abb. 4-24 führen beide zu Martinelli-Parametern von  $X = 0.23$  und Froude-Zahlen von  $Fr^{0.5} = 0.8$ . Für die Erfassung dieses Einflusses der Wärmestromdichte auf die Strömungsformausbildung sind die hier verwendeten Kennzahlen somit unzureichend.

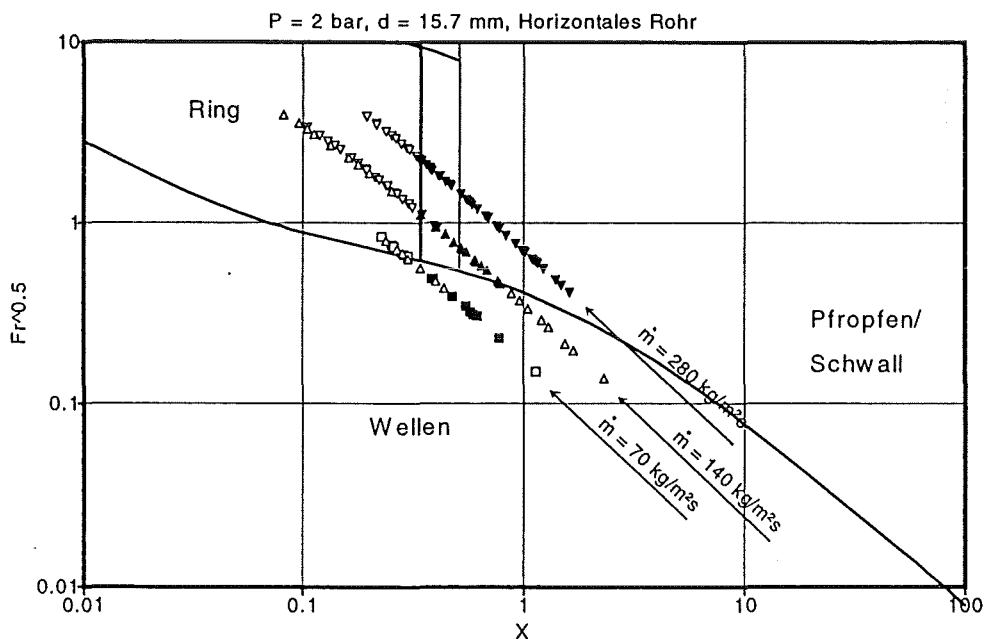


Abb. 4-28: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen (■), Schwallströmungen (▼) und Wellen-Schwallströmungen (▲) bei  $p = 2 \text{ bar}$

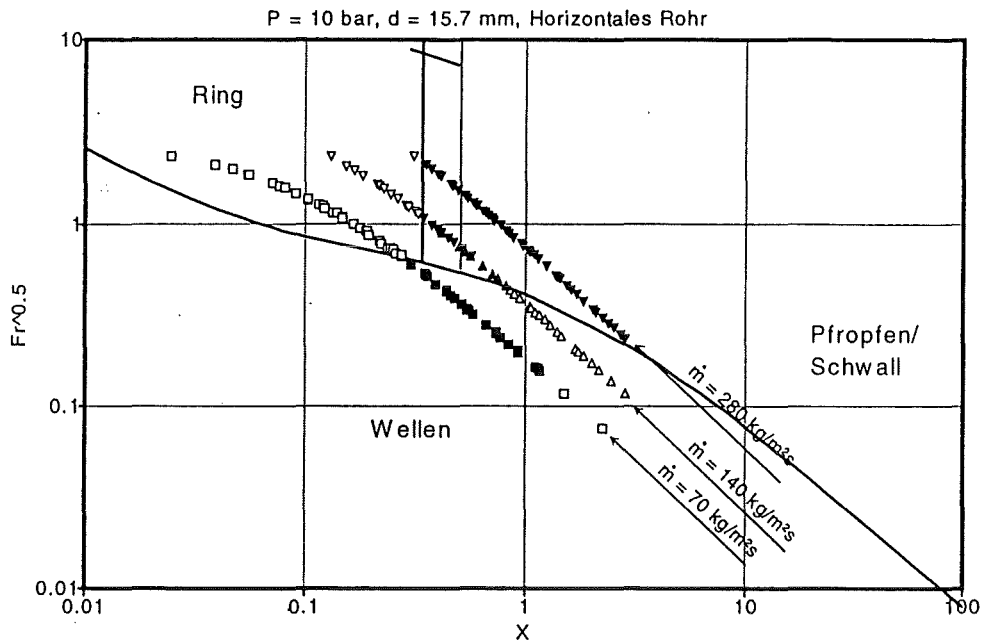


Abb. 4-29: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen (■), Schwallströmungen (▼) und Wellen-Schwallströmungen (▲) bei  $p = 10 \text{ bar}$

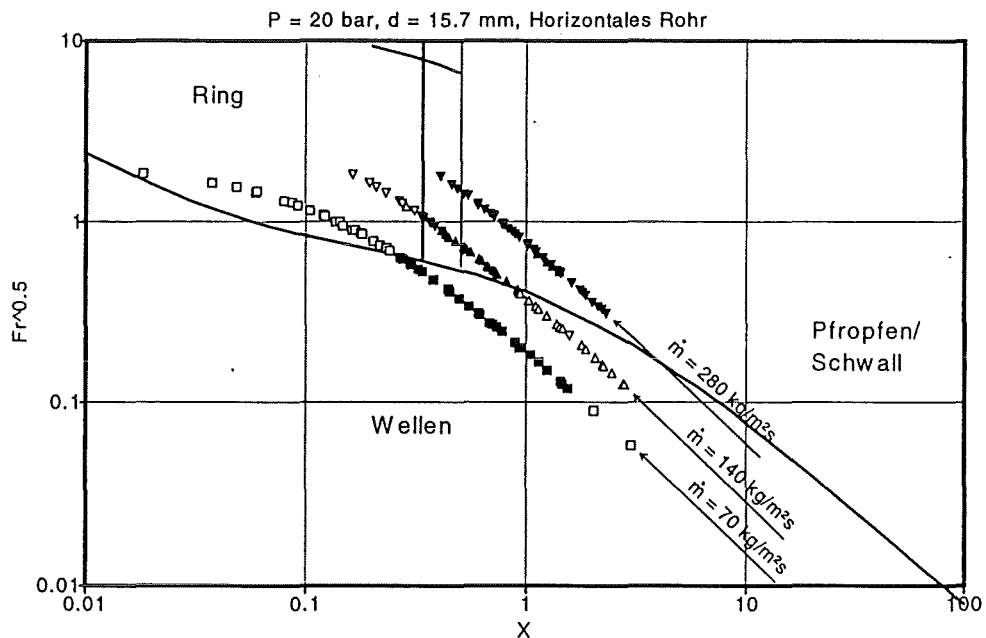


Abb. 4-30: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen (■), Schwallströmungen (▼) und Wellen-Schwallströmungen (▲) bei  $p = 20 \text{ bar}$

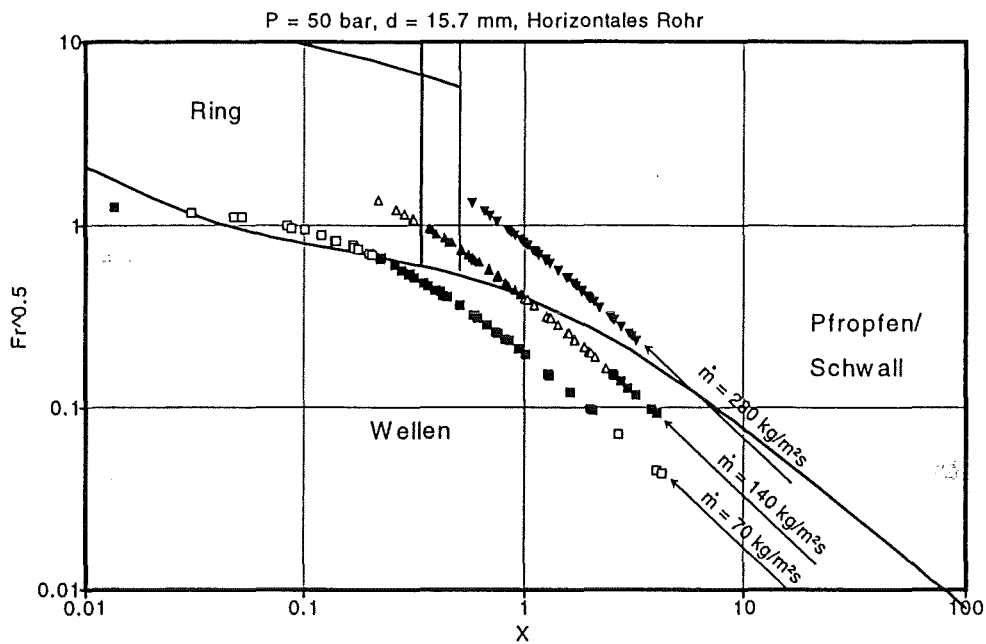


Abb. 4-31: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen (■), Schwallströmungen (▼) und Wellen-Schwallströmungen (▲) bei  $p = 50$  bar

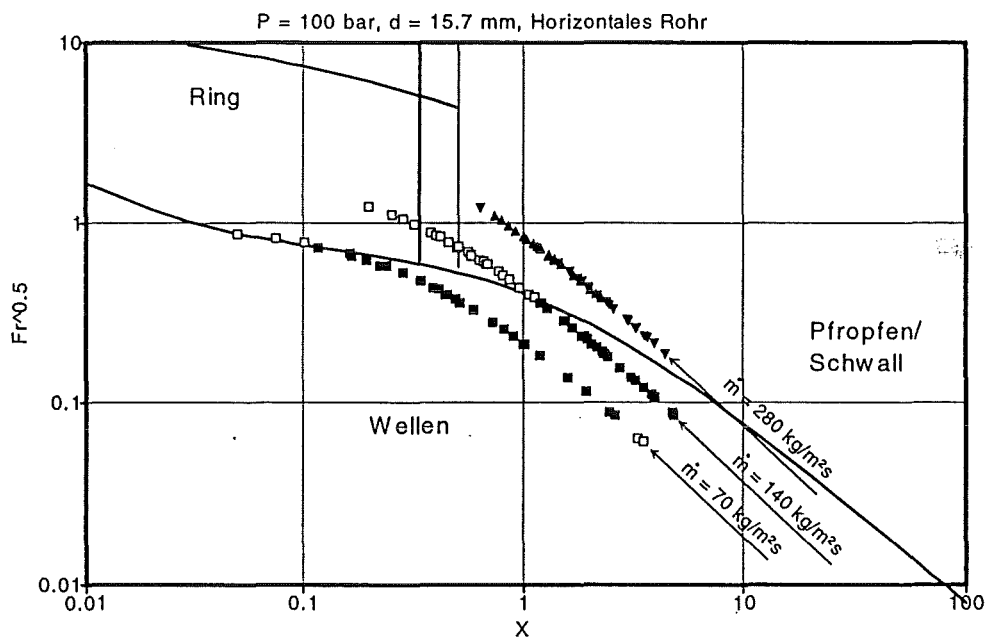


Abb. 4-32: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Wellenströmungen (■), Schwallströmungen (▼) und Wellen-Schwallströmungen (▲) bei  $p = 100$  bar

Die Schwallströmungen mit  $X < 0.34$ , die im Ringströmungsbereich der Karte liegen, zeigen geringe Tendenzen zu Ringströmungen. Da jedoch sehr deutliche Schwälle vorhanden sind, handelt es sich nach der in Kapitel 2.3.1 getroffenen Einteilung um Schwallströmungen. Insbesondere bei den niedrigen Druckstufen reichen die Meßpunkte für Schwallströmungen bis in den Ringströmungsbereich. Das der Strömungs-

formenkarte zugrundeliegende Modell für adiabate Strömungen beschreibt den Übergang von der Schwallströmung in die Ringströmung durch einen minimalen Flüssigkeitsinhalt im Rohr, der bei turbulenter Gas- und Flüssigkeitsströmung einem Martinelli-Parameter von  $X = 0.34$  entspricht. Dieses einfache Kriterium ist offensichtlich bei Verdampfungsvorgängen von Wasser bei niedrigen Drücken und hohen Dichteverhältnissen  $\rho_l / \rho_g$  (vergl. Tab. 4-1) unzureichend.

Eine Betrachtung der Statistik für die Übereinstimmung von Meßwerten mit der Strömungsformenkarte bei verschiedenen Drücken zeigt, daß mit steigendem Druck die Übereinstimmung stets zunimmt. Tab. 4-2 verdeutlicht, daß die Übereinstimmung von 49 % bei einem Druck von 2 bar auf 75 % bei einem Druck von 100 bar ansteigt. Die Meßpunkte liegen bei hohen Drücken in einem ähnlichen Bereich wie die Meßpunkte der Untersuchungen an Kältemitteln (Abb. 4-26).

