

EUR 5077 d

KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN

LIBRARY

**BESTIMMUNG DES DAMPFGEHALTES
UND DER STROMUNGSFORM EINES ZWEIPHASENGEMISCHES
IN KONZENTRISCHEN RINGSPALTEN**

von

P. HERZBERGER und W. HUFSCHMIDT

1974



**Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien**

Division Technologie

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Gemeinschaften ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, daß die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, ihre Vertragspartner und die in deren Namen handelnden Personen :

keine Gewähr dafür übernehmen, daß die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder daß die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;

keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von BF 50,-

verkauft.

**Kommission der
Europäischen Gemeinschaften
GD XIII - ZID
29, rue Aldringen
L u x e m b o u r g**

MAI 1974

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 5077 d

KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN

**BESTIMMUNG DES DAMPFGEHALTES
UND DER STRÖMUNGSFORM EINES ZWEIPHASENGEMISCHES
IN KONZENTRISCHEN RINGSPALTEN**

von

EUR 5077 e

**DETERMINATION OF THE STEAM CONTENT AND FLOW PATTERN OF A
TWO-PHASE MIXTURE IN CONCENTRIC ANNULAR SONDES**
by P. HERZBERGER and W. HUFSCHMIDT

Commission of the European Communities
Joint Nuclear Research Centre - Ispra Establishment (Italy)
Technology Division
Luxembourg, May 1974 - 32 Pages - 7 Figures - B.Fr. 50,—

For the quantitative determination of the void-fraction of homogeneous two-phase flow (bubble- and mist flow) and qualitative investigation of the flow pattern of non-homogeneous two-phase flow, an annular sonde based on impedance measurements has been developed. First measurements with a test section with water-air at atmospheric pressure have shown the applicability of the method.

EUR 5077 e

**DETERMINATION OF THE STEAM CONTENT AND FLOW PATTERN OF A
TWO-PHASE MIXTURE IN CONCENTRIC ANNULAR SONDES**
by P. HERZBERGER and W. HUFSCHMIDT

Commission of the European Communities
Joint Nuclear Research Centre - Ispra Establishment (Italy)
Technology Division
Luxembourg, May 1974 - 32 Pages - 7 Figures - B.Fr. 50,—

For the quantitative determination of the void-fraction of homogeneous two-phase flow (bubble- and mist flow) and qualitative investigation of the flow pattern of non-homogeneous two-phase flow, an annular sonde based on impedance measurements has been developed. First measurements with a test section with water-air at atmospheric pressure have shown the applicability of the method.

ZUSAMMENFASSUNG

Zur quantitativen Bestimmung des Dampfgehaltes bei homogenen Zweiphasenströmungen (Blasen-, Nebelströmung) und qualitativen Ermittlung der Strömungsform bei nicht homogenen Strömungen (Pfropfen-, Ringströmung) wurde eine Ringspaltsonde auf der Basis der Impedanzmessung entwickelt. Erste Messungen in einer Messstrecke mit Wasser-Luft bei Atmosphärendruck zeigten die Brauchbarkeit des Verfahrens.

1. EINLEITUNG

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Versuche, die mit einer aus vier konzentrisch angeordneten Zylindern aus rostfreiem Stahl bestehenden Ringspaltsonde zur Dampfgehaltbestimmung mit einem Wasser-Luftgemisch durchgeführt wurden. Die Sonde (Abb. 1) wurde für einen Rohrdurchmesser von 16 mm hergestellt und besteht aus einem Kern-Verdrängungskörper von 6 mm Durchmesser und drei äquidistanten Zylindern von je 0,8 mm Dicke mit den mittleren Durchmessern von 9,2; 13,2 und 17,2 mm. Der Innendurchmesser der Wandelektrode beträgt 20,4 mm. Die Summe der freien Ringspaltquerschnitte entspricht dem Querschnitt des Rohres von 16 mm Innendurchmesser. Am Sondenaustritt waren die Elektroden von 25 mm wirksamer Länge in einer Vorrichtung aus keramischem Material gegeneinander isoliert befestigt.

Das Messprinzip beruht auf der Impedanzänderung des durch die Ringspalte von 1,2 mm lichter Weite strömenden Wasser-Dampf- oder Wasser-Luftgemisches. Die Sonden wurden mit einer Trägerfrequenz von 10 kHz beschickt. Die Abbildungen 2a und 2b zeigen das Prinzip- und Blockschaltbild der Messanlage: die vier zu untersuchenden Sondenringspalten werden über einen gemeinsamen, vom 10 kHz-Generator primärseitig gespeisten Transformator durch vier separate Sekundärwicklungen betrieben und erzeugen am Messwiderstand eine von der Sondenimpedanz abhängige Spannung U . Diese Spannung gibt nach Verstärkung und Gleichrichtung ein Mass für den Dampfgehalt im betreffenden Ringspalt.

Im Falle einer Blasen- oder Pfropfenströmung des Zweiphasengemisches steuert eine Vergleichssonde, die vom gleichen Wasser aber ohne Dampfgehalt beaufschlagt wird, den Regelkreis, der über ein Motorpotentiometer die Spannung des Trägerfrequenzgenerators regelt und in Abhängigkeit der Änderung der Wasserleitfähigkeit die Spannung U an

den Messwiderständen r konstant hält (es wurde für die Versuche vollentsalztes Wasser mit einer Leitfähigkeit von etwa 10^{-2} Siemens/cm benutzt). Die Verwendung der Trägerfrequenz hat den Vorteil, die bei Gleichstrombetrieb entstehenden Polarisationspannungen und Gasbildungen durch Elektrolyse an den Elektroden auszuschliessen. Ferner erlaubt sie die Einspeisung aller Sonden über einen einzigen Transformator; die galvanische Trennung ist demnach gewährleistet und die Zahl der Stromquellen reduziert. Es wurde eine Trägerfrequenz von 10 kHz gewählt, um einerseits die bei zu hohen Frequenzen auftretenden Störanfälligkeiten der Elektronik und Einflüsse von Störkapazitäten zu vermeiden und um andererseits aber auch noch genügend zeitliche Auflösung und Übertragung des Nutzsignals zu gewährleisten. Eine Erhöhung der Trägerfrequenz auf 40 bis 50 kHz würde die oben beschriebenen Störungen wahrscheinlich nicht wesentlich vergrössern. Die Trägheit des Motorpotentiometers erlaubt, den zufälligen Durchfluss einer Dampfblase durch die Elektroden der Vergleichssonde nicht als vorübergehende Leitfähigkeitsänderung zu registrieren. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Regelung bei der Messung auszuschalten.

Im Falle einer Nebel- oder Ringströmung wird der Regelkreis in der Weise umgeschaltet, dass die Generatorspannung auf dem Maximalwert konstant gehalten wird, da die bei dieser Strömungsform auftretenden hohen Impedanzen der Sonde eine hohe, konstante Speisespannung benötigen. Die Vergleichssonde wird in diesem Fall nicht benötigt.

Durch die Konstruktion der Messsonden ist eine einpolige galvanische Kopplung zwischen den Ringspaltelektroden gegeben, was eine galvanische Trennung der einzelnen Messketten über die Eingangstransformatoren T bedingt. Die Messungen des Dampfgehaltes in den einzelnen Ringspalten werden von Galvanometern angezeigt. Gleichzeitig steht am Ausgang jeder Messkette ein Gleichspannungsanalogsignal mit einer maximalen Amplitude von 10 V zur Verfügung, das einem Dampfgehalt

$\alpha = 0$ entspricht. Ein Analogrechner bestimmt aus den vier Signalen der einzelnen Sondenringspalte den mittleren Dampfgehalt α_M im Rohr und liefert ein Analogsignal von maximal 10 V bei $\alpha_M = 0$. Das Auflösungsvermögen der Messketten beträgt 10^{-2} s für jeden Analogsignalausgang.

2. HYDRODYNAMISCHE AUSLEGUNG DER SONDE

Bezeichnet man die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Zulaufrohr mit \bar{v}_R , im Austrittsrohr \bar{v}_D und in den einzelnen Ringspalten mit \bar{v}_n , so gilt für den Volumendurchsatz durch die Sonde (Abb. 3):

$$Q_V = \frac{\pi}{4} d_R^2 \bar{v}_R = \frac{\pi}{4} D^2 \bar{v}_D = \sum_{n=1}^N A_n \bar{v}_n \quad (1)$$

wobei N die Anzahl der Ringspalte vom Querschnitt A_n bedeutet. Bei gleicher Dicke s der Elektroden gilt:

$$A_n = \frac{\pi}{4} [(d_n - s)^2 - (d_{n-1} + s)^2] \quad \text{für } n \geq 2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} [(d_1 - s)^2 - s_0^2] \quad \text{für den Innenspalt}$$

$$A_N = \frac{\pi}{4} [(D - s)^2 - (d_{N-1} + s)^2] \quad \text{für den Aussenspalt } (d_N = D)$$

Die Summe der Ringspaltquerschnitte soll gleich dem Querschnitt des Zulaufrohres (Durchmesser d_R) sein:

$$A_R = \frac{\pi}{4} d_R^2 = \sum_{n=1}^N A_n \quad (2)$$

Der Druckverlust der Strömung in jedem Sondenkanal ist gleich:

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{f_n}{d_{h_n}} \frac{s_n}{2} \bar{v}_n^2 \quad (3)$$

wobei f_n den Widerstandsbeiwert und d_{h_n} den hydraulischen Durchmesser bezeichnen.

$$d_{h_n} = \frac{4A_n}{U_n} \quad (4)$$

Mit dem benetzten Umfang:

$$U_n = \pi [(d_n - s) + (d_{n-1} + s)] \quad \text{für } n > 2$$

$$U_1 = \pi [(d_1 - s) + s_0] \quad \text{für den Innenspalt}$$

$$U_N = \pi [(D - s) + (D_{N-1} + s)] \quad \text{für den Aussenspalt}$$

Aus der Druckverlustgleichheit folgt:

$$\frac{f_n \cdot s_n \cdot \bar{v}_n^2}{(d_n - s) - (d_{n-1} + s)} = \text{konst.} \quad (5)$$

Wie man aus Gleichung (5) erkennt, hängt die Anordnung der Son-
denzylinder (d_n) von der Strömungs- und Dampfgehaltverteilung im
Rohrquerschnitt (d_R) ab. Der Einfachheit halber sollen konstante Ge-
schwindigkeit ($\bar{v}_n = \text{konst.}$), konstante Stoffwerte (ρ_n) und konstante
Widerstandsbeiwerte (f_n) angenommen werden. Damit vereinfacht sich
Gleichung (5) ($d_{h_n} = \text{konst.}$) zu:

$$d_n - d_{n-1} - 2s = d_{n+1} - d_n - 2s = \text{konst.}$$

oder:

$$d_n = \frac{d_{n+1} + d_{n-1}}{2} \quad (6)$$

wobei für $n = 1$: $d_{n-1} = d_0 = s_0 - s$

und $n = N$: $d_{N-1} = \frac{1}{2} (D + d_{N-2})$

Daraus folgt für $n = 1, 2, 3, \dots, N$:

$$d_{n-1} = \frac{n-1}{n} d_n + \frac{s_0 - s}{n} \quad (7)$$

Für die Ringspaltquerschnitte ergibt sich mit $\varphi_n = d_n/D$ und $\delta = s/D$:

$$A_n = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{1}{N^2} \left[(1 - \varphi_0) - 2N\delta \right] \left[2N\varphi_0 + (2n-1)(1 - \varphi_0) \right] \quad (8)$$

wobei $\varphi_0 = d_0/D = (s_0 - s)/D = \delta_0 - \delta$.

