



KfK 2731B
Februar 1979

Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen- Massenstrommeßverfahren

Anlagenbeschreibung

H. John, J. Reimann
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 2731 B

Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen
und Kalibrieren verschiedener Zwei-
phasen-Massenstrommeßverfahren.
Anlagenbeschreibung

von

H. John
J. Reimann

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Außer den Autoren waren an der Entwicklung und dem Aufbau der beschriebenen Anlagen folgende Institutskollegen wesentlich beteiligt:

H. Alsmeyer, G. Arnold, S. Barth, A. Demski, H. Hahn, U. Harten, A. Megerle, St. Müller, L. Pawlak, E. Wanner, P. Weinbrecht, W. Wolf

sowie die Herren R. Löffel (KfK-LIT) und W. Heep, U. Padligur (KfK-ADI). Ihnen sei hiermit gedankt.

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung
2. Technische Beschreibung der Anlage
 - 2.1 Dampf-Wasser-Kreislauf
 - 2.1.1 Mischkammer
 - 2.1.2 Teststrecke
 - 2.2 Luft-Wasser-Kreislauf
 - 2.3 Leistung der Anlage
 - 2.4 Betrieb der Anlage
3. Referenz-Messungen
 - 3.1 Bestimmung von Druck, Temperatur und Massenstrom im Dampf-Wasser-Betrieb
 - 3.1.1 Dampf-Wasser-Blendenmessung
 - 3.1.2 Berechnung der Dampf-Wasser-Daten mit dem Rechner
 - 3.1.2.1 Aufarbeitung der Meßsignale
 - 3.1.2.2 Aufsuchen von Dampf-Wasser-Stoffwerten
 - 3.1.2.3 Massenstromberechnung und Zweiphasen -Zustands-Parameter
 - 3.1.3 Genauigkeitsbetrachtungen der Dampf-Wasser-Blendenmessung
 - 3.2 Bestimmung von Druck, Temperatur und Massenstrom im Luft-Wasser-Betrieb
 - 3.3 Serielles 5-Strahl- γ -Densitometer zur Dichtebestimmung des Gemisches
 - 3.3.1 Grundlagen
 - 3.3.2 Beschreibung des γ -Densitometers
 - 3.4 Impedanz-Sonde
 - 3.4.1 Meßprinzip
 - 3.4.2 Sondenbauweise
 - 3.4.3 Anwendungsbeispiele
4. Teststrecken-Beobachtungsfenster
5. Betriebserfahrungen
6. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Für die im Rahmen der Reaktor-Sicherheitsforschung durchzuführen- den Experimente zum Kühlmittelverlust-Störfall ist eine möglichst genaue Meßmethode für den transienten Zweiphasen-Massenstrom erforderlich. Da keine der bekannten konventionellen Massenstrom- Meßmethoden einphasiger Flüssigkeiten für diesen Zweck un- mittelbar anwendbar sind, wurden an mehreren Stellen im In- und Ausland Methoden für die Messung zweiphasiger Flüssigkeitsströme entwickelt. Ein Prüfstand zum Testen solcher Meßgeräte unter realistischen Bedingungen, d.h. mit Dampf-Wasser-Gemischen bei hohen Drücken ist sehr aufwendig. Zum Vergleich dieser Meßge- räte wurde deshalb mit Unterstützung des BMFT im KfK-IRB ein "Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiede- ner Zweiphasenmassenstrommeßverfahren" (PNS 4215, 4137) ent- wickelt und errichtet. Dieser, ursprünglich für Dampf-Wasser- Betrieb konzipierte, später auch für Luft-Wasser-Betrieb er- weiterte Kreislauf gestattet es, bis zu einem Massenstrom von ca. 5 kg/s und Drücken bis zu 150 bar bei Dampf-Wasser-Strömung und ca. 30 kg/s bei 5 bar bei Luft-Wasser-Strömung Zweiphasen- Meßinstrumentierungen unter stationären Bedingungen zu testen und zu kalibrieren. Je nach Rohrdurchmesser und Betriebszustand kann dabei ein breites Band von Phasenverteilungsformen durch- fahren werden. Aufgabe dieses Berichtes ist es, eine Beschrei- bung des Versuchsstandes und der Referenzmeßeinrichtungen zu geben. Letztere bestehen aus der Massenstrom-, Druck-, Tempera- turmessung, der Bestimmung der Strömungsform und Phasenvertei- lung mittels Impedanzsonde und der Dichtemessung mittels 5-Strahl- γ -Densitometer. Es wird außerdem die Signalauswertung mit einem on-line-betriebenen Rechner bis zum Ausdruck der wichtigsten Referenzwerte beschrieben. Weitere Einzelheiten sind aus /1, 2, 3, 4, 8/ zu entnehmen.

2. Technische Beschreibung der Anlage

2.1 Dampf-Wasser-Kreislauf

Abb. 1 zeigt das Rohrleitungsschema der für den Dampf-Wasser-Versuchsbetrieb benutzten Anlage. Abb. 2 zeigt das Schema des Versuchskreislaufs.

Zwei unterschiedliche Dampfkessel, ein Benson- und ein Henschelkessel mit unterschiedlicher Liefermenge, versorgen den Versuchstand mit Wasser und Dampf. Je nach angestrebtem Dampfgehalt wird ein Kessel zur Lieferung von Siedewasser (leicht unterkühlt) und der andere zur Lieferung von Sattdampf (leicht überhitzt) herangezogen. Beide Kessel werden gemeinsam zur Wasserlieferung herangezogen, wenn Dampf durch Drucksenkung in Drosselventilen vor der Teststrecke erzeugt wird.