Druck	2 bar	10 bar	20 bar	50 bar	100 bar
Übereinstimmung	49 %	57 %	61 %	73 %	75 %

Tab. 4-2: Übereinstimmung von Meßwerten mit der Strömungsformenkarte nach VDI-Wärmeatlas bei verschiedenen Drücken. Basis: 700 Meßwerte

Mit steigendem Druck nimmt das Dichteverhältnis zwischen flüssiger und dampfförmiger Phase  $\rho_l / \rho_g$  ab. Bei erhöhtem Druck erreicht dabei das Dichteverhältnis ähnliche Werte wie bei den Kältemitteln. Weiterhin nehmen die Oberflächenspannung und das Verhältnis der kinematischen Viskosität  $\nu_l / \nu_g$  von gesättigtem Wasser bei einem Druck von 100 bar ähnliche Werte an wie das Kältemittel R12 ( $T_s = -20^\circ\text{C}$ ). Bei ähnlichen Stoffgrößen wie bei den Kältemitteln, mit denen die Strömungsformenkarte verifiziert wurde, kommt es also zu einer besseren Vorhersage von Strömungsformen.

Anhand von Abb. 4-28 bis Abb. 4-32 wird der schon in Kapitel 4.3.1 beschriebene Druckeinfluß auf die Strömungsformausbildung deutlich. Bei der kleinsten Massenstromdichte ( $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) sind nur bei der niedrigsten Druckstufe von 2 bar Schwallströmungen vorhanden, wohingegen bei höheren Drücken nur Wellenströmungen vorhanden sind. Ab einem Druck von 50 bar sind auch für die mittlere Massenstromdichte ( $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) Wellenströmungen zu finden. Bei dem höchsten Druck von 100 bar sind für die mittlere Massenstromdichte keine Schwallströmungen mehr vorhanden.

#### 4.4.2 Blasen-, Pfropfen-, Schichten- und Ringströmungen

Im folgenden soll die Übereinstimmung der gemessenen Blasen-, Pfropfen-, Schichten-, und Ringströmungen mit der Strömungsformenkarte untersucht werden. In Abb. 4-33 bis Abb. 4-37 sind die Meßpunkte für verschiedene Drücke in der Strömungsformenkarte eingezeichnet.

Die linke Ordinate  $(\text{Re}_l \text{Fr}'_g)^{0.5}$  bezieht sich auf die Grenzkurve zwischen Schichten- und Wellenströmung. Die rechte Ordinate bezieht sich mit  $\text{Fr}_{\text{gm}}^{0.5}$  auf die Grenzkurve zwischen der Wellenströmung und der Schwall-, Pfropfen-, oder Ringströmung und die

Grenzkurve zwischen Ring- und Nebelströmung. Für die Grenzkurve zwischen der Blasenströmung und der Schwall- oder Pfropfenströmung gilt die rechte Ordinate mit  $(FrEu)_1^{0.5}$ . Diese Auftragungsart ist identisch zur Darstellung in Abb. 4-26.

Die Meßpunkte der Blasenströmungen wurden in Bezug auf die rechte Ordinate  $(FrEu)_1^{0.5}$  eingetragen. Anhand von Abb. 4-33 bis Abb. 4-37 ist zu sehen, daß die Blasenströmungen in allen Fällen für alle Drücke falsch vorhergesagt werden. In den meisten Fällen sagt die Strömungsformenkarte Wellenströmungen voraus. Das die Grenzkurve zum Übergang von der Blasen- zur Pfropfenströmung beschreibende Modell geht von einem Zusammenwachsen der Blasen zu Pfropfen aus, wenn die turbulente Kraft der Blasen quer zur Hauptströmungsrichtung größer als die Auftriebskraft wird. Bei Verdampfungsvorgängen kann ein Pfropfen neben dem Zusammenwachsen von verschiedenen Blasen durch das Wachstum einer Blase infolge von Wärmezufuhr entstehen, was in dem Modell nicht berücksichtigt wird.

Pfropfenströmungen wurden in Bezug auf die rechte Ordinate  $Fr_{gm}^{0.5}$  eingetragen. Es wurden in den Versuchen nur sehr wenig Pfropfenströmungen gemessen, so daß keine sichere Aussage über die Qualität der Strömungsformvorhersage getroffen werden kann. Die Meßpunkte liegen teilweise im Pfropfengebiet und teilweise im Wellengebiet, jedoch nahe der Grenzkurve zum Pfropfengebiet.

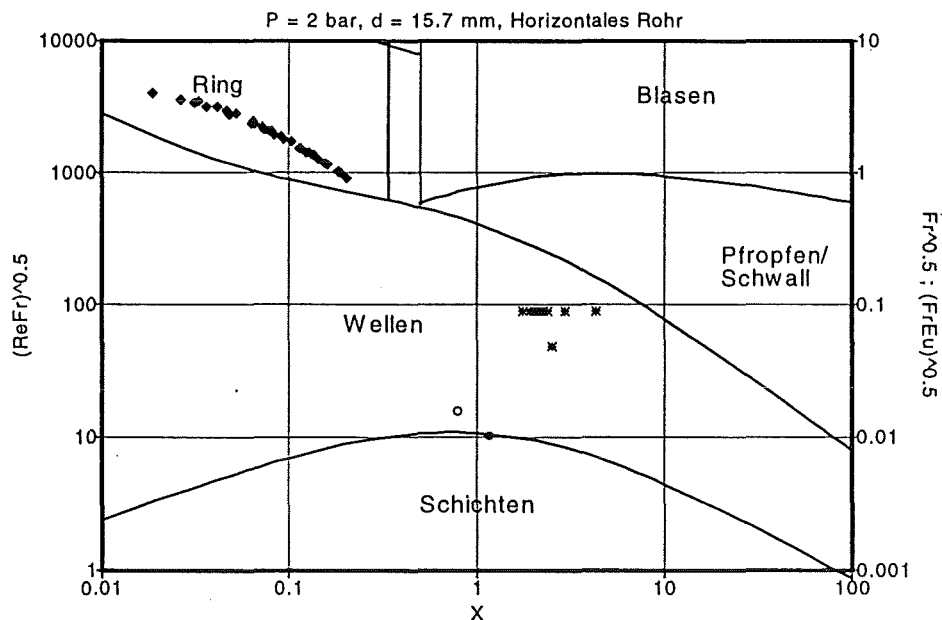


Abb. 4-33: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten- (●), Ring- (◆), Blasen- (\*) und Pfropfenströmungen (+) bei P = 2 bar

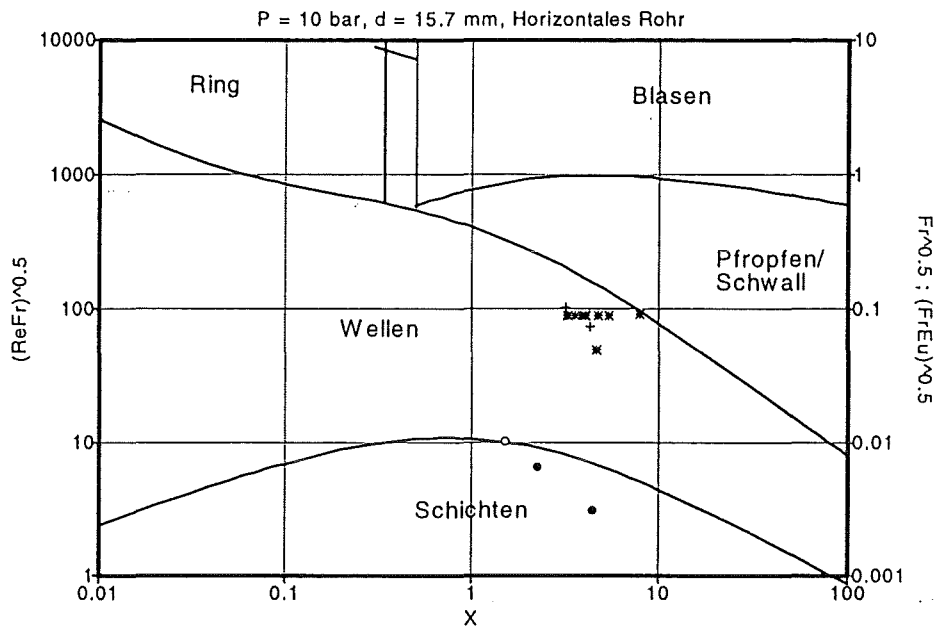


Abb. 4-34: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten- (●), Blasen- (\*) und Pfropfenströmungen (+) bei p = 10 bar

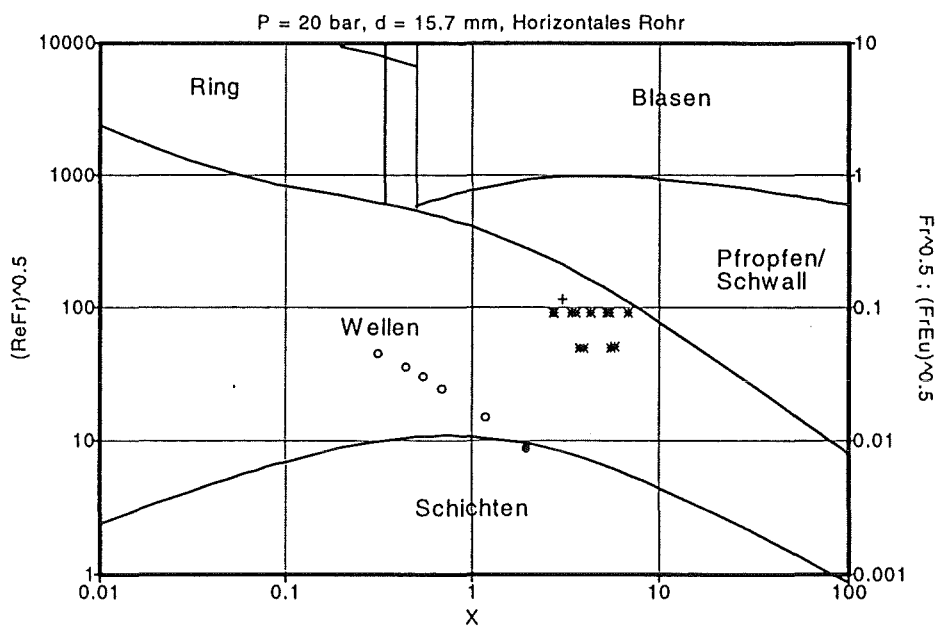


Abb. 4-35: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten- (●), Blasen- (\*) und Pfropfenströmungen (+) bei p = 20 bar



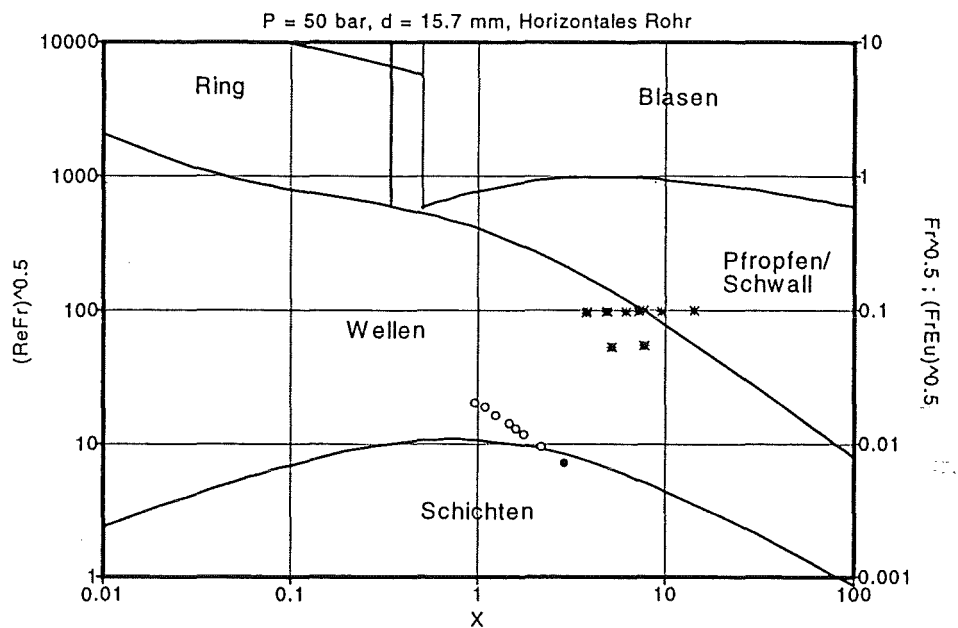


Abb. 4-36: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten- (●), Blasen- (\*) und Pfropfenströmungen (+) bei  $p = 50$  bar