Der freie Querschnitt in der Sonde ist

$$A = \sum_{n=1}^N A_n = \frac{\pi}{4} D^2 (1 + \varphi_0) (1 - 2N\delta - \varphi_0) \quad (9)$$

Im vorliegenden Fall mit $N = 4$, $D = 21,2 \text{ mm}$, $s_0 = 6 \text{ mm}$, $s = 0,8 \text{ mm}$ ergibt sich:

n	d_n [mm]	A_n [mm ²]	U_n [mm]	d_{hn} [mm]	A_n/A
1	9,2	27,14	45,24	2,40	0,136
2	13,2	42,22	70,37	2,40	0,212
3	17,2	57,30	95,50	2,40	0,288
4	21,2	72,38	120,64	2,40	0,364
A =		199,04			1,000

Das Zuleitungsrohr von 16 mm Durchmesser hat einen Querschnitt von 201 mm^2 , was der $\sum A_n$ entspricht.

Die Zulaufstrecke zur Sonde setzt sich aus der Verzögerungsstrecke L_V und der Beschleunigungsstrecke L_B (Abb. 3) zusammen. Die Bedingungen für die Auslegung dieser beiden Strecken sollten sein:

- (a) Stossfreier Übergang in den einzelnen Querschnitten,
- (b) Die stärkste Querschnittsvergrößerung in der Verzögerungsstrecke sollte nicht mehr als in einem Diffusor von 15° Öffnungswinkel sein,

um Ablösungen der Strömung zu vermeiden,

- (c) Die Beschleunigungsstrecke sollte möglichst klein im Verhältnis zur Sondenlänge l sein, damit für die Impedanzmessung definierte Abstände vorliegen.

In diesem speziellen Fall wurden wegen der kleinen Abmessungen gerade Flanken für das Gehäuse und den Verdrängungskörper in der Mitte gewählt, wodurch die Bedingung (a) nicht strikt eingehalten wurde. Die Bedingungen (b) und (c) wurden jedoch weitgehend berücksichtigt und es ergeben sich folgende Längen:

$$L_V = 30 \text{ mm} ; L_B = 5 \text{ mm} ; l = 25 \text{ mm}$$

Strömungsbeobachtungen in einer Messstrecke aus Plexiglas (Abb. 1) mit Wasser-Luftgemisch zeigten, dass die Strömungsform vor und in der Sonde durch diese praktisch nicht gestört wurde.

3. ELEKTRISCHE AUSLEGUNG DER SONDE

Das Messprinzip der Ringspaltsonde beruht auf der Impedanzänderung des Zweiphasengemisches. Um im Falle einer Blasen- oder Pfropfenströmung einer Leitfähigkeitsänderung des Wassers in der Sonde Rechnung zu tragen, wird eine Vergleichssonde herangezogen, die vom gleichen Wasser, jedoch ohne Dampfgehalt ($\alpha = 0$) beaufschlagt wird und die über ein Motorpotentiometer (vergl. Abb. 2) die Spannung der 10 kHz Trägerfrequenz regelt.

Wirkungsweise der Regelung

(a) Blasen- und Pfropfenströmung

Die Spannung U im Messkreis (Abb. 4) ist abhängig von Sondenwiderstand R_s und der Speisespannung E . Sie soll bei langsamen Schwank-

ungen von R_s durch Änderung der Leitfähigkeit des Wassers in weitem Bereich konstant bleiben. Für den Messkreis gilt:

$$U = \frac{E \cdot r}{R_s + r} \quad (10)$$

und da $R_s \gg r$ ist:

$$U = E \frac{r}{R_s} \quad (10a)$$

Die Vergleichssonde im Regelkreis wird nur von Wasser ($\alpha = 0$) gespült und ihr Widerstand ist nur abhängig von der Leitfähigkeit des Wassers. Für die Spannung U' gilt mit der Vernachlässigung $R_s' \gg r'$:

$$U' = E' \frac{r'}{R_s'} \quad (11)$$

Der Widerstand R_s' der Vergleichssonde ist dem Widerstand R_s der Messsonde um einen konstanten, durch die Sondengeometrie bedingten Faktor A proportional:

$$R_s = A \cdot R_s' \quad (12)$$

Die Speisespannungen sowohl im Mess- als auch im Regelkreis sind gleich und durch den Transformator T fest gekoppelt:

$$E = E' \quad (13)$$

Die Festwiderstände r und r' sind ebenfalls proportional um einen Faktor B :

$$r = B r' \quad (14)$$

Damit lässt sich Gleichung (10a) umformen:

$$U = K \cdot U' \quad (15)$$

mit $K = B/A$. Der Regelkreis hält den Strom i' in Abhängigkeit von R'_s durch Abgleich der Spannung V am Transformatoreingang konstant und es gilt:

$$U' = \text{konst}$$
$$U = KU' = \text{konst}$$

Die Regelkreisspannung U' wird durch Abgleich von r' so eingestellt, dass bei hochreinem Wasser die Spannung V am Transformatoreingang den Maximalwert aufweist. Beim späteren Ansteigen der Leitfähigkeit durch Verunreinigungen des Wassers im Versuchskreislauf steht der volle Regelbereich zur Verfügung, d. h. V und demnach E und E' können nur geringer werden, damit U konstant bleibt. Liegen mehrere Messkreise an der Sekundärseite des Transformators, gilt für alle:

$$U_1 = K_1 \cdot U'; \quad U_2 = K_2 U'; \quad U_3 = K_3 U' \quad \text{usw.}$$
$$U_n = K_n \cdot U' \quad (16)$$

Alle Spannungen U_n sind von der Regelspannung U' abhängig. Ist diese konstant, sind auch die Messspannungen U_n nur durch die Faktoren K_n unterschiedlich aber stabil. Durch geeignete Wahl dieser Faktoren K_n können unterschiedliche Sondengeometrien ausgeglichen und gleiche Ausgangsspannungen erreicht werden. Die so geschalteten Verstärker geben ihre maximale Ausgangsspannung für einen Dampfgehalt von $\alpha = 0$.

(b) Ring- und Nebelströmung

In diesem Fall stellt der Regelkreis die Generatorspannung konstant auf den Maximalwert ein. Die Regelspannung wird über einen Spannungsteiler auf der Primärseite des Trägerfrequenztransformators

gewonnen. Der Einfluss der Änderung der Wasserleitfähigkeit ist ausgeschlossen, nur die Änderung der Dielektrizitätskonstanten des Wassers spielt eine Rolle. Als Vergleichsspannung wird eine stabilisierte Gleichspannung benutzt. Zusätzlich lässt sich die Verstärkung der Verstärkerketten erhöhen, um die geringe Signalspannung verarbeiten zu können.

Impedanz der Sonde

(a) Blasen- und Pfropfenströmung

Bezeichnet man mit ρ den spezifischen elektrischen Widerstand des Wassers in der Sonde, so gilt für den Widerstand R_s (Abb. 5):

$$dR_s = \rho \frac{dr}{2\pi r l}$$
$$R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (17)$$

wobei die Radien r_1 und r_2 einen Ringspalt begrenzen. Nach der bekannten Formel für den Zylinderkondensator beträgt die Kapazität C_s der Sonde:

$$C_s = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2\pi l}{\ln(r_2/r_1)} \quad (18)$$

wobei ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante (für Wasser von 20°C etwa 80) bedeutet. Wird C_s in Farad und die Sondenlänge l in m ausgedrückt, wird die absolute Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ s/(Ω m). Die Sonde kann als Parallelschaltung der Kapazität C_s mit dem Widerstand R_s angesehen werden und dafür ergibt sich die äquivalente Impedanz (Abb. 6):

$$Z = R_s / (1 + j R_s C_s \omega) \quad (19)$$

$$|Z| = \frac{R_s}{\sqrt{1 + (R_s C_s \omega)^2}} \quad (20)$$

Hierbei ist $M = R_s C_s \omega$ eine Konstante, die keine geometrischen Grössen enthält:

$$M = \epsilon_0 \epsilon_r g \omega \quad (21)$$

und:

$$|Z| = \frac{\frac{g}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1}}{\sqrt{1 + M^2}} \quad (22)$$

Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \varphi = 1/M$ enthält ebenfalls keine geometrischen Grössen.

Wie aus vielen Probeentnahmen an Versuchskreisläufen nach einiger Betriebszeit, die anfangs mit vollentsalzten und entgastem Wasser gefüllt waren, hervorgeht, kann man im Mittel mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von etwa $g = 2 \text{ k}\Omega\text{m}$ rechnen. Bei einer Trägerfrequenz von 10 kHz ($\omega = 6,28 \cdot 10^4 \text{ 1/s}$) und mit der relativen Dielektrizitätskonstanten von Wasser ($\epsilon_r = 80$) ergibt sich:

$$M^2 = (\epsilon_0 \epsilon_r g \omega)^2 = (8,89 \cdot 10^{-2})^2 \approx 8 \cdot 10^{-3}.$$

Da dieser Wert sehr viel kleiner als Eins ist, kann die Sonde als reiner Widerstand angesehen werden ($|Z| = R_s$).