Nach den Kesseln werden die einphasigen Massenströme mit Blenden gemessen. Wegen der verschiedenen Betriebsweisen muß jeder Kessel mit je einer Dampf- und einer Wassermeßstrecke ausgestattet werden (Einzelheiten in Abschnitt 3.1.1). Nach den Meßstrecken gelangen die beiden einphasigen Ströme über je ein Sintermetallfilter und ein Drosselventil zur Mischkammer (Abschnitt 2.1.1), wo sie zusammengeführt werden. Durch die Sintermetallfilter (Siperm R80), die eine Filterfeinheit von 80 µm haben, soll der Austrag von größeren Partikeln aus dem ferritischen Rohrleitungssystem in die Teststrecke zum Schutz sensibler Testgeräte verhindert werden.

Nach der Mischkammer strömt das Gemisch über ein Rohrstück (1,36 m), das den Abzweig zum Bypaß enthält, zur eigentlichen Teststrecke (Abschnitt 2.1.2). Hinter der Teststrecke liegt das elektrisch betriebene Druckhalteventil, mit dem der Teststreckendruck automatisch geregelt wird. Nach dem Ventil strömt das entspannte Gemisch zu zwei parallel geschalteten Kondensatoren, die mit Kühlturmwater gekühlt werden.

Bei Versuchen, bei denen am Anfang der Teststrecke radioaktive Tracer injiziert werden, wird durch ein Dreiwegeventil der gesamte kontaminierte Massenstrom statt zu den Kondensatoren zu einem teilweise mit kaltem Wasser gefüllten 5 m³-Behälter geleitet. Mittels eines gelochten Rohres wird der Zweiphasen-Massenstrom in das Wasser dispergiert und kondensiert. Die radioaktiven Tracer werden dort bis zum Abklingen zurückgehalten. Der freie Raum in diesem Behälter wird vor Einleiten des Gemisches aus Sicherheitsgründen evakuiert.

Von den beiden Kondensatoren wird das Kondensat zum Kondensatbehälter zurückgepumpt und damit der Kreis geschlossen. Die Kesselanlage ist mit einer Vollentsalzungs- und Entgasungsanlage ausgestattet.

2.1.1 Mischkammer

Aufgabe der Mischkammer ist es, die einphasig von den Drosselblenden kommenden Wasser- und Dampfströme zusammenzuführen und ein Zweiphasengemisch zu erzeugen, das in Bezug auf den späteren Einsatzbereich der Zweiphasen-Massenstrom-Meßgeräte als tyisch zu bezeichnen ist. Die wichtigsten Anforderungen an die Mischkammer sind:

- a) Schnelles Erreichen thermischen Gleichgewichts zwischen den Phasen.
- b) Stabiler Betrieb (keine Mischungs-Oszillationen).

Die Abb. 3 zeigt die Schnittzeichnung der Mischkammer. Kernstück der Mischkammer ist ein sich erweiterndes, dünnwandiges Rohr mit ca. 800 Bohrungen von 2 mm Durchmesser in der Rohrwand. Die Achsen der Bohrungen sind von der radialen Richtung um 15° zur Strömungsrichtung der Rohrachse geneigt. Im Normalfall wird das Wasser durch das Rohr geleitet und der Dampf durch die 2 mm Bohrungen ins Wasser dispergiert. Bei entsprechend hoher Dampfgeschwindigkeit tritt eine innige Durchmischung beider Phasen ein, womit die Forderung a) erfüllt ist. Diese Forderung ist deshalb wichtig, weil der typische Temperaturunterschied zwischen Dampf und Wasser etwa 40°C beträgt. Dieser Temperaturabstand vom Siedepunkt ist im Interesse einer stabilen Blendenmessung erforderlich. Ein ausreichend hoher Druck-

abfall an den Bohrungen des Mischerrohres wirkt außerdem bei eventuell auftretenden Mischungspulsationen dämpfend. Eine entsprechende Dämpfung für den Wasserstrom kann durch den Drosselkegel am Rohreintritt durch Handbetätigung eingestellt werden. Die Forderung b) wird durch diese Dämpfung erfüllt. Die Anzahl der Bohrungen für den Dampfdurchtritt kann durch Auflagen von Blechmanschetten reduziert und damit der Druckverlust für die beabsichtigte Betriebsweise optimiert werden.

Für die Anpassung an die Teststrecke kann die Mischkammer mit Mischerrohren der NW50 oder NW80, wie Abb. 4 zeigt, ausgerüstet werden.

Durch Drehen der Mischkammer um 180° (vor dem Einbau) können die Zuflüsse (Wasser, Dampf) vertauscht werden. In dem Fall würde der Dampf axial und das Wasser radial zum Mischerrohr fließen.