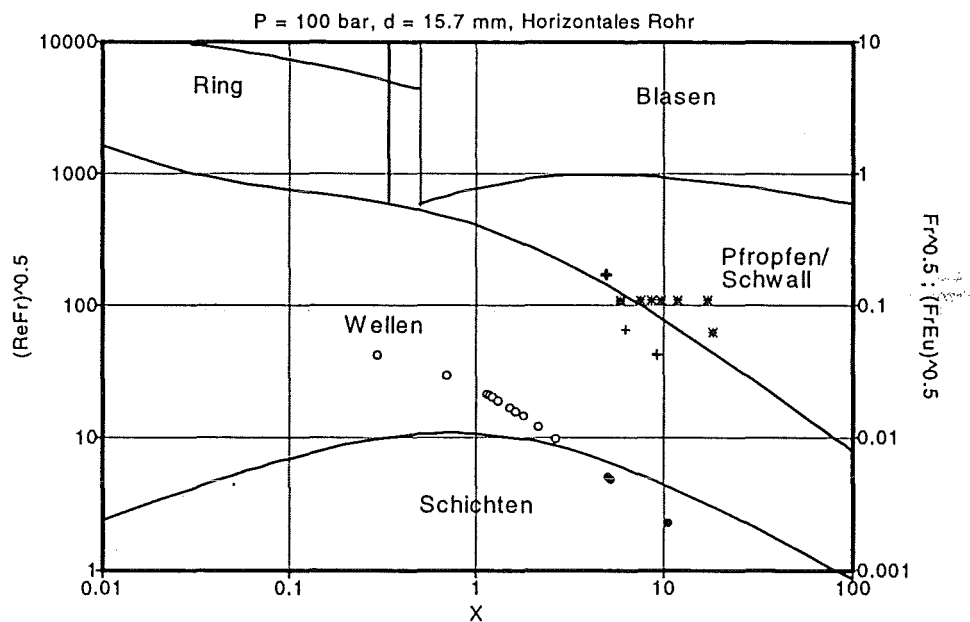


Abb. 4-37: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Meßpunkten von Schichten- (●), Blasen- (\*) und Pfropfenströmungen (+) bei  $p = 100$  bar

Die Meßpunkte der Ringströmungen wurden in Bezug auf die rechte Ordinate  $Fr_{gm}^{0.5}$  eingetragen. Ringströmungen wurden nur bei einem Druck von 2 bar gefunden. Die gemessenen Ringströmungen werden alle von der Strömungsformenkarte richtig vorhergesagt. Jedoch liegen die Meßpunkte der Schwall-, Wellen-Schwall- und Wellenströmungen in demselben Gebiet (vergl. Abb. 4-28).

Schichtenströmungen wurden in Bezug auf die linke Ordinate  $(Re_1 Fr_g')^{0.5}$  eingetragen, jedoch ist aufgrund der geringen Anzahl von Meßpunkten keine eindeutigen Aussage über die Qualität der Vorhersage möglich. Die Meßpunkte liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Meßpunkte der Kältemittel.

#### 4.4.3 Überprüfung der Wellen-Schwall-Grenzkurve

Nach dem statistischen Vergleich der Übereinstimmung von Meßwerten mit der Strömungsformenkarte für verschiedene Drücke in Kapitel 4.4.1 soll nun die Anwendbarkeit der Grenzkurve zwischen Wellen- und Schwallströmungen für die Verdampfung von Wasser in horizontalen Rohren detailliert untersucht werden. Hierzu werden verschiedene gemessene Übergänge zwischen Strömungsformen betrachtet.

Der Grenzkurve zur Beschreibung des Überganges von geschichteten zu schwallbehafteten Strömungen  $(Fr_{gm}^{0.5})_{Gr1}$  in Abb. 4-26 ist von besonderem technischen Interesse, da geschichtete Strömungsformen in Verdampferrohren wegen schlechter Wärmeübergangskoeffizienten und der Gefahr von Rohrwandüberhitzungen vermieden werden sollten.

In Abb. 4-38 wurde für die gemessenen Strömungsformen aller Meßpositionen bei einem Druck von 50 bar und einer Massendichte von  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  die Froude-Zahl nach Gl. 4-24 und der Martinelli-Parameter nach Gl. 4-22 berechnet und die Meßpunkte in die Strömungsformenkarte eingezeichnet. Variiert wurde für die Meßpunkte nur die Wärmestromdichte, so daß es bei den verschiedenen Meßpositionen zu verschiedenen Dampfmassengehalten kommt. Der Dampfmassengehalt  $\dot{x}$  steigt mit zunehmender Froude-Zahl und abnehmendem Martinelli-Parameter  $X$ .

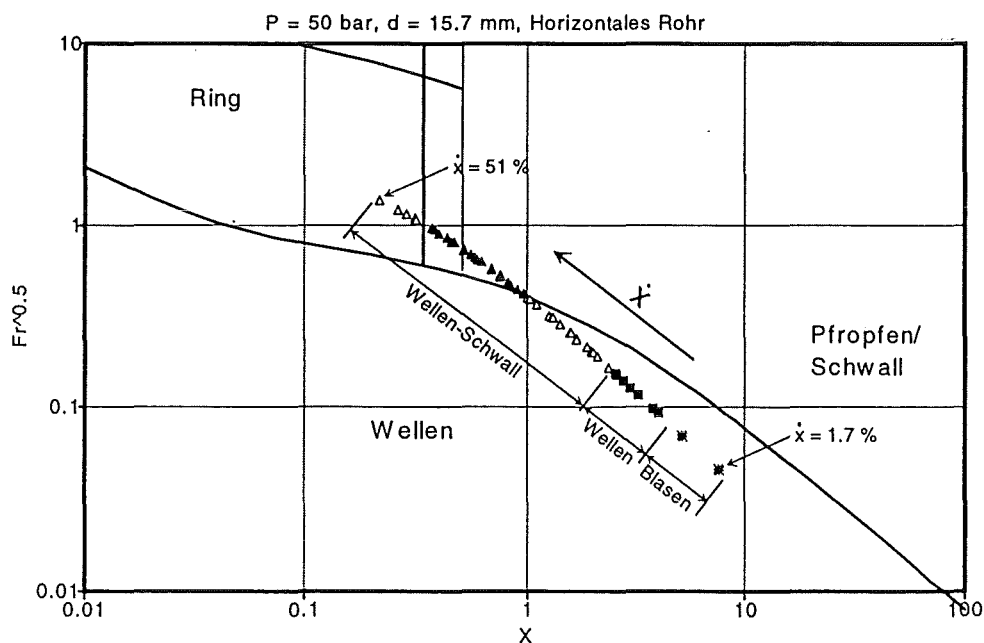


Abb. 4-38: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Strömungsformübergang bei  $P = 50 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Bei kleinen Dampfmassengehalten kommt es nach Abb. 4-38 zu einer Blasenströmung, die mit steigendem Dampfmassengehalt erst in eine Wellenströmung und bei weiter steigenden Dampfmassengehalten in eine Wellen-Schwallströmung übergeht. Die Übergänge der Strömungsformen bei verschiedenen Wärmestromdichten wurde in Kapitel 4,3.3 für den vorliegenden Fall anhand von Abb. 4-16 beschrieben. Aus Abb. 4-38 wird deutlich, daß der Übergang von der geschichteten zur schwallbehafteten Strömungsform von der Grenzkurve für zu hohe Froude-Zahlen beschrieben wird.

Das der Grenzkurve zugrundeliegende Modell geht von einer Schwallentstehung aus, wenn eine Welle einer zunächst geschichteten Strömung durch eine Beschleunigung der Gasphase durch den Bernoulli-Effekt anwächst. Für die flüssige Phase wird der hydrostatische Druck und die Oberflächenspannung der Phasengrenzfläche berücksichtigt, die Gasphase wird durch die inkompressible Bernoulli-Gleichung ohne hydrostatischen Anteil beschrieben. In dem in Abb. 4-16 und Abb. 4-38 dargestellten Beispiel kommt es auch zu einem Übergang von einer zunächst geschichteten zu einer schwallbehafteten Strömungsform. Jedoch wird dieser Übergang von dem Modell für zu hohe Froude-Zahlen beschrieben.

In Abb. 4-39 wird anhand eines anderen Strömungsformüberganges dargestellt, daß bei kleinen Dampfmassengehalten eine Blasenströmung vorhanden ist, die bei steigendem Dampfmassengehalt erst in eine Pfropfenströmung und bei weiter steigendem Dampfmassengehalt in eine Wellenströmung übergeht. Die Wellenströmung bleibt bis zu hohen Dampfmassengehalten erhalten. Es wird anhand des Verlaufes der Grenzkurve deutlich, daß das Modell den Übergang zu einer Schwallströmung für zu niedrige Froude-Zahlen beschreibt. Auch für diesen Fall wird also der Übergang zur Schwallströmung vom Modell nicht richtig beschrieben.

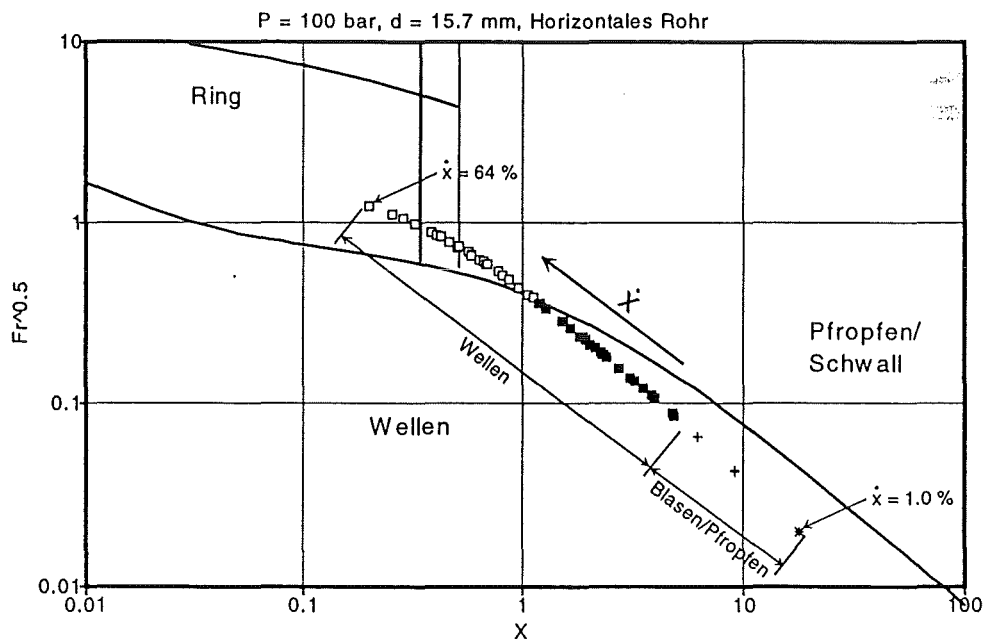


Abb. 4-39: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Strömungsformübergang bei  $P = 100 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Eine andere Art von Strömungsformübergang ist in Abb. 4-40 zu sehen. Aus einer Blasenströmung bei niedrigen Dampfmassengehalten entsteht unmittelbar eine Wellen-Schwall- bzw. Schwallströmung mit steigenden Dampfmassengehalten. Der Übergang zur Schwallströmung wird vom Modell für zu hohe Froude-Zahlen beschrieben.