(b) Ring- und Nebelströmung

In diesem Falle steigt der Widerstand R_s gegen unendlich, da der spezifische elektrische Widerstand des Dampfes gegen unendlich geht. Für die Impedanz nach Gleichung (20) bleibt der Ausdruck:

$$|Z|_{R_s \rightarrow \infty} = \frac{1}{\omega C_s} \quad (23)$$

Das bedeutet, dass nun die Sondenimpedanz eine rein kapazitive Reaktanz darstellt, die nur von der Dielektrizitätskonstanten des Dampf-Wassergemisches abhängig ist. Es müssen hier entsprechend

höhere Impedanzen gemessen werden. Der maximale Wert der Sondenimpedanz ist durch die mit reinem Dampf gefüllte Leitkapazität ($\epsilon_{r_D} \approx 1$) der Ringspalte gegeben und beträgt in jedem Falle:

$$Z_{max} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi l \epsilon_0 \omega} \quad (24)$$

4. BESTIMMUNG DES DAMPFGEHALTES IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FORM DER ZWEIPHASENSTRÖMUNG

Bei den üblichen Zweiphasenströmungen unterscheidet man im senkrechten Rohr verschiedene Formen, die sich je nach Massenstromdichte q_m und Dampfgehalt α (= Dampfvolumen/Gesamtvolumen) einstellen (Abb. 7 nach [1] und [2]):

- (A) Blasenströmung (BS) mit homogen verteilten Dampfblasen in einer Wassermatrix (für $\alpha < 70\%$).
 - (B) Pfropfenströmung (PS) mit Dampfballen, die fast den ganzen Strömungsquerschnitt ausfüllen ($q_m < 600 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$). Diese Form ist für die Untersuchung von Zweiphasenströmungen von untergeordneter Bedeutung, da die Massenstromdichten meist grösser als $1000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ sind.
 - (C) Ringströmung (RS) mit einem Wasserfilm an der Kanalwand und einer Dampfströmung im Kern ($\alpha > 60\%$ und $q_m > 60 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$). Der umgekehrte Fall eines Dampffilms an der Wand und einer Wasserströmung im Kern ist nicht von wesentlicher Bedeutung. Im Grenzfall verschwindenden Wasserfilms an der Wand ergibt sich die Nebelströmung (NS) mit homogener Verteilung von Wassertröpfchen in einer Dampfmatrix ($\alpha > 70\%$, $q_m > 400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$).
- Für alle diese Strömungsformen ergeben sich bei gleichen Dampfgehalten α verschiedene Anzeigen an der Sonde.

(A) Blasenströmung (BS)

Eine mathematische Behandlung der Impedanz der Sonde ist nur mithilfe einer statistischen Methode möglich. Nimmt man eine Verteilung der als klein angenommenen Dampfblasen in der Wassermatrix nach der maxwellschen Gleichung^[3, 4] an, ergibt sich für die gleichwertigen mittleren Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ und der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ :

$$\rho_{BS} = \rho_W \frac{\rho_D(2+\alpha) + \rho_W(1-\alpha)}{2\rho_D(1-\alpha) + \rho_W(1+2\alpha)} \quad (25)$$

$$\epsilon_{BS} = \epsilon_W \frac{\epsilon_D(1+2\alpha) + 2\epsilon_W(1-\alpha)}{\epsilon_D(1-\alpha) + \epsilon_W(2+\alpha)} \quad (26)$$

Der Index "D" gilt für die Dampfblasen und der Index "W" für die Wassermatrix. Mit den üblichen Werten ($\rho_W = 2 \text{ k}\Omega\text{m}$; $\rho_D = \infty$; $\epsilon_W = 80$; $\epsilon_D = 1$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ s}/(\Omega\text{m})$ und für $\omega = 6,28 \cdot 10^4 \text{ 1/s}$) lässt sich zeigen, dass der Ausdruck $(\omega RC)^2$ in Gleichung (20) sehr klein ist gegenüber Eins, d.h. dass der Widerstandsanteil (ρ) massgebend ist. Aus Gleichung (25) wird dann:

$$\rho_{BS} = \rho_W \frac{2+\alpha}{2(1-\alpha)} \quad (27)$$

Die Sondenimpedanz bei Blasenströmung ergibt sich zu:

$$Z_{BS} = \frac{\rho_W \ln(r_2/r_1)}{2\pi l} \frac{2+\alpha}{2(1-\alpha)} \quad (28)$$

wobei r_1 und r_2 wieder die Radien eines Ringspaltes der Sonde bedeuten. Gleichung (28) gilt im ganzen Bereich der Blasenströmung ($\alpha < 70\%$).

(B) Pfropfenströmung (PS)

Im folgenden werde angenommen, dass eine Dampfblase den Sonden-

querschnitt zwischen den beiden Elektroden (Radien r_1 und r_2) ganz ausfüllt, die Länge l_B der Blase in Strömungsrichtung jedoch kleiner ist als die Länge l der Sonde. Das Restvolumen ($l - l_B$) sei von Wasser ausgefüllt. Dann ist der Widerstand der Sonde (entspr. Gleichung (17)):

$$R_S = \frac{\rho_w}{2\pi(l-l_B)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (29)$$

Mit der Definition des Dampfgehaltes

$$\alpha = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2) l_B}{\pi(r_2^2 - r_1^2) l} = \frac{l_B}{l} \quad (30)$$

ergibt sich die Sondenimpedanz (die parallel zur Wasserbrücke liegende kapazitive Reaktanz der Dampfblase ist erheblich grösser als R_s):

$$Z_{PS} = \frac{\rho_w}{2\pi l (1-\alpha)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (31)$$

Für $\alpha = 0$ (reine Wasserströmung) ergibt sich Gleichung (17). Für $\alpha = 1$ (reine Dampfströmung) ergibt sich nach Gleichung (31) eine unendlich grosse Impedanz. Es bleibt hier natürlich die Leerimpedanz der Sondenkapazität bestehen und die sich nach Gleichung (24) berechnen lässt.

Bei der Dampfgehaltbestimmung für diese Strömungsform können erhebliche Fehler entstehen, wenn der Wasseranteil ($1 - \alpha$) nicht den ganzen Sondenquerschnitt ausfüllt und sich ein dünner Dampf-film an der äusseren oder inneren Elektrodenwand gebildet hat, wobei zusätzlich noch eine in Richtung des Stromes sehr dünne Wasserbrücke zwischen den Elektroden besteht. In diesem Falle kann der Wasserwiderstand dieser Brücke ausreichend sein, um den kapazitiven Anteil verschwinden zu lassen; die Messung täuscht dann einen zu hohen Dampfgehalt vor. Dehnt sich hingegen der Wasseranteil

$(1 - \alpha)$ über den ganzen Querschnitt zwischen den Elektroden aus, ist die Messung mit der Ringspaltsonde genau.

(C) Ringströmung (RS) und Nebelströmung

Im Falle eines Wasserfilms an der Innenseite der äusseren Elektrode oder der Aussenseite der inneren Elektrode und eines Dampf-Wassergemisches bestimmter Zusammensetzung im restlichen Sondenquerschnitt ist der Widerstand sehr gross und es werden im wesentlichen kapazitive Messwerte angezeigt. Man kann allgemein die Wasserschicht als gut leitend gegenüber dem Dampf-Wassergemisch ansehen und somit als verdickte Elektrode ansehen (Abb. 8).

Bei der Strömungsform mit feinen Wassertröpfchen in einer Dampfmatrix im Raum zwischen dem Wasserfilm und der Elektrode gilt bezüglich der mathematischen Behandlung das gleiche wie bei der Blasenströmung (BS). Hier ist der kapazitive Widerstand $(1/\omega C)$ massgebend und für die gleichwertige mittlere relative Dielektrizitätskonstante ergibt sich:

$$\epsilon_{SP} = \epsilon_D \frac{\epsilon_W (3 - 2\alpha_{SP}) + 2\epsilon_D \alpha_{SP}}{\epsilon_W \alpha_{SP} + \epsilon_D (3 - \alpha_{SP})} \quad (32)$$

Der Index "SP" bezieht sich auf die Verhältnisse im Spalt zwischen Wasserfilm und Elektrode mit einem bestimmten Dampf-Wassergemisch. Für die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_D des Dampfes kann der Wert Eins angesetzt werden während diejenige des Wassers ϵ_W temperaturabhängig ist^{/3/} (bei 20°C ist ϵ_W etwa 80 und bei 300°C etwa 20). Im interessierenden Bereich der Ring- und Nebelströmung ($\alpha_{sp} > 60\%$ und $100^\circ\text{C} \leq T_w \leq 350^\circ\text{C}$) lässt sich Gleichung (32) sehr genau wiedergeben durch die Beziehung:

$$\epsilon_{SP} = \frac{3 - 2\alpha_{SP}}{\alpha_{SP}} \left[1 - (1 - \alpha_{SP}) \left(0,114 + 0,02 e^{0,84 \left(\frac{T_w}{100} \right)} \right) \right] \quad (32 \text{ a})$$

Dabei ist die Wassertemperatur T_w in Grad Celsius einzusetzen.

Für $\alpha_{sp} = 1$ wird auch $\epsilon_{sp} = 1$, der Wert des reinen Dampfes.

Bezeichnet man gemäss Abbildung 8 mit r_F den Radius der Grenzfläche zwischen Wasserfilm und Dampf-Wassergemisch, mit r_1 und r_2 die Radien der begrenzenden Elektroden und mit $q = r_2/r_1$, so gilt für den wichtigeren Fall des Wasserfilms an der Aussenelektrode (Abb. 8 oben):

$$\text{Kapazität:} \quad C_{RS} = \frac{2\pi L \epsilon_0 \epsilon_{sp}}{\ln(r_F/r_1)} \quad (33)$$

$$\text{Dampfgehalt:} \quad \alpha = \alpha_{sp} \frac{(r_F/r_1)^2 - 1}{q^2 - 1} \quad (34)$$

(wobei $\alpha \leq \alpha_{sp} \leq 1$ und $\alpha > 0,6$)

$$\text{Radienverhältnis:} \quad \frac{r_F}{r_1} = \sqrt{1 + \frac{\alpha}{\alpha_{sp}} (q^2 - 1)} \quad (35)$$

$$\text{Impedanz:} \quad Z_{RS} = \frac{1}{\omega C_{RS}} = \frac{\ln[1 + \frac{\alpha}{\alpha_{sp}} (q^2 - 1)]}{4\pi L \epsilon_0 \omega} \cdot \frac{1}{\epsilon_{sp}} \quad (36)$$

Es zeigt sich, dass im interessierenden Bereich ($\alpha > 0,6$) mit einer maximalen Abweichung von +0,5% gesetzt werden kann:

$$\frac{\alpha_{sp} \ln[1 + \frac{\alpha}{\alpha_{sp}} (q^2 - 1)]}{\ln[1 + \alpha (q^2 - 1)]} \approx 1 - 0,118(1 - \alpha_{sp})$$

$$\text{und:} \quad \ln[1 + \alpha (q^2 - 1)] \cdot [1 - 0,118\alpha(1 - \alpha)] \approx 2\alpha \ln q$$

$$\text{Mithin:} \quad \ln[1 + \frac{\alpha}{\alpha_{sp}} (q^2 - 1)] \approx \frac{1 - 0,118(1 - \alpha_{sp})}{1 - 0,118(1 - \alpha)} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{sp}} \cdot 2 \ln q$$