2.1.2 Teststrecke

Die Teststrecke besteht aus einer geraden waagerechten Rohrstrecke von 8 m Länge. Die Rohrstrecke wird aus Rohrstücken von verschiedener Länge und Nennweite gebildet, die mit Flanschen verbunden sind. Es stehen die Nennweiten 80, 50 und 25 und die Rohrabschnittlängen 2 m, 1,5 m, 1 m und 0,5 m zur Verfügung. Abb. 5 zeigt den mechanischen Aufbau der Teststrecke, Abb. 6 die zur Verfügung stehenden Rohrabschnitte und Abb. 7 die Kombinationsmöglichkeiten dieser Rohrabschnitte. Beim Einbau eines Testgerätes werden ein oder mehrere beliebige Rohrabschnitte durch das jeweilige Gerät ersetzt. Durch zwei Schieber kann die Teststrecke abgeriegelt und der Massenstrom ohne Veränderung des Betriebspunktes über den Bypaß geleitet werden. Der Mischkammereinsatz und das zwischen Mischkammer und Teststrecke befindliche Abzweigstück zum Bypaß können in zwei Nennweiten (80 und 50) eingebaut werden, um die Ausbildung der Strömung nach der Mischung möglichst wenig zu stören.

Die Teststreckenrohre bzw. Testgeräte werden auf einem kräftigen Unterbau (Abb. 5) auf rollenden Stützen gelagert, so daß thermische Dehnungen und starke Strömungskräfte (Oszillation) aufgefangen werden können. Abb. 20 zeigt ein Foto der Teststrecke ohne Einbau von Meßgeräten).

2.2 Luft-Wasser-Kreislauf

Beim Luft-Wasser-Betrieb wird der Kreislauf von einer Anlage versorgt, die aus 4 Kolbenkompressoren mit anschließender Luftkühlung und einer Kaltwasserumwälzpumpe mit einem drehzahlgeregelten Gleichstrommotor besteht. Der maximal erzielbare Druck ist ca. 10 bar. Zur Umstellung von Dampf-Wasser- auf Luft-Wasser-Betrieb werden lediglich die Anschlußleitungen zu den Mischkammerstutzen und die Austrittsleitung nach der 8 m Teststrecke gewechselt. Mischkammer und Teststrecke sind deshalb bei beiden Betriebsarten dieselben. Aus Abb. 1 ist die Anlage und aus Abb. 8 der Versuchsstand schematisch zu ersehen. Nach der Teststrecke wird das Luft-Wasser-Gemisch einem Zyklon zugeführt und anschließend die separierte Luft ins Freie und das Wasser einem Sammelbehälter zugeführt, aus dem die Pumpe ansaugt. Abb. 21 zeigt ein Foto des Behälters und der Pumpe. Die Massenstrombestimmung geschieht wie beim Dampf-Wasser-Betrieb mit Drosselblenden im einphasigen Zustand (Einzelheiten in Abschnitt 3.2).

2.3 Leistung der Anlage

Abb.9.1 zeigt den maximalen Massenstrom des Dampf-Wasser- und des Luft-Wasser-Gemisches über dem Gasanteil x aufgetragen. Beim Dampf-Wasser-Betrieb liegt dieser maximale Wert bei einem Teststreckendruck von 25-50 bar vor und ist bis zum Druck von 150 bar wegen der Kennlinie der Kesselspeisepumpe leicht rückläufig.

Die Luft-Wasser-Kurve ergibt sich aus der Addition der maximalen Fördermengen. Je nach Druckverlust der Anlage ist der erreichte Massenstrom geringer. Abb. 9.2 zeigt die gemessenen maximalen Werte für die Teststrecke mit 50 mm Durchmesser ohne Einbauten. Koordinaten sind die superficial velocities c_d und c_w der beiden Phasen (Verhältnis von Volumenstrom zu Querschnittsfläche).

2.4 Betrieb der Anlage

Der Betrieb der Anlage wird in folgender Weise durchgeführt:

Dampf-Wasser-Betrieb:

Je nach geplantem Versuchspunkt wird entschieden, welcher Kessel für Wasser- und welcher für Dampflieferung genommen wird. Die Kessel werden langsam (ca. 3° bis 5° je Minute) auf den Druck und die Temperatur des entsprechenden Versuchspunktes hochfahren. Die Fördermenge je Kessel entspricht dabei dem Versuchspunkt mit den maximalen Massenströmen. Der Druck in der Teststrecke wird durch eine automatische Druckregelung gehalten, deren Sollwertgröße entsprechend der erreichten Temperatur hochfahren wird. Der Betriebspunkt ist erreicht, wenn beim erreichten Versuchsdruck die Temperatur der einphasigen Massenströme an der Drosselblende einen sicheren Abstand vom Siedepunkt (ca. 10° bis 20°) hat, und die Anlage bezüglich Druck und Temperatur stabil ist. Vom Anfahren der Kessel bis zum ersten Betriebspunkt vergehen je nach angestrebtem Versuchsdruck 1 bis 2 Stunden. Eine Verringerung des Massenstromes durch die Teststrecke wird durch Öffnen des Bypaßventils hinter dem jeweiligen Kessel erreicht. Ein neuer Betriebspunkt bei konstantem Druck und konstanter Temperatur kann auf diese Weise in 10 bis 20 Minuten erreicht werden. Die Angabe des jeweils erreichten Betriebspunktes erhält man aus dem Ausdruck der on-line betriebenen Rechenanlage PDP 11/40 (Einzelheiten in Abschnitt 3.1). Werden beide Kessel zur Wasserlieferung herangezogen und Dampf durch Drosseln erzeugt, muß der Druck der Meßstrecken gegenüber der Teststrecke durch das Wasser-Drosselventil angehoben werden.