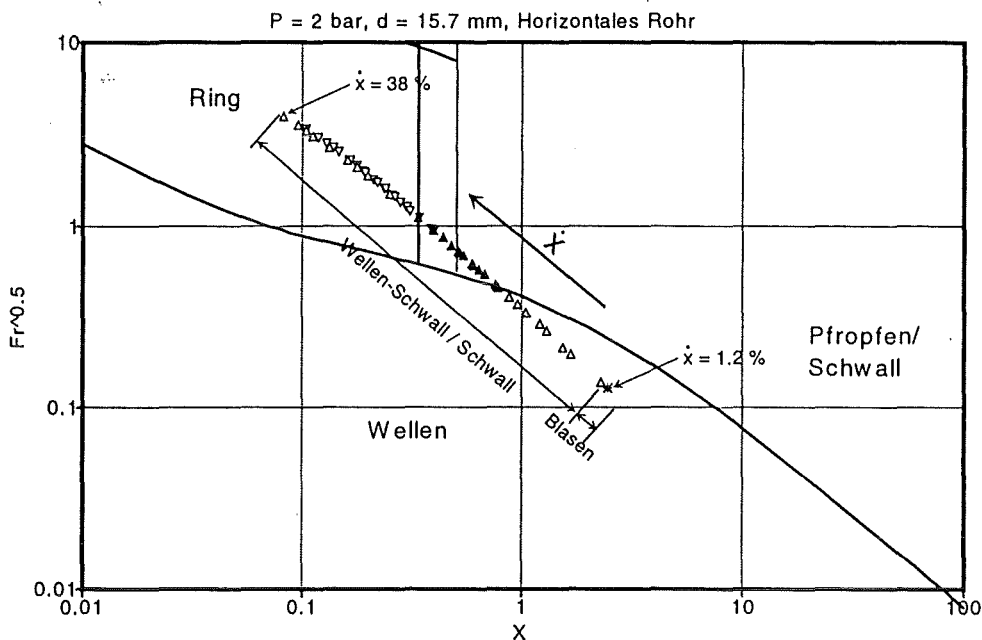


Abb. 4-40: Strömungsformenkarte nach Steiner (VDI-Wärmeatlas) mit Strömungsformübergang bei  $P = 2 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Bei Verdampfungsvorgängen können Schwälle neben den im Modell beschriebenen Einflüssen durch stromaufwärts liegende Vorgänge entstehen. In experimentellen Untersuchungen von Zweiphasenthermosiphonanlagen [73] wurde beobachtet, wie Schwälle aus expandierenden Dampfblasen entstehen. In diesem Fall ist die Strömungsform von der Vorgeschichte der Strömung abhängig, die im Modell nicht berücksichtigt wird. Es wäre durch weitere experimentelle Untersuchungen in beheizten Glasrohren zu klären, ob die in Thermosiphonanlagen beobachtete Schwallentstehung auch in Verdampferrohren mit Zwangsumlauf auftritt.

Aus dem Vergleich der beschriebenen drei Arten von Strömungsformübergängen mit der Grenzkurve kann gefolgert werden, daß die aus dem Modell abgeleitete Grenzkurve zur Beschreibung des Überganges zwischen geschichteten und schwallbehafteten Strömungsformen für die hier untersuchten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen nicht anwendbar ist. Eine Modifikation des Modells durch eine Änderung von Koeffizienten zur Verschiebung der Grenzkurve würde keine Verbesserung bewirken, da die Grenzkurve für einen Fall bei zu hohen Froude-Zahlen (Abb. 4-38) und für einen anderen Fall bei zu niedrigen Froude-Zahlen (Abb. 4-39) verläuft.

#### 4.5 Empirische Strömungsformenkarte

Im letzten Kapitel konnte gezeigt werden, daß das physikalische Modell zur Beschreibung des Überganges zwischen geschichteten und schwallbehafteten Strömungsformen keine gute Übereinstimmung mit Meßdaten von nicht-adiabaten Dampf/Wasser-

Zweiphasenströmungen liefert. Da die physikalischen Ursachen für die Entstehung und Ausbreitung von Schwällen durch den Verdampfungsprozeß zum heutigen Zeitpunkt nicht eindeutig geklärt sind, wird hier versucht, eine empirische Strömungsformenkarte zu erzeugen.

Das Ziel soll eine Strömungsformenkarte sein, welche die gemessenen Übergänge zwischen den Strömungsformen für alle Druckstufen mit daraus resultierenden verschiedenen Stoffwerten erfassen kann. Die Achsen der empirischen Strömungsformenkarte sollen dabei so gewählt werden, daß Meßpunkte verschiedener Strömungsformen in eindeutig verschiedenen Bereichen der Karte liegen. Durch eine hohe Zahl von Meßpunkten können dann empirische Grenzkurven erzeugt werden. Auf der Basis von ca. 800 gemessenen Strömungsformen werden im folgenden verschiedene, in der Literatur übliche Auftragungsarten auf ihre Eignung für eine empirische Strömungsformenkarte überprüft. Ringströmungen wurden ausschließlich im Parameterbereich  $p = 2$  bar,  $\dot{m} = 70 \text{ kg/m}^2\text{s}$  gemessen (vergl. Kapitel 4.4.2). Da die wenigen Meßpunkte zur Herleitung von empirischen Grenzkurven für Ringströmungen nicht ausreichend sind, wird der o. g. Parameterbereich in den folgenden Abbildungen nicht dargestellt.

Zunächst soll die in der Strömungsformenkarte des VDI-Wärmeatlas [8] verwendeten Kennzahlen, die Froude-Zahl nach Gl. 4-24 und der Martinelli-Parameter nach Gl. 4-22, untersucht werden.

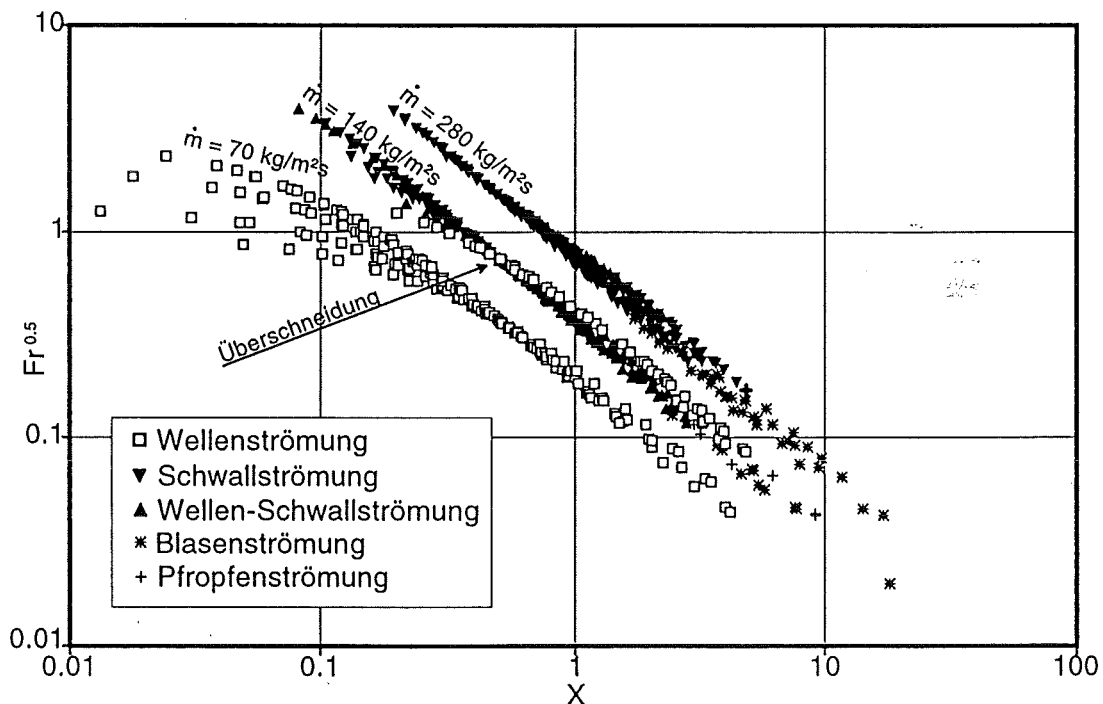


Abb. 4-41: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit einer Froude-Zahl und des Martinelli-Parameter

Abb. 4-41 zeigt die Meßpunkte in Abhängigkeit der dimensionslosen Kennzahlen. Es ist zu erkennen, daß Meßpunkten von verschiedenen Strömungsformen nicht in allen Fällen in verschiedenen Bereichen liegen. Die sich überschneidenden Meßpunkte betreffen Strömungen bei verschiedenen Drücken. Für die Massendichte von  $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$  kommt es zu Überschneidungen zwischen Meßpunkten von Blasenströmungen

und Schwallströmungen. Bei der mittleren Massenstromdichte von  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  überschneiden sich Meßpunkte von Wellenströmungen und Schwallströmungen. In Abb. 4-42 und Abb. 4-43 sind die optischen Signale für die sich überschneidenden Meßpunkte (Pfeil in Abb. 4-41) dargestellt. In beiden Fällen, für die Schwallströmung bei einem Druck von 10 bar sowie für die Wellenströmung bei einem Druck von 100 bar, ergeben sich die Kennzahlen  $Fr^{0.5} = 0.73$  und  $X = 0.51$ . Da es trotz verschiedener Strömungsformen zu gleichen Werten für die Kennzahlen kommt, ist diese Auftragsart für die zu erstellende empirische Strömungsformenkarte nicht geeignet.

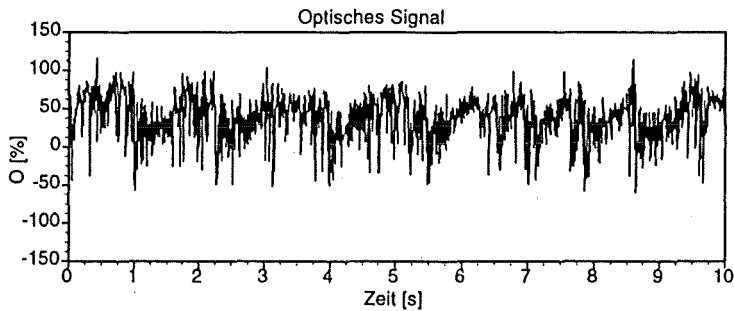


Abb. 4-42: Optisches Signal für eine Schwallströmung bei  $p = 10 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .  
Kennzahlen:  $Fr^{0.5} = 0.73$ ,  $X = 0.51$

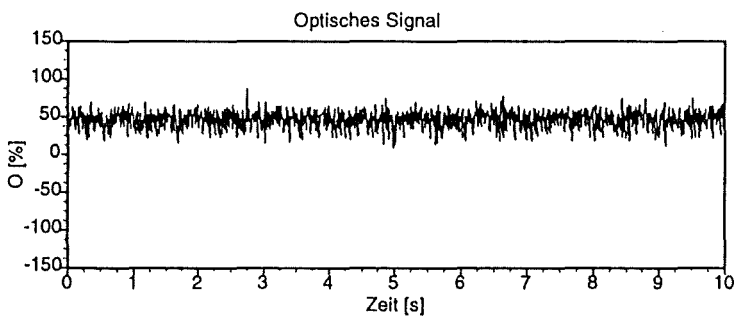


Abb. 4-43: Optisches Signal für eine Wellenströmung bei  $p = 100 \text{ bar}$ ,  $\dot{m} = 140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .  
Kennzahlen:  $Fr^{0.5} = 0.73$ ,  $X = 0.51$

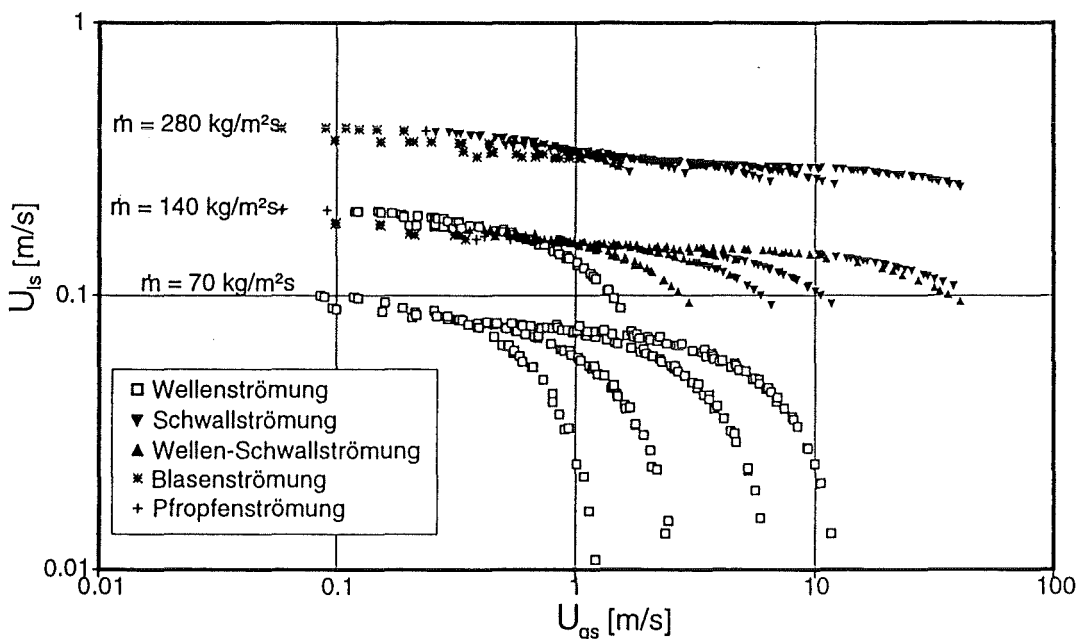


Abb. 4-44: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit der Leerrohrgeschwindigkeiten

In der Literatur werden häufig die Leerrohrgeschwindigkeiten  $u_{ls}$  (Gl. 4-2) und  $u_{gs}$  (Gl. 4-1) als Achsparameter verwendet (z.B. [74,75]). In Abb. 4-44 sind die Meßpunkte in einem Diagramm mit derartigen Achsen für die untersuchten Massenstromdichten, Drücke und Wärmestromdichten abgebildet. Es kommt wie zuvor zu Überschneidungen von Meßpunkten aufgrund des Druckeinflusses. Bei der mittleren Massenstromdichte von  $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$  sind Überschneidungen zwischen Meßpunkten von Wellen-Schwallströmungen und Wellenströmungen sowie Überschneidungen zwischen Meßpunkten von Wellen-Schwallströmungen und Pfropfenströmungen vorhanden. Für die hohe Massenstromdichte von  $280 \text{ kg/m}^2\text{s}$  sind Überschneidungen zwischen Meßpunkten von Schwallströmungen und Blasenströmungen zu erkennen. Da verschiedene Strömungsformen zu den selben Werten von  $u_{ls}$  und  $u_{gs}$  führen können, ist diese Auftragsart für die zu erstellende empirische Strömungsformenkarte nicht geeignet.