Führt man für den unbekanntenen Dampfgehalt α_{sp} im Raum zwischen Wasserfilm und Innenelektrode eine dimensionslose Grösse n ein, die das Verhältnis der Wassergehalte ($1 - \alpha_{sp}$) in diesem

Raum zu dem des gesamten Raumes $(1-\alpha)$ darstellt, so gilt:

$$n = \frac{1-\alpha_{sp}}{1-\alpha} \quad (37)$$

Für $n = 0$ ist $\alpha_{sp} = 1$, d.h. Ringströmung mit reinem Dampf

$$(\epsilon_{sp} = \epsilon_D = 1) \text{ über dem Wasserfilm}$$

Für $n = 1$ ist $\alpha_{sp} = \alpha$, d.h. Nebelströmung ohne Wasserfilm

$$(r_F = r_1).$$

Mit der Impedanz der Nebelströmung ($n = 1$)

$$Z_{NS} = \frac{\ln q}{2\pi l \epsilon_0 \omega} \cdot \frac{1}{\epsilon_{NS}} \quad (38)$$

wobei die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_{NS} entsprechend Gleichung (32 a):

$$\epsilon_{NS} = \frac{3-2\alpha}{\alpha} \left[1 - (1-\alpha) \tau(\tau_w) \right] \quad (39)$$

$$\tau(\tau_w) = 0,114 + 0,02 e^{0,84(\tau_w/100)}$$

ergibt sich die Impedanz der Ringströmung:

$$Z_{RS} = Z_{NS} \frac{1-0,118(1-\alpha)n}{1-0,118(1-\alpha)} \cdot \frac{1+2(1+\alpha)}{1+2(1-\alpha)n} \cdot \frac{1-(1-\alpha)\tau(\tau_w)}{1-(1-\alpha)\tau(\tau_w)n} \quad (40)$$

Wird, wie im vorliegenden Fall, mit einer Sonde aus mehreren Ringspalten gemessen und liegt eine Zweiphasen-Ringströmung vor, so zeigen beispielsweise die inneren Elektrodenpaarungen alle gleiche Impedanzwerte für Nebelströmung an (abgesehen von den kompensierbaren Einflüssen für verschiedene geometrische Abmessungen der Sonden, d.h. $q = r_2/r_1$) und nur der äussere Ringspalt weist eine geringere Impedanz auf. Da in diesem Messkanal zwischen dem Wasserfilm an der äussersten und der nächst inneren Elektrode aber der gleiche Dampfgehalt α_{sp} herrscht wie in den inneren Ring-

spalten mit reiner Nebelströmung, lässt sich mit Gleichung (40) der Dampfgehalt im äusseren Ringspalt bestimmen und damit die Dicke des Wasserfilms.

Bezüglich der Messgenauigkeit bei Ringströmung gilt das gleiche wie bei der Pfropfenströmung gesagt: Besteht noch eine dünne Wasserbrücke zwischen dem Wasserfilm und der anderen Elektrode, kann das Messergebnis erheblich verfälscht werden.

Zusammenfassung

In den Abbildungen 9 und 10 sind die Impedanzen Z des äusseren Ringspalttes der Sonde ($r_1 = 9,0$ mm; $r_2 = 10,2$ mm; $l = 25$ mm) für verschiedene Formen der Zweiphasenströmung in Abhängigkeit vom Dampfgehalt α dargestellt. Alle Kurven haben bei gleichem spezifischen elektrischen Widerstand gemeinsame Werte für $\alpha = 0$ (reiner Wasserwiderstand) und $\alpha = 1$ (reiner kapazitiver Widerstand des Dampfes). Für einen gemessenen Wert der Impedanz ergeben sich je nach Strömungsform stark unterschiedliche Dampfgehalte. Die Sonde muss einen Impedanzbereich von etwa 400Ω bis $1,4 \text{ M}\Omega$ überstreichen. Man erkennt aber zwei wesentlich verschiedene Bereiche:

- (a) Die Blasen- und Pfropfenströmung, bei der der kapazitive Anteil des Dampfes an der Gesamtimpedanz vernachlässigt werden kann und die normalerweise nur im Bereich $0 \leq \alpha \leq 0,6$ interessiert (Abb. 9).
- (b) Die Ring- und Nebelströmung, bei der der Widerstandsanteil des Wassers an der Gesamtimpedanz unberücksichtigt bleiben kann und die nur im Bereich $0,6 \geq \alpha \geq 1$ interessiert (Abb. 10).

Entsprechend Gleichung (10 a) wird der Dampfgehalt über eine Spannungsmessung vorgenommen, d.h. über den reziproken Wert der Impedanz ($1/Z$) = Admittanz. Es ist deshalb zweckmässig, den Verlauf der Admittanzen mit veränderlichem Dampfgehalt zu untersuchen

(Abb. 11).

Im ersten Falle der Blasen- und Pfropfenströmung (Abb. 9 und 11 oben) wird die Änderung der Leitfähigkeit des Wassers durch Temperatur- und Verunreinigungseinflüsse durch die Vergleichssonde bei $\alpha = 0$ ausgeglichen (bei hochreinem Wasser von 20°C kann mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von etwa $20\text{ k}\Omega\text{m}$ gerechnet werden, der sich mit steigender Temperatur und Verunreinigung stark verringert - bis etwa $1\text{ k}\Omega\text{m}$). Für die Messung des Dampfgehaltes in diesem Bereich der Zweiphasenströmung ($\alpha < 0,6$) stehen zwei Eichpunkte für die Sonde zur Verfügung, nämlich der Wert bei $\alpha = 0$ (wassergefüllte Sonde = Vergleichssonde) und bei $\alpha = 1$ (dampfgefüllte Sonde). Die Impedanz bei $\alpha = 1$ (etwa $1,4\text{ M}\Omega$) ist sehr vier grösser als bei $\alpha = 0$ (etwa 400Ω) und kann somit als Nullpunkt des Galvanometers angesehen werden. Ein Einfluss von Störkapazitäten ist in diesem Falle ausgeschlossen. Im interessierenden Bereich des Dampfgehaltes ($0 \leq \alpha \leq 0,6$) verringert sich die Admittanz um einen Faktor von etwa 3 (Abb. 11 oben).

In zweiten Falle der Ring- und Nebelströmung (Abb. 10 und 11 unten) sind die Impedanzen der Sonde bei gleichem Dampfgehalt α etwas von der Temperatur und stark vom relativen Wassergehalt im Spalt zwischen Wasserfilm und Elektrode $n = (1 - \alpha_{\text{sp}})/(1 - \alpha)$ abhängig. Bezieht man in diesem Bereich der Strömungsform die Impedanzen Z für den äusseren Ringspalt der Schalensonde auf einen Festwert von $500\text{ k}\Omega$ (ein unterer Wert, der sich bei Nebelströmung und $\alpha \approx 0,6$ ergibt), so verringern sich die Admittanzen mit steigendem Dampfgehalt (bis $\alpha = 1$) ebenfalls um einen Faktor von etwa 3 (Abb. 11 unten). Durch Anwendung einer Mehrfach-Schalensonde und gleichzeitige Messung der Temperatur, lässt sich - wie unter Punkt C beschrieben - der Dampfgehalt bei Ringströmung einigermaßen genau ermitteln. Voraussetzung dafür ist eine

homogene Verteilung der feinen Wassertröpfchen im Dampf und die damit verbundene Gültigkeit der maxwellschen Gleichung (32). Es erscheint widersinnig, dass bei gegebenem Dampfgehalt α die Impedanz mit steigender Wasserfilmdicke, d.h. abnehmendem Wert n , zunimmt: Betrachtet man eine Ringströmung mit konstantem Dampfgehalt α_{sp} im Raum zwischen Wasserfilm und Elektrode bei zunehmender Wasserfilmdicke (abnehmendem Radius r_F - Abb. 8 oben), so wird die Impedanz kleiner. Andererseits nimmt aber auch gemäss Gleichung (34) der Dampfgehalt des gesamten Raumes zwischen den Elektroden ab. Dieser letzte Einfluss überwiegt, womit sich die Darstellung in Abbildung 10 und 11 ergibt.

5. MITTLERER DAMPFGEHALT IN DER RINGSPALTSONDE

Der mittlere Dampfgehalt über den gesamten Sondenquerschnitt errechnet sich mit den Teilvolumina $V_n = A_n l$ und Teildampfgehalten α_n :

$$\alpha_M = \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n V_n}{\sum_{n=1}^N V_n} = \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n A_n}{A} \quad (41)$$

Die diesen Teildampfgehalten α_n entsprechenden Analogspannungen stehen am Ausgang jeder Messkette zur Verfügung, wobei der Wert $\alpha_n = 0$ jeweils einer Spannung $U_n = 10$ V entspricht. Setzt man $K_n = A_n/A$ als Anteil des jeweiligen Ringspaltquerschnitts am Gesamtquerschnitt in Gleichung (41) ein, so ergibt sich:

$$\alpha_M = \sum_{n=1}^N K_n \alpha_n \quad (42)$$

Die Werte K_n können der Tabelle im 2. Abschnitt entnommen wer-

den. Da für $\alpha_n = 0$ die Spannung $U_n = 10$ V für alle Messketten ist, gilt für die Spannung in Abhängigkeit von α_n : $U_n = K_n U_n(\alpha_n)$ und mithin ist die Spannung, die dem mittleren Dampfgehalt α_M entspricht:

$$U(\alpha_M) = \sum_{n=1}^N K_n U_n(\alpha_n) \quad (43)$$

Der in Abbildung 2 dargestellte Operationsverstärker (Σ) erfüllt die Bedingung der Gleichung (43), wobei für $K_n = A_n/A = R/R_n$ die Werte der Tabelle im 2. Abschnitt herangezogen wurden. Der damit gebaute Rechner erfüllt Gleichung (41) zur Ermittlung des mittleren Dampfgehaltes α_M . Das Analogsignal beträgt 10 V für $\alpha_M = 0$ und ist durch Umschaltung des Galvanometers der Ringspaltsonde 4 (Abb. 2 oben) direkt ablesbar oder steht zur weiteren Auswertung am Ausgang zur Verfügung.