Eine schnelle Änderung des Dampfgehaltes in der Teststrecke wird in diesem Fall am besten durch Variation des Teststreckendruckes erreicht.

Luft-Wasser-Betrieb:

Die Betriebspunkte beim Luft-Wasser-Betrieb können im Gegensatz zum Dampf-Wasser-Betrieb schnell erreicht werden. Durch Verstellen der Handventile vor der Mischkammer (Abb. 8) und nach der Teststrecke,

und durch Variation der Wasserpumpendrehzahl werden die gewünschten Punkte angesteuert. Der Druck wird in dem Fall von Rohrfedermanometern abgelesen und die Massenströme aus der Δp -Anzeige der Drosselblenden an Quecksilber-Manometern errechnet.

3. Referenz-Messungen

3.1 Bestimmung von Druck, Temperatur und Massenstrom im Dampf-Wasser-Betrieb

3.1.1 Dampf-Wasser-Blendenmessung

Wie aus Abb. 2 ersichtlich, stehen für jeden Kessel zur Massenstrommessung zwei Meßstrecken mit Drosselblende, und zwar je eine für Wasser und eine für Dampfbetrieb zur Verfügung. Durch Handventile wird jeweils die entsprechende Meßstrecke geöffnet. Abb. 10 zeigt das Meß- und Regelschema des Dampf-Wasser-Kreislaufs und Abb. 11 die Liste der wichtigsten meß- und regeltechnischen Komponenten und ihre wichtigsten Daten. Die Temperaturen werden mit 1/8" NiCrNi Mantel-Thermoelementen gemessen.

Für die Druckmessung werden Hartmann und Braun-Meßumformer mit Rohrfeder-Meßwerk verwendet mit einer Genauigkeit $<0,5\%$ des Meßbereichs. Für die Δp -Messung an den Drosselblenden werden Hartmann und Braun-Meßumformer mit Membran-Meßwerk und einer Genauigkeit $<0,5\%$ verwendet. Alle H & B-Meßumformer lassen eine elektrische Meßbereichsverstellung bis etwa 20 % ihres Bereiches zu, wobei die Genauigkeit dann auf den reduzierten Bereich übertragen ist. Die Nennweiten 32, 65 und 100 sind an der Meßblende mit je 2 Meßumformern unterschiedlichen Meßbereichs ausgestattet. Die Meßbereiche (auf 100 % eingestellt) sind 2 bar und 0,25 bar. Im Eingang sind beide parallel geschaltet. Im Ausgang wird der jeweils günstigste Bereich gewählt. Durch eine zusätzliche Variationsmöglichkeit für die Drosselblenden kann die Meßgenauigkeit über einen großen Massenstrombereich noch weiter erhöht werden. Da das Auswechseln der Blenden jedoch mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden ist, wurde auf diese Möglichkeit beim Wasser-Dampf-Betrieb bisher verzichtet. Jede Meßstrecke hat zwei Thermoelemente (eines als Reserve), einen Druckaufnehmer und einen Differenzdruckaufnehmer. Die Signaldruckleitungen der Dampf-Drosselblenden (Ringkammerbauform) führen zu Kondenstöpfen, von denen je ein paar Leitungen zu den Meßumformern und einem Quecksilbermanometer gehen. Letztere können zur Kontrolle des Meßumformers eingesetzt werden.

Die Massenstrommessung mittels Drosselblende wird nach der bekannten Beziehung durchgeführt:

$$\dot{m} = \epsilon \cdot \alpha \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P / v}$$

ϵ = Expansionsfaktor (bei Wasser = 1)

α = Einlaufziffer der Blende

Δp = Druckdifferenz, an der Blende gemessen

v = spezifisches Volumen vor der Blende

A = Durchlaßquerschnitt der Blende

Δp ist der gemessene Wirkdruck an der Blende, v das spezifische Volumen des Mediums, das als Funktion aus der gemessenen Temperatur und dem Druck bestimmt wird (Dampf tabel) und A , α und ϵ die mit der Auslegung der Blende festgelegten Werte. Tab. 1 gibt die Auslegungswerte der 4 Meßstrecken und 7 Drosselblenden wieder. Die normalerweise verwendeten Blenden sind angekreuzt. In der konventionellen Massenstrommessung wird es meist als hinreichend genau angesehen, die Werte A , α und ϵ über einen größeren Meßbereich als konstant anzunehmen. In unserem Fall wird dieses vereinfachte Verfahren für Kontrollrechnungen bzw. bei Rechnerausfall verwendet. Mit den Auslegungswerten der in Tab. 1 genannten Werte und den Meßwerten erhält man dann den Massenstrom aus den vereinfachten Beziehungen.

$$\dot{m} = C_1 \cdot AZ_1 / 3,6 \cdot \sqrt{v} \quad \text{oder} \quad C_2 \cdot AZ_2 / 3,6 \cdot \sqrt{v} \quad | \text{kg/s} |$$

$$AZ_1 = \sqrt{\Delta P_2 / \Delta P}$$

$$AZ_2 = \sqrt{\Delta P_{0,25} / \Delta P}$$

AZ_1 und AZ_2 sind die dimensionslosen Anzeigen der radizierenden Wirkdruck-Meßumformer (0,25 und 2 bar). Die Konstanten C betragen für die einzelnen Meßstrecken und Δp -Meßbereiche:

Nennweite	32	50	65	100
Blenden-Nr.	13694	13695	13696A	13697A
C_1 (2 bar)	0,25763	0,60114	0,86869	2,17173
C_2 (2,5 bar)	0,091087	0,21254	0,30713	0,76782

Nennweite der Meßstrecke Medium Länge zwischen Flanschen m	32 Wasser 1,0		50 Wasser 1,0	65 Dampf 1,3		100 Dampf 1,8	
	13694	13694A	13695	13696	13696A	13697	13697A
Fabrik-Nr. der Drosselblende Normalerweise eingebaut	x		x		x		x
Wirkdruck mm Hg	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
Durchsatz t/h	6	3	14	4	4	10	10
Durchsatzbereich t/h	1,1-6		6-14	1,5-4	1,5-4	4-10	4-10
Druck vor Blende ata	165	165	165	10	50	10	50
Temperatur vor Blende °C	337	337	337	182	265	182	265
spez. Volumen vor Blende m ³ /kg	0,001588	0,001588	0,001588	0,1998	0,04081	0,1998	0,04081
kinematische Zähigkeit 10 ⁻⁷ m ² /s	1,24	1,24	1,24	30	7,88	30	7,88
Geschwindigkeit im Rohr m/s	3,29	1,64	3,16	67,8	13,75	71	14,5
Re-Zahl im Rohr x10 ⁻⁵	8,49	4,24	12,75	14,7	11,35	23,7	18,4
Rohr-Durchmesser (20°C) mm	32,8	32,8	50,9	68,1	68,1	99,5	99,5
Bohrungs-Durchm. (20°C) mm	15,0	10,73	22,97	40,76	27,89	63,88	44,05
α (Ausleg)	0,6325	0,6182	0,6294	0,6625	0,6222	0,6750	0,6236
ε (Ausleg)	1	1	1	0,973	0,9945	0,972	0,99445

Tabelle 1: Dampf-Wasser-Meßstrecken - Auslegungsdaten

Die an der Meßstrecke gemessenen Werte: Druck, Temperatur und Wirkdruck (Δp) werden analog auf einen 12-Punktendrucker mit hoher Genauigkeit (0,25%) registriert. Außer der Bereitstellung der Meßwerte für diese Massenstromberechnung dient die Registrierung auch der Kontrolle der Stabilität eines Meßpunktes.

Die genaue Methode der Datenberechnung, die nur mit einem Rechner spontan durchgeführt werden kann, soll im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

3.1.2 Berechnung der Dampf-Wasser-Daten mit dem Rechner

Aufgabe des on-line betriebenen Rechners PDP 11/40 ist es, eine Reihe wichtiger Referenzwerte zu erfassen, zu errechnen und auszudrucken. Die schnelle Aufarbeitung der Daten (on-line-Betrieb) ist deshalb von großer Bedeutung, weil die Handsteuerung der Kesselanlagen meistens nach Zweiphasenparametern der Teststrecke durchgeführt wird, die nicht durch direkte Messung sondern erst mit Hilfe eines Rechenprogrammes zu bekommen sind. Für viele Versuche sind z. B. der Dampfmassengehalt X oder die "superficial velocity" von Dampf und Wasser in der Teststrecke die grundlegenden Versuchsparameter.

Die Funktion des Rechenprogrammes, das hier nicht im Detail wiedergegeben werden soll, ist in 3 wesentliche Gruppen aufzuteilen:

- Aufarbeitung der Meßsignale
- Aufsuchen (Berechnen) von Dampf-Wasser-Stoffwerten
- Berechnen von Massenströmen und Zustandsparametern des Zweiphasen-Gemisches.

3.1.2.1 Aufarbeitung der Meßsignale:

Die von den Thermoelementen bzw. Druck- und Differenzdruck-Meßumformern kommenden Signale müssen zunächst an die Analogeingangsgrößen der PDP 11/40 angepaßt werden, was mit Präzisionswiderständen (shunts) und Verstärkern geschieht. In den Verstärkern werden außerdem mittels Tiefpaßfilterung die in die relativ langen Analsignalleitungen eingestreuten, hochfrequenten Störsignale unterdrückt und eine galvanische Trennung der elektrischen Systeme erreicht. Die für die Meßsignalumwandlungen entscheidenden Daten sind:

Meßart	Meßsignal	Shunt	Verstärkungsfaktor	Rechnereingang
Temperatur	0 - 30 mV	-	166,66	0 - 5 V
Druck	0 - 20 mA	250 Ω	1	0 - 5 V
rad. Differenzdruck	0 - 20 mA	250 Ω	1	0 - 5 V

Im Rechner wird, um nicht eliminierte Störeinflüsse wie z. B. die fortlaufende Signalregistrierung durch den 12 Punkte-Drucker (Polycomb) auszuschalten, jedes Signal 3mal 10fach abgefragt und gespeichert. Jede Gruppe von je 10 Signalwerten wird dann gemittelt und die 3 Mittelwerte untereinander verglichen. Der Mittelwert, der am stärksten von den anderen beiden abweicht, wird nicht weiter verwendet. Die beiden anderen werden zum endgültigen Signal gemittelt. Eine Abfrage sämtlicher 18 Meßstellen 30mal, erfolgt in ca. 10 sec, die des einzelnen Wertes in ca. 0,5 ms.