Hewitt und Roberts. [76] stellten eine Strömungsformenkarte für vertikale Rohrströmungen vor. Auf der Ordinate wird die spezifische kinetische Energie der Gasphase und auf der Abszisse die der flüssigen Phase aufgetragen. Die Strömungsformenkarte wurde mit Meßdaten aus Luft/Wasser- und Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen verifiziert. Die Autoren zeigten, daß die Karte für verschiedene Drücke, die zu verschiedenen Stoffwerten führen, gültig ist. Es soll hier untersucht werden, ob diese Auftragsart auch für horizontale Zweiphasenströmungen mit verschiedenen Stoffwerten anwendbar ist. In Abb. 4-45 sind die Meßpunkte für die hier untersuchten Massenstromdichten, Drücke und Wärmestromdichten abgebildet. Es sind Überschneidungen von Meßpunkten verschiedener Strömungsformen in gleicher Art wie bei der Auftragung in Abhängigkeit der Leerrohrgeschwindigkeiten vorhanden, so daß auch diese Auftragungsart als nicht geeignet für die gewünscht Strömungsformenkarte erscheint.

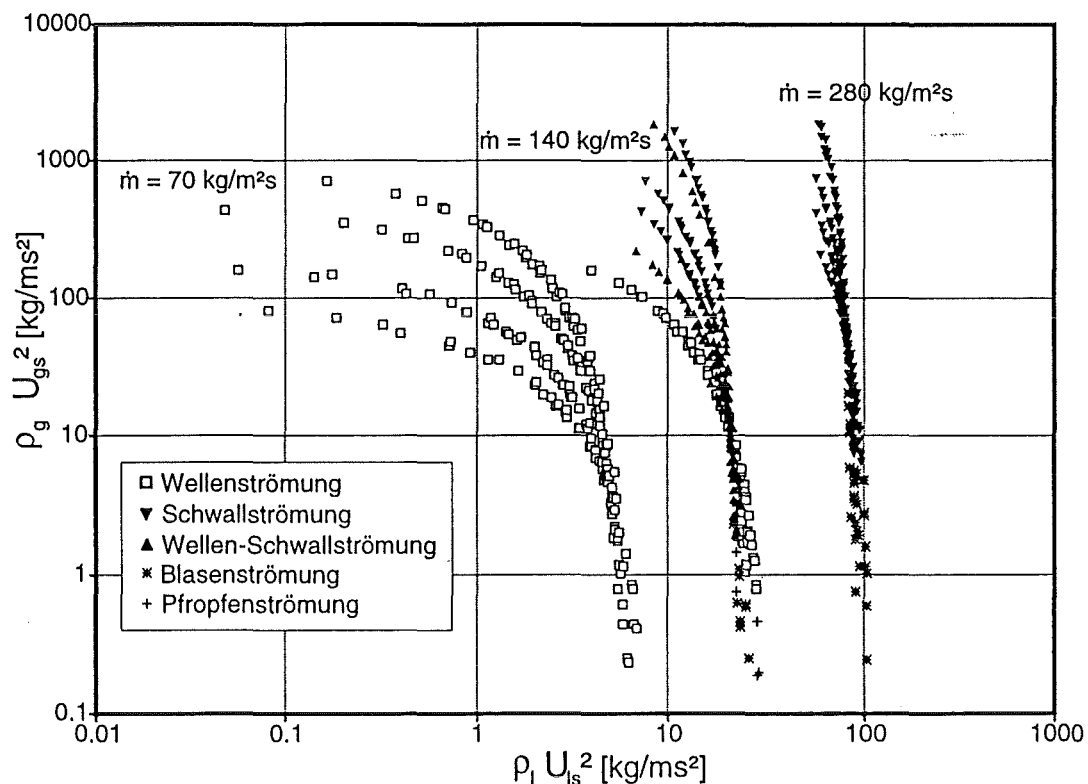


Abb. 4-45: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit der spezifischen kinetischen Energien nach Hewitt und Roberts [76]

M. Müller [12] verwendet zur Darstellung seiner Meßdaten die dimensionslosen Wallis-Parameter, die gegenüber der Auftragung der Leerrohrgeschwindigkeiten den Vorteil haben, Stoffwerte ( $\rho_g$  und  $\rho_l$ ) und den Rohrdurchmesser zu berücksichtigen. Für das horizontale Rohr werden die Wallis-Parameter definiert durch:

$$j_g = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} \sqrt{\frac{1}{d \cdot g}} u_{gs} \quad \text{Gl. 4-29}$$

$$j_l = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g}} \sqrt{\frac{1}{d \cdot g}} u_{ls} \quad \text{Gl. 4-30}$$

In Abb. 4-46 sind wiederum die Meßpunkte für die untersuchten Massenstromdichten, Drücke und Wärmestromdichten abgebildet. Wie bei den vorher diskutierten Auftragsarten sind Überschneidungen von Meßpunkten mit verschiedenen Strömungsformen vorhanden, so daß auch diese Auftragsart für die zu erstellende empirische Strömungsformenkarte nicht geeignet ist.

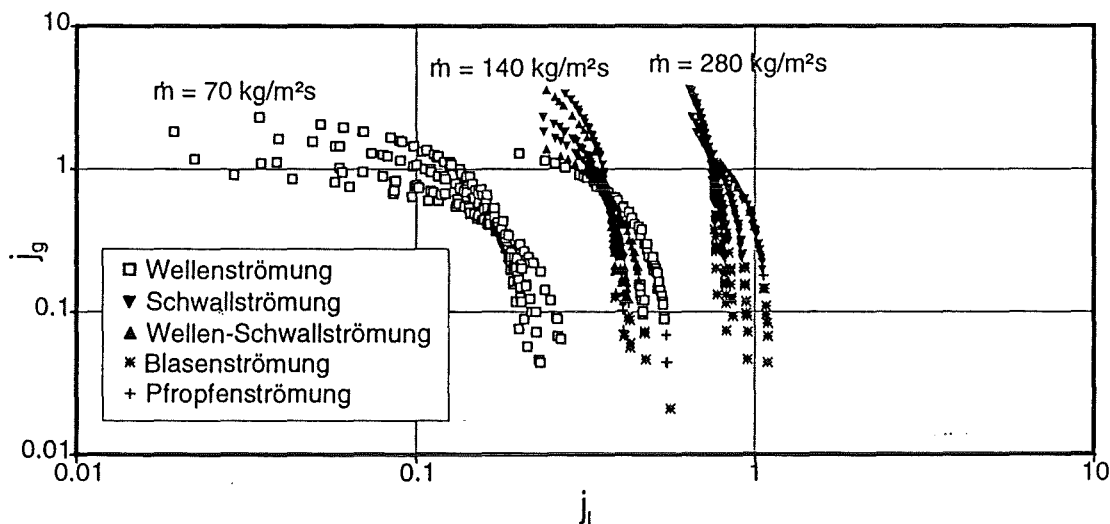


Abb. 4-46: Gemessene Strömungsformen in Abhängigkeit der Wallis-Parameter

Alle untersuchten Auftragsarten in Abb. 4-41, Abb. 4-44, Abb. 4-45 und Abb. 4-46 zeigen Überschneidungen zwischen Meßpunkten verschiedener Strömungsformen aufgrund des Druckeinflusses. Bei einigen der verwendeten Achsparametern werden Stoffwerte ( $\rho_g$  und  $\rho_l$ ) berücksichtigt, die jedoch keine Verbesserung in Bezug auf eine eindeutige Zuordnung von verschiedenen Strömungsformen in der Karte bewirken.

Mit folgenden Kennzahlen wurde eine Strömungsformenkarte erzeugt, die eine eindeutige Zuordnung ermöglicht:

Die Meßdaten werden in Abhängigkeit einer modifizierten Froude-Zahl

$$Fr_m = \frac{U_{gs}^2}{d g} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,95} \quad \text{Gl. 4-31}$$



und eines Eigenschaftsparameters

$$\kappa = \left( \frac{1 - \dot{x}}{\dot{x}} \right) \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.25} \quad \text{Gl. 4-32}$$

dargestellt. Die Achsparameter wurden so gewählt und der Exponent des Dichteverhältnisses  $\rho_g/\rho_l$  so angepaßt, daß es für die Wellen- und Schwallströmungen sowie auch für die Blasen/Pfropfenströmungen zu eindeutigen Zuordnungen in der Karte kommt. In Abb. 4-47 sind die Meßpunkte für die untersuchten Massenstromdichten, Drücke und Wärmestromdichten aufgetragen. Die Meßpunkte verschiedener Strömungsformen liegen nun in verschiedenen Bereichen, so daß es nicht mehr zu den vorher beschriebenen Überschneidungen von Meßpunkten kommt. Es ergeben sich drei Strömungsformenbereiche, ein Wellenströmungsbereich, ein Schwallströmungsbereich und ein Blasen/Pfropfenströmungsbereich.

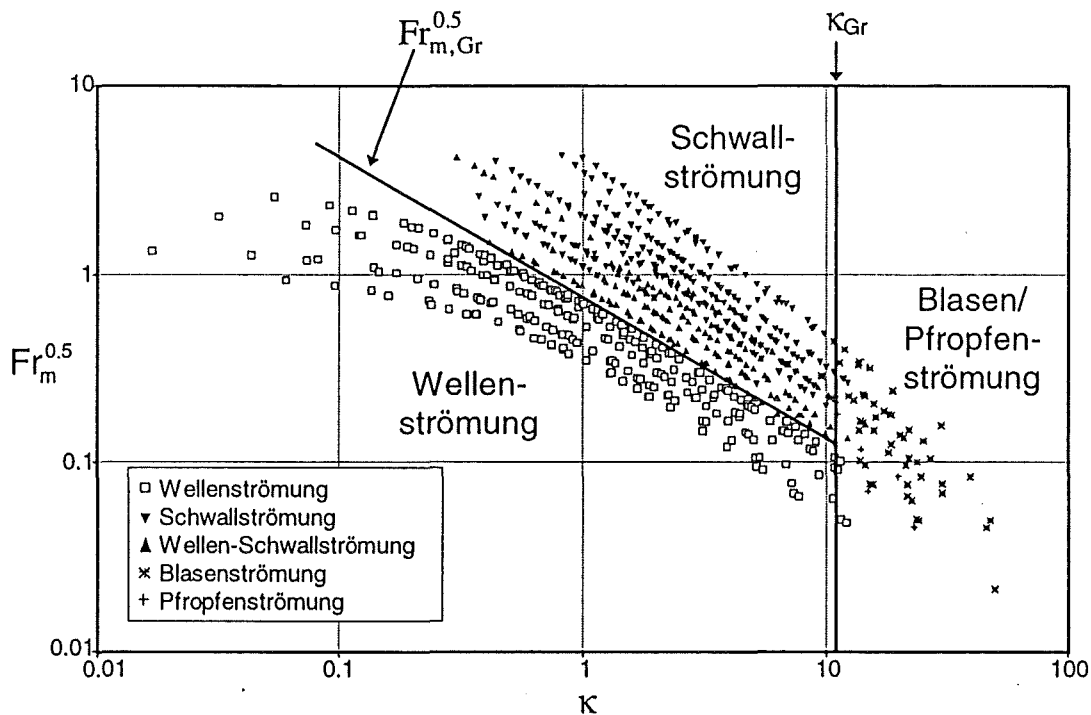


Abb. 4-47: Empirische Strömungsformenkarte mit 800 Meßpunkten in Abhängigkeit einer modifizierten Froude-Zahl und eines Eigenschaftsparameters

Zwischen dem Wellen- und dem Schwallströmungsbereich wird durch eine empirische Kurve unterschieden, die durch den Ausdruck

$$Fr_{m,Gr}^{0.5} = 0.75 \kappa^{-0.75} \quad \text{Gl. 4-33}$$

beschrieben wird.