6. VERSUCHSMÄSSIGE ERPROBUNG DER SONDE BEI STATIONÄREN ZWEIPHASENSTRÖMUNGEN

Die beschriebene Sonde mit vier Ringspalten wurde in einem Eichkreislauf mit gut einstellbaren Luft- und Wassermengen unter stationären Bedingungen im Bereich der Blasenströmung ($\alpha < 0,6$) quantitativ und im Bereich der Ringströmung ($\alpha > 0,8$) qualitativ erprobt. Jeder einzelne Ringspalt konnte durch Verschliessung der übrigen Spalte mit Dichtmasse getrennt untersucht werden. Die Versuche wurden mit vollentsalztem Wasser bei Raumtemperatur und unter Normaldruck durchgeführt, wobei die Zweiphasenströmung nach einer geraden Anlaufstrecke die Sonde von unten nach oben durchströmte.

Die Anzeige der Galvanometer für die vier einzelnen Sondenspalte wurde jeweils mit dem Dampfgehalt, der sich aus den zugeführten Luft- und Wassermengen ergab, verglichen. Es wurden mehrere Messreihen

an verschiedenen Tagen durchgeführt um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Man erkennt die gute Übereinstimmung (vor allem für die Spalte 3 und 4) zwischen dem wirklichen Dampfgehalt und der Anzeige der Galvanometer, die für die beiden Endwerte bei $\alpha = 0$ ($U = 10 \text{ V}$) und $\alpha = 1$ ($U \approx 0 \text{ V}$) geeicht waren.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden bei vorgegebenen Luft- und Wassermengen am Eichkreislauf der wirkliche Dampfgehalt mit den Anzeigen der vier Galvanometer und dem daraus nach Gleichung (41) berechneten mittleren Dampfgehalt verglichen (Tabelle 2). Auch hier ist die Übereinstimmung befriedigend.

Die Referenzsonde zum Ausgleich der Änderung der Leitfähigkeit des Wassers lag bei allen Versuchen an einer Stelle im Kreislauf, an der mit Sicherheit keine Luftblasen auftraten und befand sich immer in strömendem Wasser.

Im Eichkreislauf war es ebenfalls möglich, in der Messsonde eine Ringströmung zu erzeugen, bei der nur im äusseren der vier Spalten ein Wasserfilm auftrat. Am Ausschlag der Galvanometer für die einzelnen Spalte liess sich qualitativ deutlich die Strömungsform erkennen: Das Galvanometer des äusseren Spaltes zeigte einen niedrigen Dampfgehalt und die drei anderen Galvanometer für die inneren Spalte einen hohen Dampfgehalt an.

SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Die entwickelte Ringspaltsonde ist, wie die stationär durchgeführten Versuche mit Wasser-Luftgemischen gezeigt haben, zur Bestimmung des mittleren Dampfgehaltes bei homogenen Zweiphasenströmungen gut geeignet. Sie erlaubt ferner, bestimmte inhomogene Strö-

mungsformen (wie Pfropfen- und Ringströmung) qualitativ zu erkennen und unter den gemachten Einschränkungen auch quantitativ auszuwerten. Die Genauigkeit in der Bestimmung der Ausdehnung der Strömungsform über den Messquerschnitt wächst mit der Zahl der Spalte. Andererseits steigt damit der Druckverlust der Zweiphasenströmung in der Sonde, womit die Zahl der Elektroden begrenzt ist.

Die Autoren möchten den Herren G. Bonvini und W. Schulze für die Durchführung der Messungen danken.

LITERATUR

- [1/ GOLDMANN, K., FIRSTENBERG, H., LOMBARDI, C.;
"Burnout in Turbulent Flow - A Droplet Diffusion Model."
ASME 60 - HT - 34 (1960)
- [2/ HERKENRATH, H., MOERK-MOERKENSTEIN, P.;
"Grundzüge der Probleme auf dem Gebiet der Blasen-
und Filmverdampfung."
EUR 2211.d (1964)
- [3/ CIMORELLI, L., PREMOLI, A.;
"Measurement of Void Fraction with Impedance Gauge
Technique."
Energia Nucl., 13 (1966) 12
- [4/ ORBECK, L.;
"Impedance Voidmeter."
KR-32, Nov. 1962

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TABELLEN

- Abb. 1 Ringspaltsonde
- Abb. 2a Allgemeines Prinzipschaltbild
- Abb. 2b Blockdiagramm
- Abb. 3 Schematische Darstellung der Ringspaltsonde mit
Verzögerungs- (L_V) und Beschleunigungsstrecke (L_B)
- Abb. 4 Prinzip des Regelkreises
- Abb. 5 Berechnung der Ringspaltsonde
- Abb. 6 Sondendipol
- Abb. 8 Ringströmungsformen
- Abb. 9 Impedanz des äusseren Ringspaltes der Sonde bei
Pfropfen- und Blasenströmung für verschiedene spe-
zifische elektrische Widerstände des Wassers
- Abb. 10 Impedanz des äusseren Ringspaltes der Sonde bei Ring-
und Nebelströmung für verschiedene Temperaturen und
Dampfgehalte im Spalt zwischen Innenelektrode und
Wasserfilm
- Abb. 11 Verhältnis der Admittanz bei Pfropfen- und Blasenströ-
mung (oben) zum Wert des reinen Wassers und bei Ring-
und Nebelströmung (unten) zum Festwert von $Z_{500} =$
 $500 \text{ k}\Omega$ für den äusseren Ringspalt der Sonde.
- Tab. 1 Vergleich der wirklichen Dampfgehalte mit den Galvano-
meteranzeigen für die Einzelversuche (jeweils nur ein
Spalt geöffnet) bei Blasenströmung
- Tab. 2 Vergleich der wirklichen Dampfgehalte mit dem Mittel-
wert der Anzeigen von vier Ringspalten (Gleichung (41))
bei Blasenströmung.

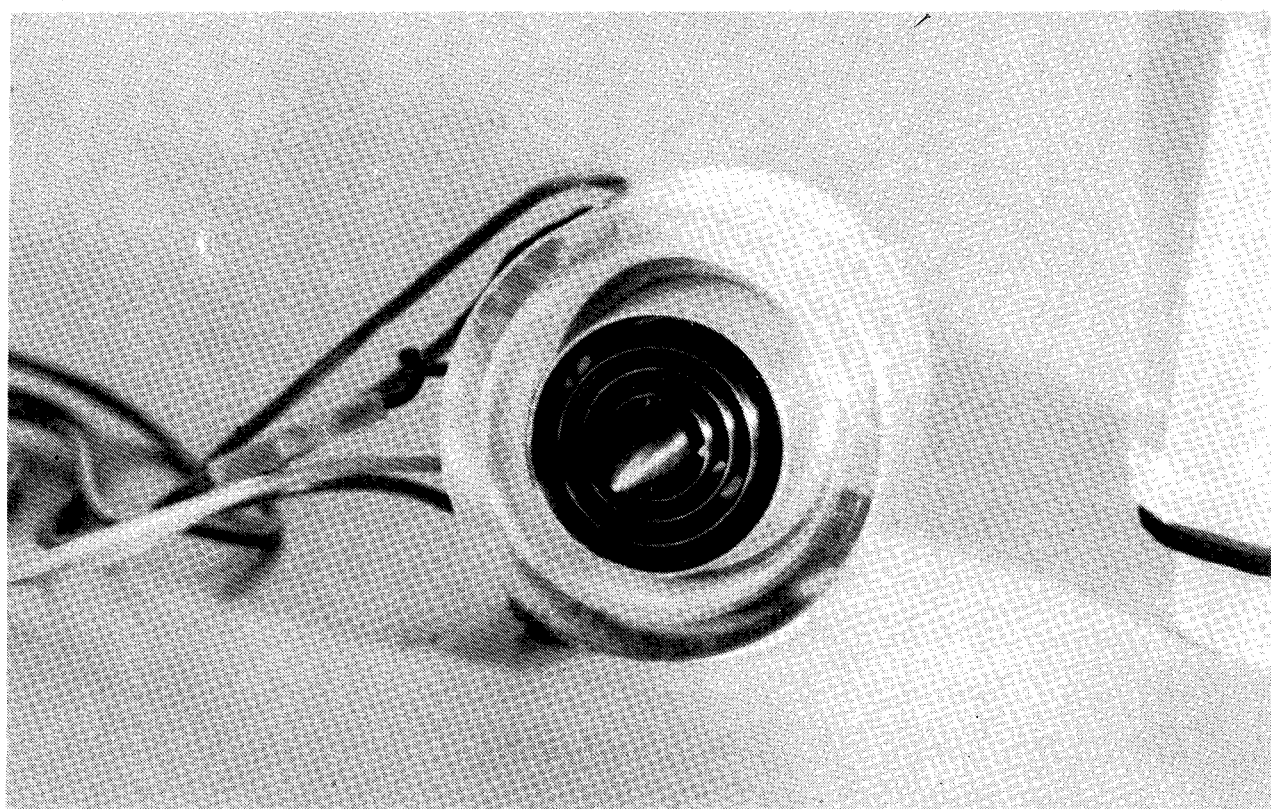
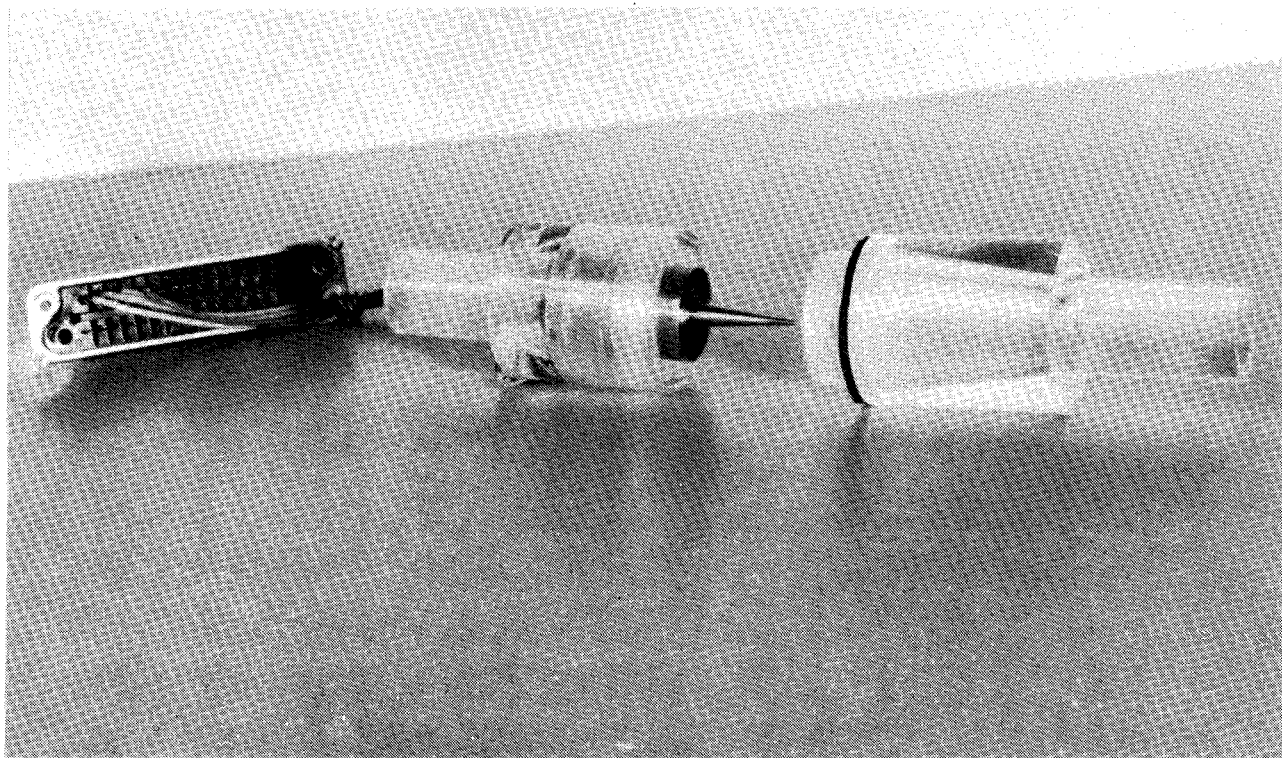