Das so aufbereitete Meßsignal wird dann auf folgende Weise in eine physikalische Größe unter Berücksichtigung von Eichfunktionen umgewandelt:

$$T = S \times EF_T \times \Theta \times C_T \quad \text{Temperatur in } ^\circ\text{C}$$

S = Signal

EF_T = Korrekturwert der Eichfunktion des Thermoelementes

Θ = Wert der Temperaturfunktion der Thermoelementspannung
(Unterprogramm)

C_T = Meßbereichfaktor

$$P = S \times EF_p \times C_p + 1,013 - H_W \quad \text{Absolutdruck in b}$$

EF_p = Korrekturwert der Eichfunktion des Meßumformers

C_p = Meßbereichfaktor

1,013 = mittlerer Atmosphärendruck in b

H_W = Korrekturwert für Wassersäule in der Meßleitung vor dem Meßumformer

$$\sqrt{\Delta p} = S \times EF_{\Delta p} \times C_{\Delta p} \quad \text{Differenzdruck in } b^{0,5}$$

$EF_{\Delta p}$ = Korrekturwert der Eichfunktion des radizierenden ΔP -Meßumformers

$C_{\Delta p}$ = Meßbereichfaktor

Die im Rechner auf diese Weise berechneten und ausgedruckten Meßwerte sind:

Werte vor einer oder beiden Wasserblenden (NW 32, 50):

- (1) T_W Temperatur |°C|
- (2) P_W Druck (absolut) |b|
- (3) $\sqrt{\Delta P_W}$ rad. Differenzdruck |b^{0,5}|

Werte vor einer oder beiden Dampfblenden (NW 65, 100):

- (4) T_D
- (5) P_D
- (6) $\sqrt{\Delta P_D}$

Werte in der Teststrecke (veränderlicher Aufnahmeort):

- (7) T_M
- (8) P_M

3.1.2.2 Aufsuchen von Dampf-Wasser-Stoffwerten

Die für die Berechnung des Massenstroms und die Zweiphasenparameter erforderlichen Wasser-Dampf-Zustandswerte werden mit einem Unterprogramm gewonnen, das auf der Basis der Zustandsgleichungen der VDI-Wasserdampf Tafeln /1/ arbeitet.

Es sind dies die Werte, die im folgenden als Funktion der Parameter dargestellt werden, nach denen sie bestimmt werden:

- (9) H_W = $f(P_W, T_W)$ Enthalpie des unterkühlten Wassers vor der Blende
- (10) H_D = $f(P_D, T_D)$ Enthalpie des überhitzten Dampfes vor der Blende
- (11) H_0 = $f(P_M, T_{MS})$ Enthalpie des Wassers in der Teststrecke bei Sättigung
- (12) H_1 = $f(P_M, T_{MS})$ Enthalpie des Dampfes in der Teststrecke bei Sättigung
- (13) T_{S1} = $f(P_D)$ Sättigungstemperatur vor Dampf-Blende
- (14) T_{S2} = $f(P_W)$ Sättigungstemperatur vor Wasser-Blende
- (15) T_{MS} = $f(P_M)$ Sättigungstemperatur in der Teststrecke
- (16) v_W = $f(P_W, T_W)$ spezifisches Wasservolumen vor Blende
- (17) v_D = $f(P_D, T_D)$ spezifisches Dampfvolumen vor der Blende
- (18) v_{DM} = spezifisches Dampfvolumen in der Teststrecke (Sättigung)
- (19) v_{WM} = spezifisches Wasservolumen in der Teststrecke (Sättigung)

3.1.2.3 Massenstromberechnung und Zweiphasen-Zustands-Parameter

Massenstrom:

Wie bereits in 3.1.1 gezeigt wurde, ergibt sich analog der Wasser- bzw. Dampf-Massenstrom und der in der Teststrecke fließende Gesamt-massenstrom:

- (20) \dot{m}_W = $\alpha_W \cdot A_W \cdot \sqrt{\Delta P_W} \cdot \sqrt{2/v_W}$ Wasser-Massenstrom
- (21) \dot{m}_D = $\alpha_D \cdot \epsilon \cdot A_D \cdot \sqrt{\Delta P_D} \cdot \sqrt{2/v_D}$ Dampf-Massenstrom
- (22) \dot{m}_M = $\dot{m}_W + \dot{m}_D$ Zweiphasen-Massenstrom

Hierin sind $\sqrt{\Delta P_W}$ und $\sqrt{\Delta P_D}$ direkte Meßwerte und v_W und v_D die nach 3.1.2.2 bestimmten Dampfzustandswerte.

Die in 3.1.1 als konstant behandelten Werte α , ϵ , A werden durch Unterprogramme hier für jeden Meßpunkt bestimmt. Die Durchflußzahlen der Blenden α , haben eine leichte Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re . Durch Eichung der gesamten Meßstrecken mit Wasser (Eichlabor BASF-Ludwigshafen) wurden die α -Werte genau bestimmt und für die Re -Werte des Versuchsstandes extrapoliert. $\alpha = f(Re)$ wird in einem Unterprogramm für jeden Versuchswert iterativ bestimmt.