Für die Beschreibung des Überganges zwischen Blasen- und Pfropfenströmungen zu Wellen- oder Schwallströmungen wird eine senkrechte Grenzlinie vorgeschlagen. Die Zusammenfassung von Blasen- und Pfropfenströmungen erscheint technisch sinnvoll, da sich Pfropfen stets aus Blasen entwickeln und diese in Strömungsrichtung unmittel-

bar hintereinander auftreten. Häufig treten Blasen und Pfropfen gemeinsam auf. Durch eine Analyse der Meßdaten zeigte sich, daß Blasen- und Pfropfenströmungen nur bis zu einem maximalen Dampfmassengehalt von 4 % existieren können. Die vertikale Grenzlinie

$$\kappa_{Gr} = 11$$

Gl. 4-34

beschreibt die Grenze, bis zu der Blasen- oder Pfropfenströmungen vorkommen.

Durch die empirische Strömungsformenkarte können nun sämtliche Übergänge zwischen den Strömungsformen für die 800 untersuchten Meßpunkte beschrieben werden.

## 5 Schlußfolgerungen und Ausblick

### 5.1 Schlußfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein optisches Meßsystem zur nahezu rückwirkungs-freien Identifizierung von Strömungsformen in horizontalen und geneigten Rohren entwickelt, das in Rohren mit Durchmessern von 13 mm bis 90 mm getestet wurde. Es wurde gezeigt, daß die bei Verdampfungsvorgängen relevanten Strömungsformen eindeutig bestimmt werden können und die Meßaufgabe bei der gleichzeitigen thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchung beim Einsatz in Verdampfer-rohren bei Drücken bis 130 bar und Rohrwandtemperaturen bis 400 °C aufrecht erhalten werden kann. Die mehrfache Anordnung des Meßsystems in Strömungsrichtung konnte durch die geringen Kosten dieses Systems ermöglicht werden.

Durch eine rechnergestützte Signalmustererkennung wurde die bisher durch den Menschen vorgenommene Signalmusterinterpretation automatisiert. Die Anwendung einer Methode aus der Fuzzy-Logik auf verschiedene Merkmale der Meßsignale ermöglichte eine Klassifizierung und eine Erfassung von Übergängen zwischen Strömungsformen. Die Trefferquote für richtig erkannte Signalmuster lag für reine Strömungsformen bei 99 % und für Übergangsbereiche bei 80 %, wobei durch eine Einteilung in verschiedenen Kategorien der Benutzer auf unsicher erkannte Strömungs-formen aufmerksam gemacht wird. Durch das Meßsystem mit rechnergestützter Signalmustererkennung ist somit eine Ausgabe der Strömungsform durch den Rechner möglich. Innerhalb der Meßserie wurden subjektiv abweichende Beurteilungen ausgeschaltet. Die Grenze des Verfahrens wurde bei Ringströmungen festgestellt, die eine unsymmetrische Struktur der Phasengrenzfläche bezüglich der Rohrachse haben. Die Ringströmungen können jedoch durch Hinzunehmen von Wandtemperaturmes-sungen erkannt werden.

Ein neu entwickelter Versuchsstand ermöglichte experimentelle Untersuchungen von Strömungsformen während der Verdampfung von Wasser in einem metallischen Rohr bei verschiedenen Massenstromdichten, Wärmestromdichten, Neigungswinkeln und Drücken bis 100 bar. Durch konstruktive Maßnahmen konnte der in der Literatur beschriebene Einfluß von peripheren Komponenten auf den Strömungsvorgang minimiert werden, so daß die untersuchte Zweiphasenströmung nur von Parametern an der Meßstrecke abhängig ist. Die Integration des optischen Meßsystems an 12 Stellen in Strömungsrichtung erlaubte die simultane Bestimmung der Strömungsformen während des Verdampfungsvorganges. Auf diese Weise war es möglich, einen Überblick über die Strömungszustände im Verdampferrohr von kleinen Dampfmassengehalten bis zur vollständigen Verdampfung zu erhalten und dynamische Vorgänge sichtbar zu machen.

Die Untersuchung des bisher ungeklärten Neigungswinkeleinflusses auf die Strömungs-form bei der nicht-adiabaten Zweiphasenströmung zeigte zwei Fälle mit unterschiedlichem Einfluß auf die Strömungsform. Der erste Fall betrifft Strömungen, bei denen im horizontalen Fall eine Schichten- oder Wellenströmung vorhanden ist. Es wurde ein Grenzwinkel für einen Übergang der geschichteten Strömungsform in eine schwall-behaftete Strömungsform gefunden, der unabhängig vom Druck zwischen 0.1° und 0.4° liegt. Einen Einfluß der Wärmestromdichte auf den Grenzwinkel wurde nicht gefunden.

Bei adiabaten Luft/Wasser-Strömungen wurden ebenfalls Grenzwinkel beobachtet, die deutlich unter  $1^\circ$  liegen [70]. Es kann somit von einem wärmestomunabhängigen Neigungswinkeleinfluß ausgegangen werden. Die Schwälle führen zu einer besseren Benetzung der oberen Rohrwand und somit zu einer Verringerung der Temperaturdifferenzen am Rohrumfang. Durch eine leichte Neigung des Rohres kann somit eine geschichtete Strömungsform vermieden und der Wärmeübergangskoeffizient gesteigert bzw. kritische Rohrwandüberhitzungen vermieden werden. Eine weitere Erhöhung des Neigungswinkels führt zu keiner qualitativen Änderung der Strömungsform, jedoch steigen die Schwallfrequenzen, wodurch die Rohrwand noch besser gekühlt wird und der Wärmeübergangskoeffizient weiter gesteigert werden kann. Der zweite Fall betrifft Strömungen, in denen im horizontalen Fall eine Wellen-Schwall-, Schwall- oder Ringströmung vorherrscht. Bei einer Neigung des Rohres ändert sich die Strömungsform nicht, jedoch steigen bei Strömungsformen mit Schwallanteilen die Schwallfrequenzen bei Erhöhung des Neigungswinkels.

Durch die Analyse von Strömungsformen im horizontalen Rohr bei verschiedenen Drücken, sonst aber gleichen Parametern, stellte sich heraus, daß mit steigendem Druck die Schwallanteile in der Strömung abnehmen. Es gibt Parameterbereiche bei hohen Drücken, in denen keine Schwallströmungen mehr auftreten. Es wurde dabei kein Einfluß der Wärmestromdichte festgestellt. In Untersuchungen von adiabaten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen anderer Autoren [15,18] wurde ebenfalls beobachtet, daß mit steigendem Druck die Neigung zu Schwallströmungen abnimmt, so daß von einem Druckeinfluß auf die Schwallbildung ausgegangen werden kann, der nicht an die Wärmezufuhr gekoppelt ist.

Die Untersuchung des Einflusses der Massenstromdichte auf die Ausbildung von Strömungsformen im horizontalen Rohr zeigte ähnliche Ergebnisse wie bei nicht-adiabaten Versuchen an Kältemitteln. Mit steigenden Massenstromdichten steigen bei gleichem Dampfmassegehalt oder gleicher Gas-Leerrohrgeschwindigkeit die Schwallanteile in der Strömung. Dieser Einfluß ist nicht druckabhängig.

Eine Analyse des bisher nicht systematisch untersuchten Einflusses der Wärmezufuhr auf die Strömungsformausbildung durch Vergleiche von 330 gemessenen Strömungsformen bei verschiedenen Wärmestromdichten und sonst gleichen Parametern machte deutlich, daß in der Mehrzahl der Fälle die Strömungsformenbereiche sich entsprechend ihrer Dampfmassegehalte bzw. Leerrohrgeschwindigkeiten in Strömungsrichtung verschieben. Betrachtet bei gleichen Dampfmassegehalten oder Leerrohrgeschwindigkeiten ist somit der Einfluß der Wärmezufuhr auf die Änderung von Strömungsformen gering. Jedoch wurde in einem kleinen Parameterbereich eine Unterdrückung von Schwällen durch steigende Wärmestromdichten beobachtet. Bei Untersuchungen zur Kältemittelverdampfung [5] wurden ähnliche Tendenzen festgestellt, die jedoch im Vergleich zu den hier untersuchten Dampf/Wasser-Strömungen in anderen Parameterbereichen liegen.

Ein Vergleich der meßtechnisch bestimmten Strömungsformen mit der Strömungsformenkarte des VDI-Wärmeatlas, die für Kältemittel erfolgreich eingesetzt wird, zeigte eine nur teilweise Übereinstimmung. Ein Vergleich von 700 gemessenen Strömungsformen mit der Karte machte deutlich, daß die Übereinstimmung für hohe Drücke zunimmt, wo das Dampf/Wasser-Gemisch ähnliche Stoffwerte annimmt wie die

Kältemittel, für die die Strömungsformenkarte verifiziert wurde. In einem kleinen Parameterbereich ergaben sich wegen des Wärmestromeinflusses gleiche Kennzahlen bei unterschiedlichen Strömungsformen. Die bisher verwendeten Kennzahlen sind also zur Erfassung dieses Einflusses ungeeignet bzw. unvollständig.

Durch die Analyse von verschiedenen Arten von Strömungsformübergängen konnte gezeigt werden, daß das Modell zur Beschreibung des Überganges von Wellen- zu Schwallströmungen nicht anwendbar ist. Sowohl der durch die Untersuchungen beobachtete Übergang von einer Wellen- zu einer Wellen-Schwallströmung als auch ein direkter Übergang von einer Blasen- zu einer Wellen-Schwallströmung wird durch das Modell nicht richtig beschrieben. Die gemessenen Blasenströmungen wurden in allen Fällen falsch vorhergesagt, so daß von einem für Verdampfungsvorgänge nicht anwendbaren Modell ausgegangen werden kann. Es konnte somit aufgezeigt werden, daß die Modelle bzw. Grenzkurven der Strömungsformenkarte für die untersuchten nicht adiabaten Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen nur sehr eingeschränkt anwendbar sind.

Da eine Anpassung des Modells für den Übergang von Wellen- zu Schwallströmungen zur Verschiebung der Grenzkurve zu keiner Verbesserung führt und die physikalischen Ursachen für die Entstehung und Ausbreitung von Schwällen durch den Verdampfungsprozeß nicht eindeutig geklärt sind, wurde eine empirische Strömungsformenkarte erstellt. Die Untersuchung von in der Literatur als Achsparameter verwendeten Leerrohrgeschwindigkeiten sowie der spezifischen kinetischen Energien und der Wallis-Parameter auf ihre Eignung für eine empirische Strömungsformenkarte zeigte, daß diese Auftragsarten zu keiner eindeutigen Zuordnung von verschiedenen Strömungsformen in der Karte führt und somit als nicht geeignet erscheinen.

Durch eine modifizierte Froude-Zahl und einen dimensionslosen Eigenschaftsparameter, der den Dampfmassengehalt und ein Dichteverhältnis enthält, konnten eindeutige Zuordnungen erreicht und empirische Grenzkurven erstellt werden. Die empirische Strömungsformenkarte erlaubt eine Einteilung in Bereiche für Blasen/Pfropfenströmungen, Wellenströmungen und Schwallströmungen. Damit lassen sich die Strömungsformübergänge der ca. 800 gemessenen Strömungsformen bei allen in den Experimenten untersuchten Drücken, Massenströmen und Wärmeströmen beschreiben.

## 5.2 Ausblick

Durch einen Vergleich von Meßdaten mit der Strömungsformenkarte konnte gezeigt werden, daß der für technische Anwendungen wichtige Übergang von geschichteten zu schwallbehafteten Strömungsformen vom theoretischen Modell nicht richtig beschrieben wird. Für die Entwicklung von neuen theoretischen Modellen ist ein besseres physikalisches Verständnis für die Entstehung und Ausbreitung von Schwällen beim Verdampfungsprozeß in Rohren nötig. Hierzu sind weitere experimentelle Untersuchungen nötig. Vorzugsweise wären Versuche in beheizten transparenten Rohren durchzuführen, um die verschiedenen Arten der Schwallentstehung detailliert untersuchen zu können. Durch solche Experimente wären darüber hinaus die Ursachen für die Unterdrückung von Schwällen aufgrund des Wärmeeintrages bzw. das Überleben von Schwällen in anderen Parameterbereichen zu klären. Die neu entwickelten Modelle

könnten dann anhand der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Meßdaten überprüft werden.