Abb. 1 Ringspaltsonde

Sonde zur Dampfgehaltsbestimmung

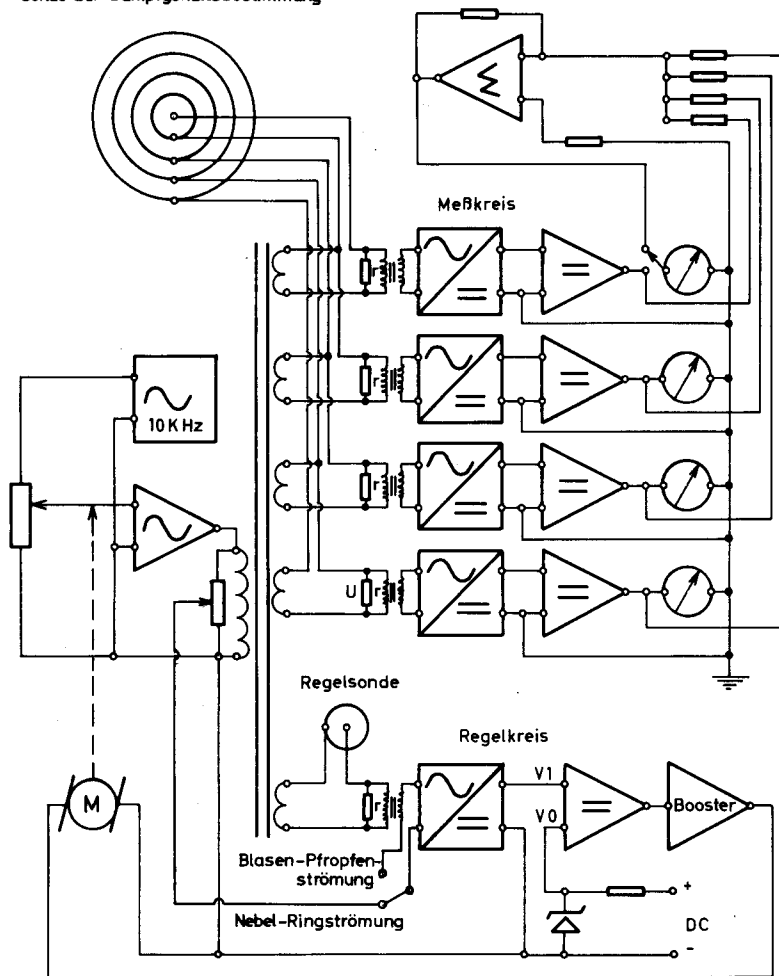


Abb. 2a: Allgemeines Prinzipschaltbild

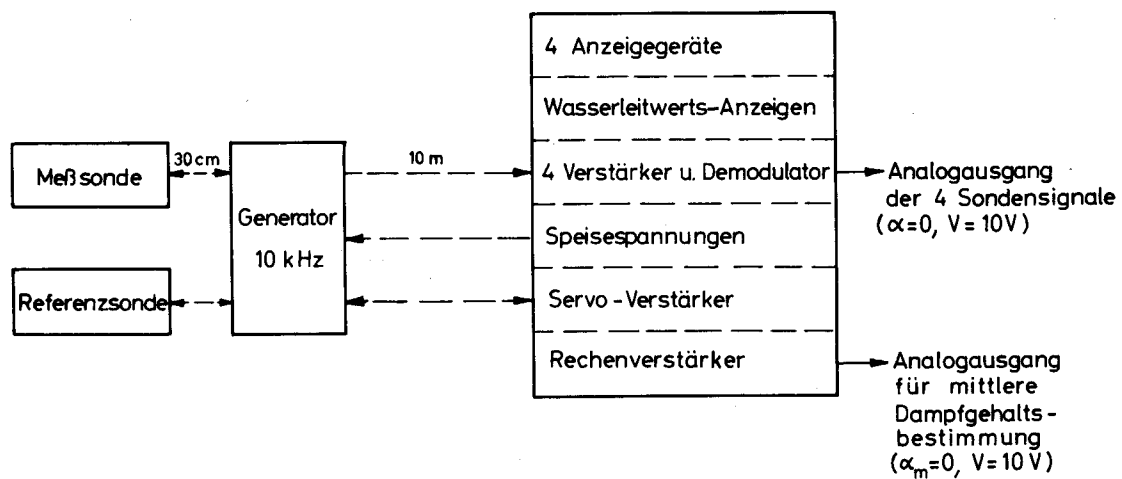


Abb. 2 b: Blockdiagramm.

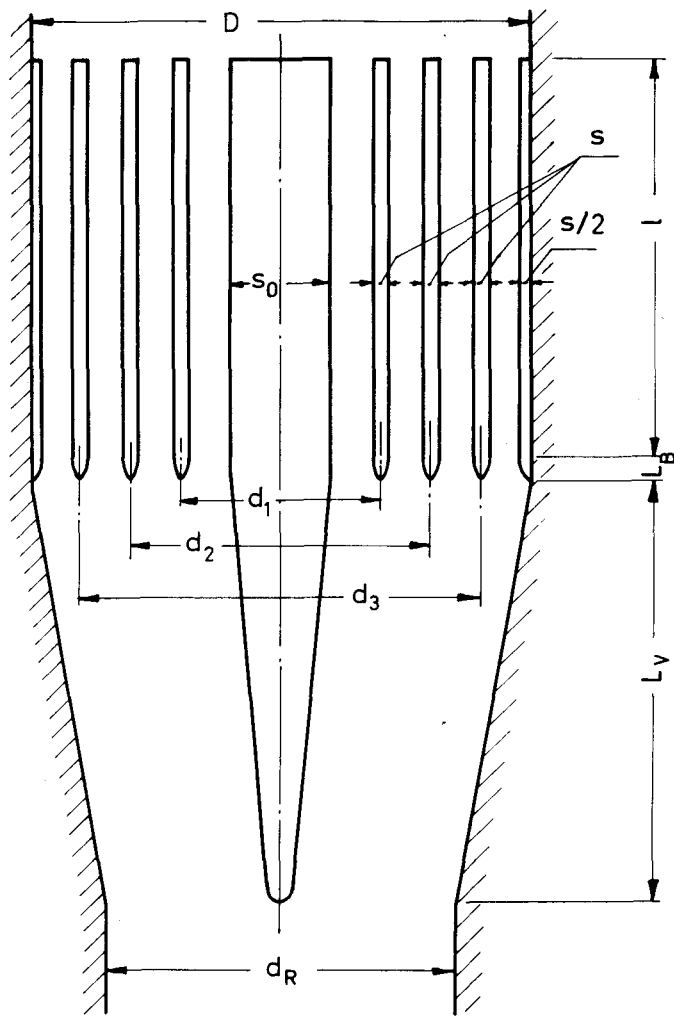


Abb. 3 Schematische Darstellung der Ringspaltsonde mit Verzögerungs- (L_V) und Beschleunigungsstrecke (L_B).