ϵ , die Expansionszahl des Dampfes ist eine Funktion des Druckverhältnisses an der Drosselblende und des Isentropen-Exponenten des Dampfes. Diese ist nach /2/:

$$\epsilon = 1 - (0,3707 + 0,3184 m^2) \left| 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/K} \right|^{0,935}$$

- m = Öffnungsverhältnis der Meßstrecke
= $(D/d)^2$ d = Blendenlochdurchmesser
 D = Meßstreckenrohrdurchmesser
 P_1 = Druck vor der Blende
 P_2 = Druck nach der Blende ($P_1 - \Delta p$)
 K = Isentropen Exponent (Dampf)

A , der Öffnungsquerschnitt der Blenden, wird durch Wärmedehnung verändert und ist damit primär eine Funktion der Temperatur T vor der Blende:

$$A = \pi/4 d_0^2 \left| 1 + (T-20) 18,5 \cdot 10^{-6} \right|^2$$

d_0 = Blendenlochdurchmesser bei 20°C.

Dampfanteil X :

Der Dampfanteil X des Zweiphasen-Gemisches bezogen auf den Druck P_M wird mittels Wärmebilanzrechnung bestimmt. Der Wärmeverlustwert des Kreislaufs Q als Funktion der Teststreckentemperatur $T_M = f(P_M)$ ist experimentell ermittelt worden und enthält den mittleren Verlust zwischen Meßblenden und Teststrecke. Er gilt für den Gleichgewichtszustand der Anlage:

$$(23) \quad X = (H_M - H_0) / (H_1 - H_0)$$

$$(24) \quad H_M = H_{OM} - Q/\dot{m}_M$$

$$(25) \quad H_{OM} = (\dot{m}_W \cdot H_W + \dot{m}_D \cdot H_D) / \dot{m}_M$$

$$(26) \quad Q = (0,1 \cdot T_M^{-7}) \cdot 860/3600 \text{ |Kcal/sec|}$$

Wenn beide Kessel (Index 1 und 2) Wasser produzieren und Dampf durch Drosseln vor der Teststrecke erzeugt wird:

$$H_{OM} = (\dot{m}_{W1} \cdot H_{W1} + \dot{m}_{W2} \cdot H_{W2}) / (\dot{m}_{W1} + \dot{m}_{W2})$$

Homog. Dampfvolumenanteil α_H :

Der Dampfvolumenanteil α_H des Gemisches wird aus der Bilanzrechnung gewonnen unter der Annahme homogener Strömung ohne Schlupf zwischen Dampf und Wassergeschwindigkeit:

$$(27) \quad \alpha_H = v_{DM} \cdot X / \{v_{WM} \cdot (1-X) + v_{DM} \cdot X\}$$

Superficial Velocity:

Die "superficial velocity" von Dampf und Wasser ist die Geschwindigkeit, die man erhält, wenn man den Volumenstrom einer Phase durch den Rohrquerschnitt dividiert.

$$(28) \quad W_D = \dot{m}_M \cdot X \cdot v_{DM} / A_T \quad \text{superficial velocity des Dampfes}$$

$$(29) \quad W_W = \dot{m}_M \cdot (1-X) \cdot v_{WM} / A_T \quad \text{superficial velocity des Wassers}$$

A_T = Rohrquerschnitt der Teststrecke

$$0 \leq X \leq 1$$

Kontrolle des einphasigen Zustandes an der Meßblende:

Die Drosselblendenmessung liefert nur brauchbare Ergebnisse, wenn die Medien einphasig, d.h. das Wasser etwas unterkühlt und der Dampf etwas überhitzt ist. Es wurden deshalb folgende 3 Einflußkriterien (32-34) in dem Rechenprogramm vorgesehen:

$$(30) \quad DT_D = T_D - TS_1 \quad \text{Dampfüberhitzung}$$

$$(31) \quad DT_W = T_W - TS_2 \quad \text{Wasserunterkühlung}$$

$$(32) \quad DT_D > 0 \quad \text{und} \quad DT_W < 0$$

Der Rechner druckt "stabile Versuchszustände erreicht".

Die üblichen Meß- und Rechenwerte werden ausgedruckt.

$$(33) \quad DT_{W1} < 0 \quad \text{und} \quad DT_{W2} < 0$$

Wenn beide Kessel nur Wasser erzeugen und Dampf durch Entspannen erzeugt wird; Rechner verhält sich wie (32).

(34) Sind die Bedingungen (32) oder (33) nicht erreicht, ist der Ausdruck: "Stabile Versuchszustände nicht erreicht". Es werden nur Meßwerte, ihre Signale und die Ursache der Instabilität, DT, ausgedruckt.

Abb. 13 bis 14 zeigen Beispiele der 3 Rechnerausdrucke. Die Ziffern in Kreisen entsprechen den Gleichungsbezeichnungen in Klammern in den Abschnitten 3.1.2.1 bis 3.1.2.3. Die Buchstaben vor jeder Zeile bedeuten:

W = Wasser

D = Dampf

M = Mischungszustand (Teststrecke)

3.1.3 Genauigkeitsbetrachtungen der Dampf-Wasser-Blendenmessung

Aus der Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Gesetze der Massenstrommessung mittels Drosselblenden ergibt sich nach /3/ Seite 4, ein mittlerer statistischer Fehler für die Massenstrommessung mit einer Sicherheit von mindestens 95 % nach folgender Beziehung:

$$\tau_{\dot{m}} = \left(\tau_{\alpha}^2 + \tau_D^2 \left(2\frac{m^2}{\alpha}\right)^2 + \tau_d^2 \left(2 + \frac{2m^2}{\alpha}\right)^2 + \tau_{\epsilon}^2 + \frac{1}{4}\tau_{\Delta P}^2 + \frac{1}{4}\tau_{\rho}^2 \right)^{1/2}$$