Die Anzahl der durchgeführten Versuche war durch den Umfang der Arbeit begrenzt. Durch weitere Experimente mit dem aufgebauten Versuchsstand könnte das Parameterfeld erweitert werden und durch eine höhere Anzahl von Meßpunkten die empirische Strömungsformenkarte verfeinert werden. Insbesondere könnten gezielt die Übergänge zwischen den Strömungsformen untersucht werden, um durch eine hohe Anzahl von Meßpunkten in den Übergangsbereichen empirische oder theoretische Modelle zu verifizieren bzw. zu erweitern. Die Durchführung von Versuchen bei verschiedenen Rohrdurchmessern würde den geometrischen Einfluß auf die Ausbildung von Strömungsformen klären und eine Überprüfung erlauben, ob die in Strömungsformenkarten verwendeten Kennzahlen den Durchmesser einfluß richtig beschreiben.

In weiteren Experimenten sollte durch eine Teilbeheizung der Meßstrecke bei gleichen Einlaufbedingungen die Unterschiede in der Ausbildung bzw. Entwicklung von Strömungsformen unter adiabaten und nicht-adiabaten Bedingungen untersucht werden.

Das optische Meßsystem ist über die Messung von Strömungsformen hinaus in der Lage, Feinstrukturen der Strömungsform zu erfassen. Bei der Entwicklung von Modellen könnte die Analyse von verschiedenen Arten von Schwallströmungen und deren Schwallfrequenzen, die in verschiedenen Parameterbereichen auftreten, hilfreich sein.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Zahn, W. R.: A Visual Study of Two-Phase Flow While Evaporating in Horizontal Tubes. *Journal of Heat Transfer*, pp 417-429, August 1964
- [2] Baker, O.: Simultaneous Flow of Oil and Gas. *Oil and Gas Journal*, Vol. 53, pp 185-195 (1954)
- [3] Noerager, J. A.; Chaddock, J. B.: Forced Convection Boiling of Refrigerants in Horizontal Tubes. Phase 1, Report HL 101, Ray W. Herrick Laboratories, Purdue University, Lafayette, Indiana (1965)
- [4] Chawla, J. M.: Wärmeübergang und Druckabfall in waagerechten Röhren bei der Strömung von verdampfenden Kältemitteln. *VDI-Forschungsheft 523* (1967)
- [5] Schmidt, H.: Beitrag zum Verständnis des Wärmeübergangs im horizontalen Verdampferrohr. *Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19, Nr. 6* (1986)
- [6] Ha, S: und Bergles A. E.: Heat Transfer Characteristics of Horizontal In-Tube Evaporation. HTL-10, Heat Transfer Laboratory, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY (1992)
- [7] Steiner, D.: Zweiphasenströmung in Apparateelementen. In: *Hochschulkurs Wärmeübertragung II. Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V., Düsseldorf* (1983)
- [8] *VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Teil Hbb, 7. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf* (1994)
- [9] Taitel, Y.; Dukler, A. E.: A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*, Vol. 22, No. 1, pp 47-50 (1976)
- [10] Kattan, N.; Thome, J. R.; Favrat, D.: Two-Phase Flow Patterns for New Refrigerants Inside Horizontal Tubes. *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 1995, Rome, Italy 9-11 October*, pp 1301-1306 (1995)
- [11] Steiner, D.: Wärmeübergang und Druckverlust von siedendem Stickstoff bei verschiedenen Drücken im waagrecht durchströmten Rohr. *Dissertation an der Universität Karlsruhe* (1975)
- [12] Müller, M. J.: Strömungsphänomene bei der Direktverdampfung in Parabolrinnenkraftwerken. *Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6, Nr. 335* (1995)
- [13] Taitel, Y.: Flow Pattern Transition in Two Phase Flow. *International Heat Transfer Conference, Jerusalem*, pp 237-254 (1990)

- [14] Kefer, V.: Strömungsformen und Wärmeübergang in Verdampferrohren unterschiedlicher Neigung. Dissertation an der Technischen Universität München (1989)
- [15] Reimann, J.; John, H.: Measurements of the Phase Distribution in Horizontal Air-Water and Steam-Water-Flow. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> CSNI Specialists Meeting on Transient Two-Phase Flow, 12<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> June, Paris, pp 613-626 (1978)
- [16] Reimann, J.; John, H.; Löffel, R.; Solbrig, C. W.; Chen, L. L.; Good, R. R.: Mass Flow Measurements in Horizontal Steam-Water Flow With a Drag Disc Turbine Transducer, A Gamma Densitometer and the Radiotracer Technique. Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Topical Meeting, Saratoga, N.Y., pp 613-626
- [17] John, H.; Reimann, J.: Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2731B (1979)
- [18] Nakamura, H.; Kawaji, M.; Anoda, Y.; Koizumi, Y., Tasaka, K.: Effect of Pressure on Slugging in Steam/Water Two-Phase Flow. 2<sup>nd</sup> Int. Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Tokyo, Japan, pp 1/102-1/108 (1986)
- [19] Hewitt, G. F.: Measurement of Two Phase Flow Parameters. Academic Press, London (1978)
- [20] Barthels, H.: Meßverfahren für Zweiphasenströmungen. Chemie-Ing.-Techn., 40. Jahrg., Heft 11 (1968)
- [21] Delhay, J. M.: Optical Methods in Two-Phase Flow. Proceedings of the Dynamic Flow Conference, Marseille, France, pp 321-343 (1978)
- [22] Donaldson, M. R.; Pulfrey, R. E.: Imaging Optical Probe for Pressurized Steam-Water Environment. In: EG&G: Two-Phase Flow Measurements: Principles, Designs and Applications. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC 22709, USA, pp 391-443 (1983)
- [23] Nakamura, H.; Murata, H.; Itoh, H.: Fiber-Optics Video Probes for Observation of High-Pressure Two-Phase Flow. Proceedings of the 27<sup>th</sup> ASME/AICHE/ANS National Heat Transfer Conference, Minneapolis, July 28-31, pp 175-180 (1991)
- [24] Spindler, K.: Untersuchung zum Mischereinfluß auf die lokale Struktur einer adiabaten Zweiphasenströmung mit einem faseroptischen Sensor. Dissertation an der Universität Stuttgart (1989)
- [25] Delhay, J. M.: Hot-Film Anemometry in Two-Phase Flow. In: Two-Phase Flow Instrumentation. 11<sup>th</sup> National ASME/AICHE Heat Transfer Conference, Minneapolis, Minnesota, pp 58-69 (1969)



- [26] Müller, U.: Zweiphasenströmung mit Wärmeübergang. Vorlesung an der Universität Karlsruhe, Wintersemester 1995/96
- [27] Müller, S.: Anordnung zur Bestimmung des Anteils einer der Phasen einer Zweiphasenströmung. Deutsche Patentschrift Nr. 2558588 (1978)
- [28] Delhaye, J. M.; Jones, O. C.: A Summary of Experimental Methods for Statistical and Transient Analysis of Two-Phase Flow. Argonne National Laboratory, ANL-76-75 (1976)
- [29] Loth, R.; Schmitt, A.: Untersuchungen zur Entwicklung eines adaptiven Meßwerterfassungssystems zur Bestimmung lokaler Parameter von Zweiphasenströmungen mit faseroptischen Sensoren. Abschlußbericht, Technische Hochschule Darmstadt (1993)
- [30] Delhaye, J. M.; Charlot, R.; Danel, F.; Arnault, J.: An Optical Probe for Interface Detection at High Pressure (180 bar) and high Temperature (360 °C). Second International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Santa Barbara, CA, 11<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> Jan., pp 1427-1430 (1983)
- [31] Bergles, A. E.: Electrical Probes for Study of Two-Phase Flows. In: Two-Phase Flow Instrumentation. 11<sup>th</sup> National ASME/AICHE Heat Transfer Conference, Minneapolis, Minnesota, pp 70-81 (1969)
- [32] Samstag, M.: Experimentelle Untersuchungen von Transportphänomenen in vertikalen turbulenten Luft-Wasser-Blasenströmungen. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorsicherheit, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5662 (1996)
- [33] Barnea, D.; Shoham, O.; Taitel, Y.: Flow Pattern Characterization in Two Phase Flow by Electrical Conductance Probe. Int. J. Multiphase Flow, Vol 6, pp 387-397 (1980)
- [34] Shipp, R. L.: Capacitance Densitometer for Flow Regime Identification. US Patent Nr. 4,075,680 (1978)
- [35] Hubbard, M. G.; Dukler, A. E.: The Characterisation of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow. Heat Transfer Fluid. Mech. Conf., pp 101-121 (1966)
- [36] Drahos, J.; Cermak, J.; Selucky, K.; Ebner, L.: Characterization of Hydrodynamic Regimes in Horizontal Two-Phase Flow, Part II: Analysis of Wall Pressure Fluctuations. Chem. Eng. Process., 22, pp 45-52 (1987)
- [37] Tutu, N. K.: Pressure Fluctuations and Flow Pattern Recognition in Vertical Two Phase Gas-Liquid Flows. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 8, No. 4, pp 443-447 (1982)

- [38] Rouhani, S. Z.; Sohal, M. S.: Two-Phase Flow Patterns: A Review of Research Results. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 11, No. 3, pp 219-259 (1983)
- [39] Morala, E. C.; Chang, J. S.: Ultrasonic Puls-Echo Technique for Measuring Instantaneous Liquid Level and Void Fraction in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow. In: *Particulate Phenomena and Multiphase Transport Symposium*, Vol. 5, pp 311-325 (1988)
- [40] Prasser, H. M.; Schütz, P.; Hensel, F.: Untersuchung der Realisierbarkeit von Mustererkennungsverfahren zur Detektion der Struktur und zur Messung von Parametern einer Zweiphasenströmung mit Hilfe von Ultraschall. Abschlußbericht zum Vorhaben 1500937, Forschungszentrum Rossendorf (1994)
- [41] Schrock, V. E.: Radiation Attenuation Techniques in Two-Phase Flow Measurements. In: *Two-Phase Flow Instrumentation*. 11<sup>th</sup> National ASME/AICHE Heat Transfer Conference, Minneapolis, Minnesota, pp 24-35 (1969)
- [42] Vince, M. A.; Lahey, R. T.: On the Development of an Objective Flow Regime Indicator. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, No. 2, pp 93-124 (1982)
- [43] Lassahn, G. D.; Stephens, A. G.; Taylor, D. J.; Wood, D. B.: X-Ray and Gamma Transmission Densitometry. In: *EG&G: Two-Phase Flow Measurements: Principles, Designs and Applications*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC 22709, USA, pp 1-149 (1983)
- [44] Löffel, R.: Massenstrommessungen an Ein- und Mehrphasenströmungen. *Atomkernenergie-Kerntechnik* Bd. 33, Lfg. 2, pp 139-143 (1979)
- [45] Müller, M. J.: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff- Forschung (ZSW), persönliche Mitteilung
- [46] Simon, M.: Nicht-adiabate Wasser-Dampf-Strömung im waagerechten und geneigten Rohr. Diplomarbeit am Institut für Reaktortechnik, Universität Karlsruhe (1992)
- [47] Simon, M.: Anordnung zum Bestimmen der Strömungsform einer Zweiphasenströmung. Deutsche Patentschrift Nr. DE4333624C2 (1993)
- [48] Hale, M. H.; Query, M.R.: Optical Constants of Water in the 200-nm to 200 $\mu$ m Wavelength Region. *Applied Optics*, Vol. 12, No. 3, pp 555-563 (1973)
- [49] Dorsey, N. E.: *Properties of Ordinary Water-Substance*. Hafner Publishing Company, New York (1968)
- [50] Curcio, J. A.; Petty, C. C.: The Near Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 41, No. 5, pp 302-304 (1951)