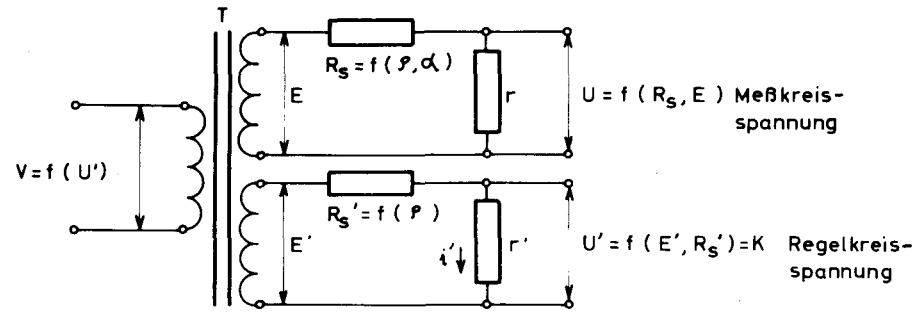


Abb. 4: Prinzip des Regelkreises

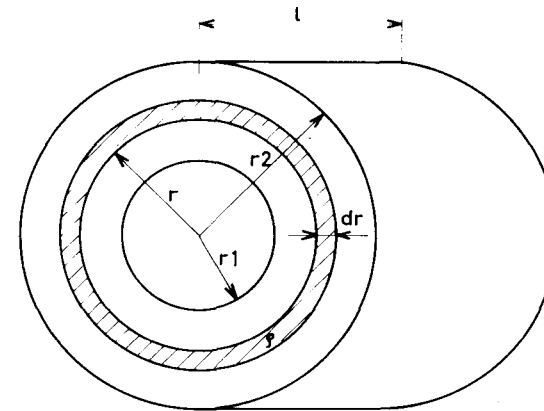


Abb. 5: Berechnung der Ringspaltsonde

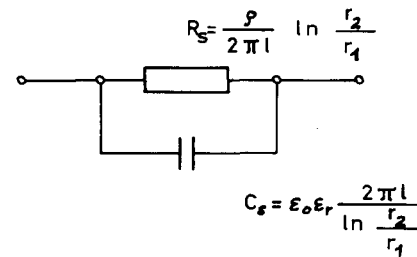


Abb. 6: Sondendipol

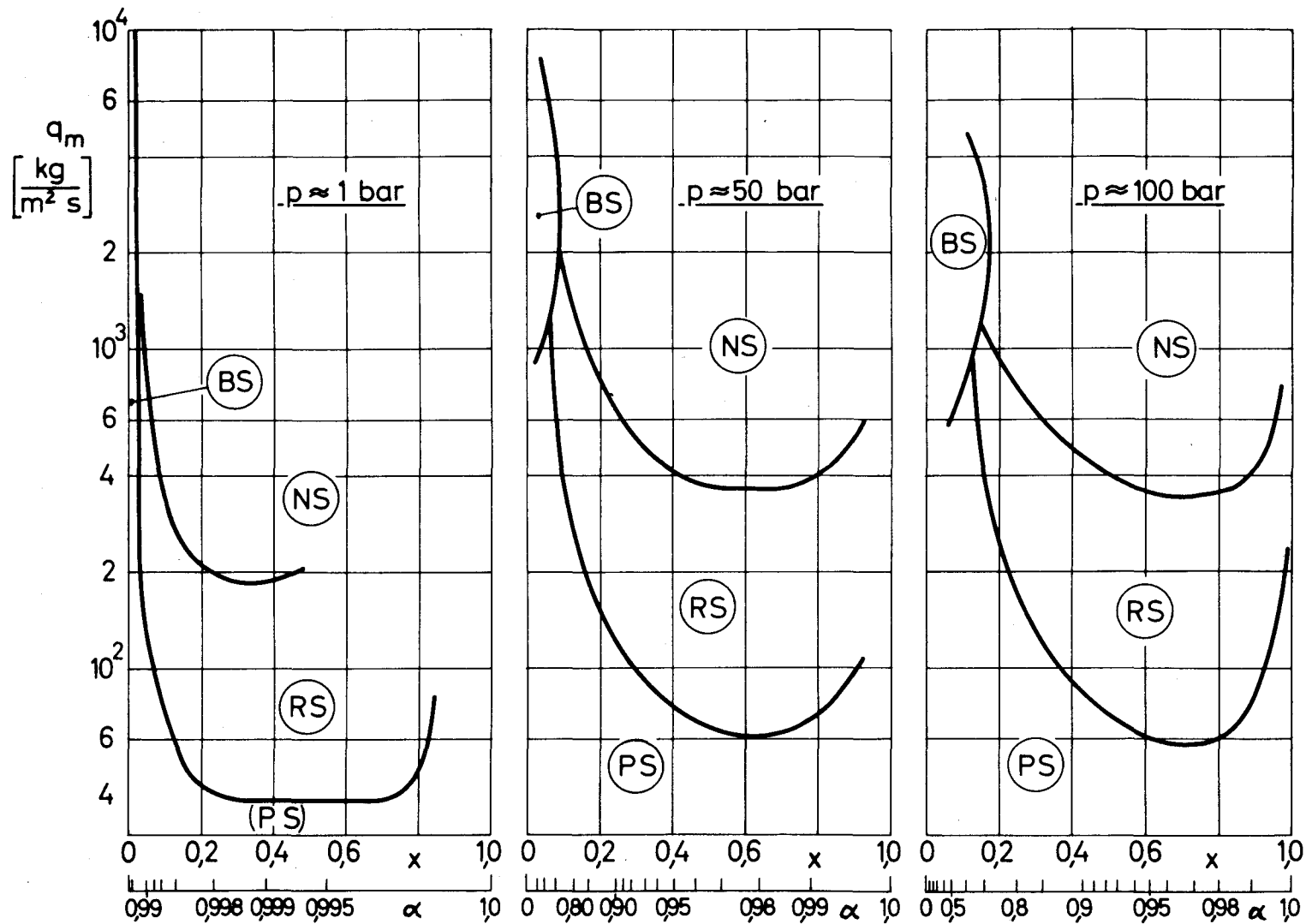
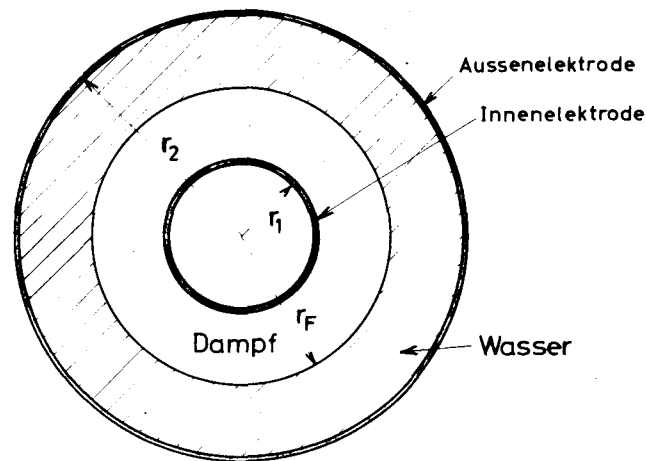
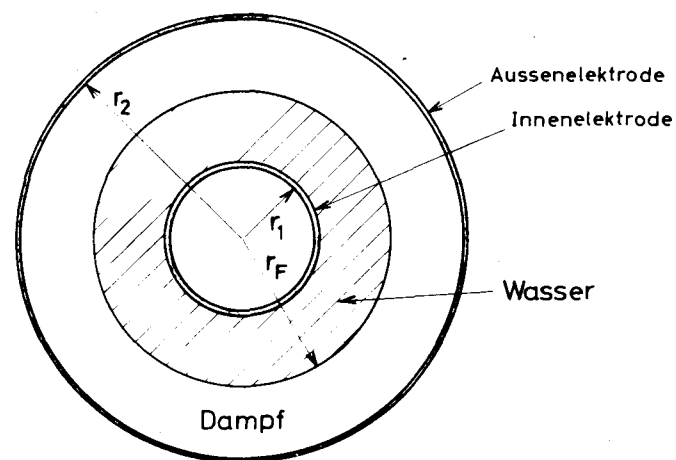


Abb.7: Bereiche der Zweiphasenströmung (BS=Blasen-, PS=Pfcropfen-, RS=Wasserring-, NS=Nebelströmung) in Abhängigkeit der Gesamtmengenstromdichte q_m und des Dampfgehaltes x [kg Dampf/kg Gemisch] bzw. α [m^3 Dampf/ m^3 Gemisch] (bei Schlupf $S=1$) für verschiedene Drücke im senkrechten Rohr (nach [1][2]).



a) Wasserfilm an der Aussenwand (Sondenquerschnitt.)



b) Wasserfilm an der Innenwand (Sondenquerschnitt.)

Abb. 8: Ringströmungsformen.

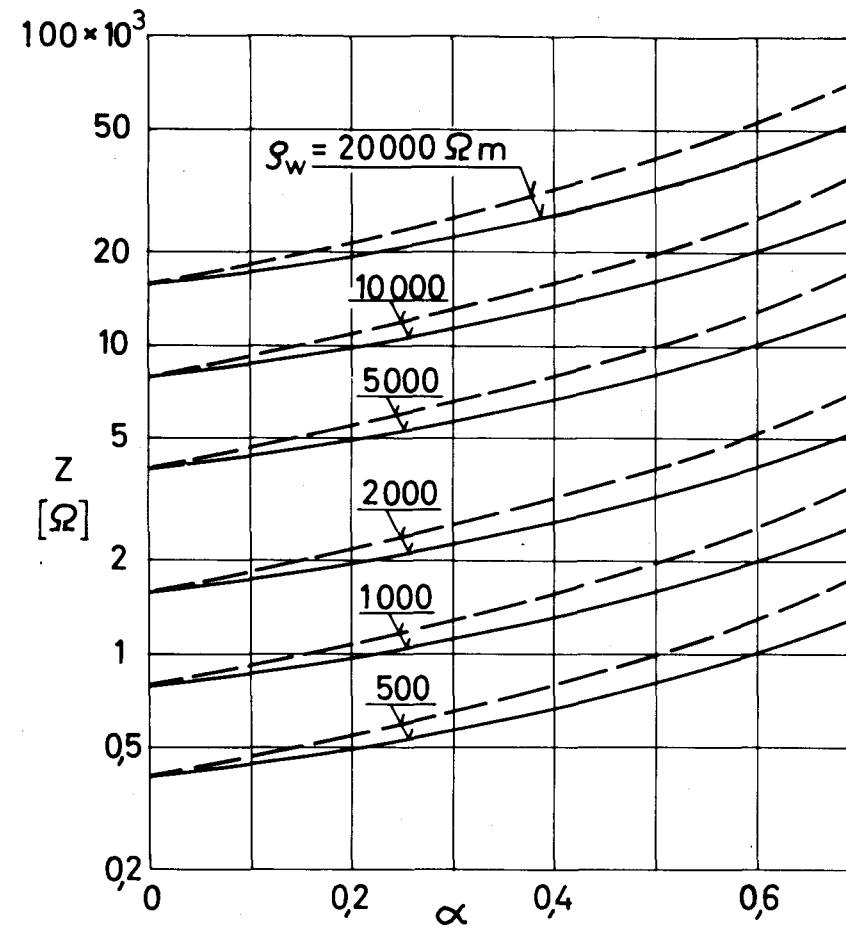


Abb. 9: Impedanz des äußeren Ringspaltes der Sonde ($r_1 = 9,0$ mm; $r_2 = 10,2$ mm; $l = 25$ mm) bei Pfropfenströmung (—) und Blasenströmung (---) für verschiedene spezifische elektrische Widerstände des Wassers.

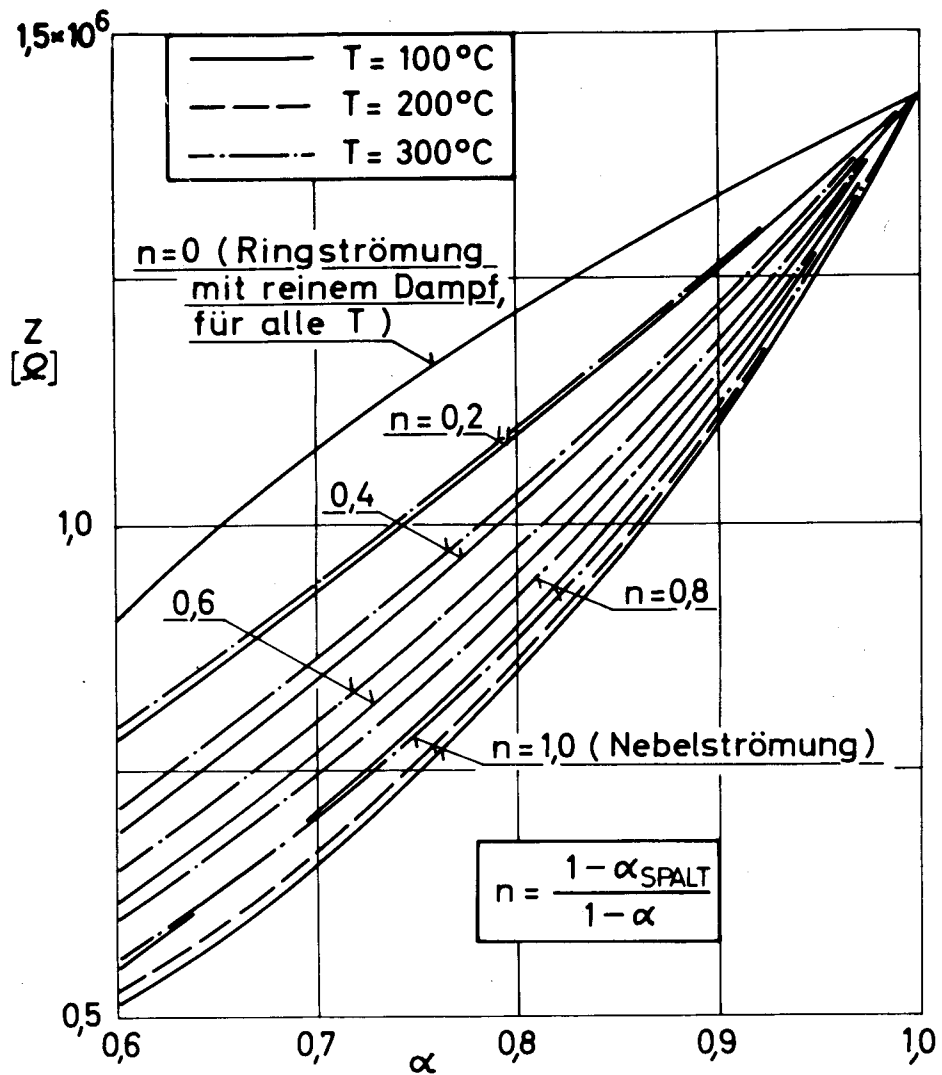


Abb. 10: Impedanz des äußeren Ringspaltes der Schalensonde ($r_1=90$ mm; $r_2=102$ mm; $l=25$ mm) bei Ring- und Nebelströmung für verschiedene Temperaturen und Dampfgehalte im Spalt zwischen Innenelektrode und Wasserfilm.

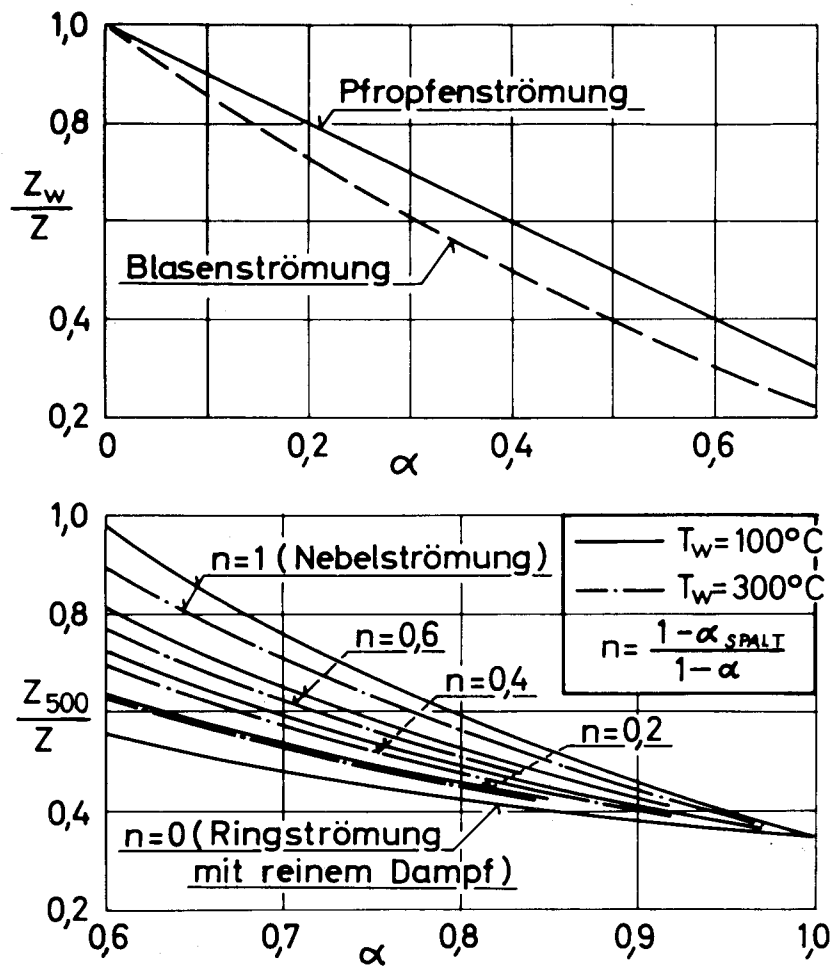


Abb. 11: Verhältnis der Admittanz ($1/Z$) bei Pflöpfen- und Blasenströmung (oben) zum Wert des reinen Wassers ($1/Z_w$) und bei Ring- und Nebelströmung (unten) zum Festwert von $Z_{500}=500$ k Ω für den äußeren Ringspalt der Sonde ($r_1=90$ mm; $r_2=102$ mm).

Anzeige am Galvanom.	Dampfgehalt [%] für Ringspalt			
	1	2	3	4
0	0	0	0	0
10	12	12	11	2
20	26	23	18	—
30	40	34	28	30
40	50	45	39	41
50	63	55	50	50
60	—	—	62	59
0	0	0	0	0
10	14	14	11	9
20	27	22	17	20
30	39	34	30	30
40	50	43	40	41
50	63	55	51	50
60	—	—	62	59
0	0	0	0	0
10	15	11	11	10
20	27	21	20	20
30	39	32	30	30
40	50	46	40	39
50	63	55	51	50
60	—	—	62	59

Tab.1: Vergleich der wirklichen Dampfgehalte mit den Galvanometeranzeigen für die Einzelversuche (jeweils nur ein Spalt geöffnet) bei Blasenströmung.

Dampfgehalt [%]	Anzeige [%] am Galvanometer für Ringspalt				mittlerer Dampfgehalt nach Gl.41 [%]
	1	2	3	4	
0	0	0	0	0	0
11,2	10	9	7	7	8,8
16,6	20	15	12	12	20,5
25,1	30	24	18	18	28,7
35,6	40	34	34	19	37,2
43,6	48	50	39	15	47,4
53,0	50	60	63	32	58,9

Tab.2: Vergleich der wirklichen Dampfgehalte mit dem Mittelwert der Anzeigen von 4 Ringspalten (Gl.41) bei Blasenströmung.

AN UNSERE LESER

Alle von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten wissenschaftlichen und technischen Berichte werden in der Monatszeitschrift „euro-abstracts“ angezeigt. Abonnement (1 Jahr: BF 1 025,—) und Probehefte sind erhältlich bei:

**Amt für amtliche Veröffentlichungen
der Europäischen Gemeinschaften
Case postale 1003
Luxembourg**

VERTRIEBSSTELLEN

Alle von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten Dokumente werden durch das Amt für amtliche Veröffentlichungen bei den unten angegebenen Adressen zu dem auf dem Umschlag angegebenen Preis verkauft. Bei schriftlicher Bestellung bitte die genaue Referenz und den Titel des Dokumentes deutlich angeben.

DEUTSCHLAND (BR)

Verlag Bundesanzeiger
5 Köln 1 — Postfach 108 006
Tel. (0221) 21 03 48
Fernschreiber: Anzeiger Bonn 08 882 595
Postscheckkonto 834 00 Köln

BELGIEN

Moniteur belge — Belgisch Staatsblad
Rue de Louvain 40-42 — Leuvenweg 40-42
1000 Bruxelles — 1000 Brussel — Tel. 12 00 26
CCP 50-80 — Postgiro 50-80

Nebenstelle:
Librairie européenne — Europese Boekhandel
Rue de la Loi 244 — Wetstraat 244
1040 Bruxelles — 1040 Brussel

DÄNEMARK

J.H. Schultz — Boghandel
Møntergade 19
DK 1116 København K — Tel. 14 11 95

FRANKREICH

*Service de vente en France des publications
des Communautés européennes — Journal officiel*
26, rue Desaix — 75 732 Paris - Cédex 15°
Tel. (1) 306 51 00 — CCP Paris 23-96

GROSSHERZOGTUM LUXEMBURG

*Amt für amtliche Veröffentlichungen
der Europäischen Gemeinschaften*
Case postale 1003 — Luxembourg
Tel. 4 79 41 — CCP 191-90
Compte courant bancaire: BIL 8-109/6003/200

IRLAND

Stationery Office — The Controller
Beggar's Bush
Dublin 4 — Tel. 6 54 01

ITALIEN

Libreria dello Stato
Piazza G. Verdi 10
00198 Roma — Tel. (6) 85 08
CCP 1/2640

NIEDERLANDE

Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf
Christoffel Plantijnstraat
's-Gravenhage — Tel. (070) 81 45 11
Postgiro 42 53 00

VEREINIGTES KÖNIGREICH

H.M. Stationery Office
P.O. Box 569
London S.E. 1 — Tel. 01-928 69 77, ext. 365

VEREINIGTE STAATEN VON AMERIKA

European Community Information Service
2100 M Street, N.W.
Suite 707
Washington, D.C., 20 037 — Tel. 296 51 31

SCHWEIZ

Librairie Payot
6, rue Grenus
1211 Genève — Tel. 31 89 50
CCP 12-236 Genève

SCHWEDEN

Librairie C.E. Fritze
2, Fredsgatan
Stockholm 16
Post Giro 193, Bank Giro 73/4015

SPANIEN

Libreria Mundi-Prensa
Castello 37
Madrid 1 — Tel. 275 51 31

ANDERE LÄNDER

*Amt für amtliche Veröffentlichungen
der Europäischen Gemeinschaften*
Case postale 1003 — Luxembourg
Tel. 4 79 41 — CCP 191-90
Compte courant bancaire: BIL 8-109/6003/200