- [51] Ichikawa, M.: Infrared Spectra of Penetration Depth into Water and of Water Refraction -Index. SPIE, Vol. 1157, pp 318-328 (1989)
- [52] Robertson, C. W.; Williams, D.: Lambert Absorption Coefficients of Water in the Infrared. Journal of the Optical Society of America, Vol.61, No. 10, pp 1316-1320 (1971)
- [53] Irvine, M. I.; Pollack, J. B.: Infrared Optical Properties of Water and Ice Spheres. ICARUS 8, pp 324-360 (1968)
- [54] Hettner, G.: Über das ultrarote Absorptionsspektrum des Wasserdampfes. Annalen der Physik, IV. Folge, Bd. 55, pp 476-496 (1918)
- [55] Kist, R.: Sources and Detectors for Optical Fiber-Optic Sensors. Optical fiber sensors : Proc. of the NATO advanced study inst., Erice, Italy, May 2 - 10,1986
- [56] Wolf, H. F.: Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications. Garland STPM Press, New York & London (1979)
- [57] Kotte, E. U.; Derge, K.; Landeryou, R. R.; Poprawe, R.; Tschudi, T.; Wobbe, W.: Technologies of Light. Springer, Berlin (1989)
- [58] Briley, B. E.: An Introduction to Fiber Optics System Design. North-Holland, Amsterdam (1988)
- [59] Mahlke, G.; Gössing, P.: Fiber Optic Cables. John Wiley & Sons, Chichester (1987)
- [60] McCann, B. P.: New Fiberoptic Paths for Surgical Lasers. Laser & Optronics, November 1990
- [61] Winlens 2.0 und 3.0, Spindler & Hoyer GmbH & Co, Göttingen (1995)
- [62] Schott Glaswerke: Chemische Resistenz optischer Gläser der Säurefestigkeit Klasse 5c. Technische Information Optisches Glas Nr. 5, Schott Glaswerke, Mainz (1972)
- [63] Malitson, I. H.: Refraction and Dispersion of Synthetic Sapphire. J. Opt. Soc. Am., Vol. 52, No. 12, pp 1377-1379 (1962)
- [64] Niemann, H.: Methoden der Mustererkennung. Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt am Main (1974)
- [65] Fukunaga, K.: Introduction to Statistical Pattern Recognition. 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, Boston (1990)

- [66] Knauer, S.: Rechnergestützte Signalmustererkennung von Meßsignalen. Studienarbeit am Institut für Kerntechnik und Reaktorsicherheit, Universität Karlsruhe (1996)
- [67] Schöch, W.; Richter, R.; Effertz, P.-H.: Untersuchung über die Magnetitbildung in einem überkritischen Benson-Kessel. *Der Maschinenschaden*, Vol. 43, Heft 2, pp 65-77 (1970)
- [68] Geyer, M.; Klaiß, H.: 194 MW Solarstrom mit Rinnenkollektoren. *BWK*, Bd. 41, Nr. 6 (1989)
- [69] Sekoguchi, K.; Sato, Y.; Kariasaki, A.: The Influence of Mixers, Bends and Exit Sections on Horizontal Two-Phase Flow. *Int. Symp. on Research in Cocurrent Gas-Liquid Flow*, University of Waterloo, Paper B.1.1-1.34, Waterloo, Ontario, Canada (1968)
- [70] Barnea, D; Shoham, O; Taitel, Y.; Dukler, A. E.: Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow Pattern Transitions for Upward Flow. *Chemical Engineering Science*, Vol. 40, No. 1, pp 131-136 (1985)
- [71] Kattan, N.; Thome, J. R.; Favrat, D.: Two-Phase Flow Patterns during Evaporation of the New Refrigerants in Tubes and Anulli. *European Two-Phase Flow Group Meeting*, Hannover, pp 1-17 (1993)
- [72] Grigull, U.: Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf in SI-Einheiten. Springer-Verlag, Berlin (1989)
- [73] Heinzl, V; Holzinger, J; Simon, M: Fluid Oscillations in Flat Plate Boiling Water Collectors. *Solar Energy*, Vol. 59, Nos. 1-3, pp 43-48 (1997)
- [74] Wallis, G. B.: *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill (1969)
- [75] Mendhane, J. M.; Gregory, G. A.; Aziz, K.: A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 1, pp 537-553 (1974)
- [76] Hewitt, G. F.; Roberts, D. N.: *Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-Ray and Flash Photography*. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, AERE-M2159 (1969)

## Anhang: Optimierung der Lichtwellenleiter

Für die Konstruktion nach Abb. 2-7 besteht die Anforderung, eine ausreichende Lichtintensität auf der Empfänger-Kugellinse zu erhalten. Hierzu ist einerseits eine gute Kollimation und andererseits eine hohe Lichtleistung nötig. Das aus einem Lichtwellenleiter austretende Licht läßt sich durch eine Linse um so besser kollimieren, je kleiner der Faserdurchmesser ist. Die Strahlungsleistung  $\phi$ , die in eine Faser eingekoppelt werden kann, steigt jedoch mit dem Faserdurchmesser  $2r$  [56]:

$$\phi = \pi^2 \theta^2 r^2 L \quad \text{Gl. A-1}$$

$L$  ist die Strahldichte der Leuchtdiode. Der Akzeptanzwinkel der Faser  $\theta$ , nach Gl. 2-4 also auch die numerische Apertur, sollte möglichst hoch sein. Die Forderungen:

- großer Lichtwellenleiterdurchmesser beim Eintritt des Lichtes in die Faser,
- kleiner Lichtwellenleiterdurchmesser beim Austritt des Lichtes aus der Faser und
- große numerische Apertur des Lichtwellenleiters,

lassen sich durch einen Glasstab nach Abb. A-1 realisieren.

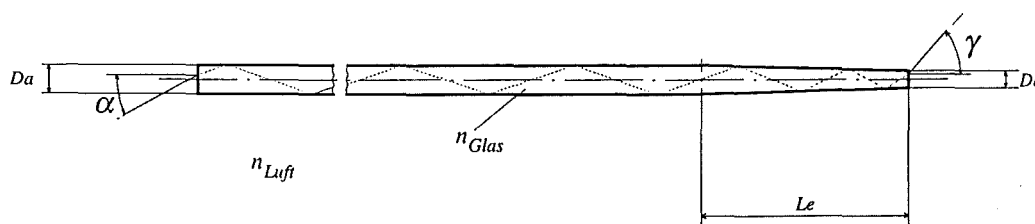


Abb. A-1: Glasstab mit kegelförmigem Ende

Der Glasstab ist auf der Lichtquellenseite zylindrisch mit dem Durchmesser  $D_a$  und in Richtung der Kugellinse kegelförmig mit dem Enddurchmesser von  $D_e$  ausgebildet und ist von Luft umgeben, so daß für den Lichtwellenleiter eine hohe numerische Apertur entsteht. Das Licht trifft mit dem Winkel  $\alpha$  vom Sender auf die Stirnfläche des zylindrischen Teils des Glasstabes. In dem Stab, der von Luft umgeben ist, werden Strahlen, die im Winkel  $\eta$  zum Lot an die Grenzfläche Glas-Luft gelangen, bis zum Grenzwinkel

$$\sin \eta_T = 1 / n_{\text{Glas}} \quad \text{Gl. A-2}$$

totalreflektiert.  $\eta$  ist im zylinderförmigen Teil des Stabes für jede Reflexion gleich. Im kegelförmigen Teil wird  $\eta$  mit jeder Reflexion um  $2\delta$  verkleinert:

$$\eta_i = \eta_{i-1} - 2\delta \quad \text{Gl. A-3}$$

$\delta$  ist der Winkel des Kegelstumpfmantels mit der optischen Achse. Bei  $\eta_i > \eta_T$  würde der Strahl aus dem Kegelmantel austreten. Die Länge des Kegelstumpfes wird so ausgebildet, daß die Strahlen, die zwecks Kollimation zur Kugellinse gelangen sollen, nicht aus der Mantelfläche, sondern aus der Stirnfläche des Kegelstumpfes austreten. Der Winkel dieser Strahlen nach Austritt aus der Kegelstumpfstirnfläche  $\gamma$  zur optischen Achse wird bestimmt durch den Akzeptanzwinkel der Kugellinse. Durch Anpassung der Glasstabgeometrie an die Strahlungscharakteristik der Lichtquelle kann eine im Vergleich zu zylindrischen Lichtwellenleitern mit einem Durchmesser von  $D_e$  höhere Strahlungsleistung am Glasstabeende erreicht werden. Der in Abb. A-1 eingezeichnete Lichtstrahl schneidet die optische Achse beim Eintritt in den Kegelstumpf (Fall A). Für andere Strahlenverläufe tritt im günstigsten Fall die letzte Reflexion im zylinderförmigen Teil kurz vor dem Eintritt in den kegelstumpfförmigen Teil auf (Fall B). Im ungünstigsten Fall tritt die erste Reflexion im Kegelstumpf kurz hinter dem Eintritt in den kegelstumpfförmigen Teil auf (Fall C). Zur Berechnung der 3 Fälle wurde ein Programm geschrieben, das durch eine Strahlverfolgung die Reflexionen im zylinderförmigen und im kegelstumpfförmigen Teil berechnet.

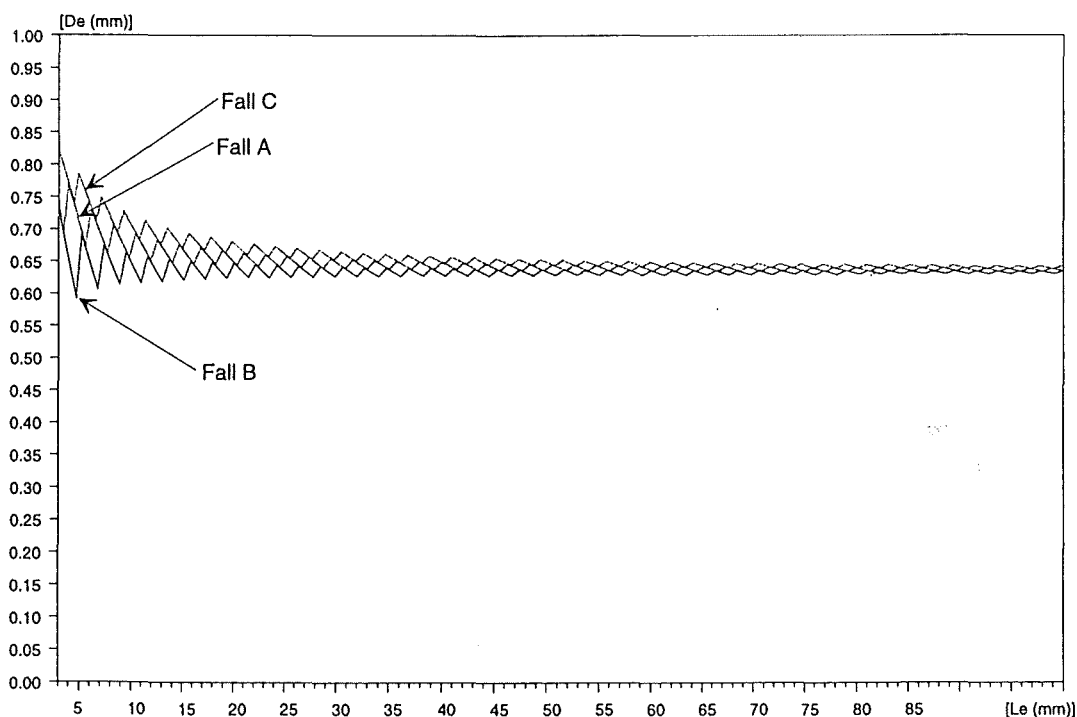


Abb. A-2: Nötige Länge des Kegelstumpfteils im Verhältnis zum Enddurchmesser für einen Glasstab mit  $D_a=1.0$  mm,  $\alpha=25^\circ$ ,  $\gamma=42^\circ$

Abb. A-2 zeigt für die Fälle A,B und C den für einen Austritt des Lichtes aus der Stirnfläche des Kegelstumpfes nötigen Enddurchmesser  $D_e$  für eine Kegelstumpflänge  $L_e$ . Die Berechnung wurde für einen Stab mit einem Zylinderdurchmesser von  $D_a=1.0$  mm, einem Eintrittswinkel von  $\alpha = 25^\circ$  und einem Abstrahlwinkel von  $\gamma=42^\circ$  durchgeführt. Es kann somit die Kegelstumpflänge  $L_e$ , bestimmt werden, die der Kegelstumpf beim jeweiligen Enddurchmesser  $D_e$  mindestens haben muß, damit für die

Fälle A, B und C alle Strahlen mit Eintrittswinkeln  $\alpha$  von  $0^\circ$  bis  $25^\circ$  mit Abstrahlwinkeln  $\gamma$  von  $0^\circ$  bis  $42^\circ$  aus der Stirnfläche des Kegelstumpfes austreten. Für eine Strahlungsquelle mit  $\alpha \leq 25^\circ$  kann in diesem Ausführungsbeispiel abgesehen von Absorption und Streuung bei der Transmission durch Glas die gesamte Strahlungsleistung, die auf die Stirnfläche des Zylinders fällt, zur kleineren Stirnfläche des Kegelstumpfes übertragen werden. Dies entspricht einer Konzentration der Strahlungsleistung pro Fläche, bei der der Abstrahlwinkel im Vergleich zum Einstrahlungswinkel vergrößert wird. Da der Abstrahlwinkel auf die Kugellinsenanordnung angepaßt wurde, wird mit der beschriebenen Anordnung eine im Vergleich zu zylindrischen Lichtwellenleitern bessere Kollimation und somit eine höhere Strahlungsdichte im Strömungskanal erreicht.