τ_{α} = Berechnungstoleranz der Einlaufziffer

$\left. \begin{matrix} \tau_d \\ \tau_D \end{matrix} \right\}$ = Fertigungstoleranzbedingte Fehler, betreffend Blendenlochdurchmesser und Rohrdurchmesser

τ_{ϵ} = Berechnungstoleranz der Expansionszahl

$\tau_{\Delta P}$ = Meßfehler von ΔP an der Blende

τ_{ρ} = Meßfehlerbedingte Toleranz der Dichte ρ

τ_{α} , τ_D und τ_d : sind systematische Fehler, die mit der Auslegung und Fertigung der Mengenmeßstrecke (Blende + Rohr) verknüpft sind.

Durch Experimentelle Ausmessung der Meßstrecken im Wasserversuch (im Eichlabor der BASF-Ludwigshafen) wurde der α -Wert mit einer Toleranz von höchstens 1% gemessen. Der Wert τ_{α}' , in dem τ_{α} , τ_D und τ_d enthalten sind, kann daher mit 1% angesetzt werden. Da τ_{α}' eine annähernd lineare Funktion von $\log Re$ ist, kann der im Wasserversuch gemessene Wert mit großer Genauigkeit auf den Betriebsbereich des Versuchsstandes extrapoliert werden.

τ_ϵ :

Die Gleichung für die Bestimmung der Expansionszahl ϵ (in 3.1.2.3) ist empirisch und beruht auf Meßwerten. Nach [3] kann die Toleranz für ϵ in Abhängigkeit von $\Delta P/P$ durch folgende Beziehung abgeschätzt werden:

$$\tau_\epsilon = \pm 4 \cdot \frac{\Delta P}{P} \quad | \% | \quad \text{für } 0,05 \leq m \leq 0,55$$
$$m = (d/D)^2$$

$\tau_{\Delta P}$:

Ist der Meß- und Übertragungsfehler für die Messung der Druckdifferenzen an der Drosselblende. Die Meßtoleranz der ΔP -Meßumformer ist $< 0,5 \%$ vom Endsignal. Da für den verwendeten Meßumformer das abgegebene Signal bereits radiziert, also massenstromproportional ist, geht $\tau_{\sqrt{\Delta P}}$ in die Beziehung für τ_m mit dem Faktor 1 anstatt $1/4$ (unter der Wurzel) ein.

τ_ρ :

Die Toleranz für die Dichte ist in erster Linie von den Meßtoleranzen für Temperatur und Druck abhängig. Der Ablesefehler in der Dampftafel bzw. der Fehler beim Aufsuchen im Dampftafel-Programm ist dagegen vernachlässigbar. Die Abhängigkeit von τ_ρ von den abschließenden Meßfehlern δt und δp ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz wie folgt:

$$\tau_\rho = \pm \left| \left(\frac{d\rho}{\rho dt} \cdot \delta t \right)_p^2 + \left(\frac{d\rho}{\rho dp} \cdot \delta p \right)_t^2 \right|^{1/2} \cdot 100$$

Der absolute Temperaturfehler beträgt etwa $1,5^\circ\text{C}$. Der absolute Fehler für den Druck beträgt bei einer Einstellung der Meßumformer auf 165 bar 0,8 bar. Da der Fehler τ_ρ für Wasser sehr gering ist gegenüber Dampf, wird hier nur der Fehler für Dampf betrachtet. Die partiellen Differentialquotienten werden aus der VDI-Dampftafel errechnet und zwar für Dampfwerte in der Nähe der Siedelinie (ca. 15°C überhitzt). Die folgende Tabelle zeigt die Quotienten in $\%$ je $^\circ\text{C}$ bzw. $\%$ je bar und die entsprechenden Werte τ_ρ in Abhängigkeit vom Druck in der Meßstrecke.

P_1 bar	$(\frac{d\rho}{\rho dt})_p$ %	$(\frac{d\rho}{\rho dP})_t$ %	τ_ρ %
10	0,276	10,83	8,67
50	0,358	2,57	2,12
100	0,557	1,65	1,56
150	0,752	1,36	1,57

Die Werte zeigen, daß im Druckbereich von 50 bis 150 bar der Dichtefehler tragbar ist. Bei kleinen Drücken in der Teststrecke muß also darauf geachtet werden, daß der Meßstreckendruck (durch Drosselung) nicht wesentlich unter 50 bar sinkt, wenn man nicht eine Meßbereichsverstellung des Druck-Meßumformers vornehmen will.

Die Toleranzbeziehung für \dot{m} hat nun nach den vorausgegangenen Betrachtungen die Form:

$$\tau_{\dot{m}} = \left(\tau_{\alpha'}^2 + \tau_\epsilon^2 + \tau_{\sqrt{\Delta P}}^2 + \frac{1}{4} \tau_\rho^2 \right)^{1/2}$$

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Einzel-toleranzen in % und der Massenstromtoleranzen für Dampfmessung bei maximalem ΔP -Meßbereich und verschiedenen Drücken in der Meßstrecke.

P b	$\tau_{\alpha'}$	τ_ϵ	$\tau_{\sqrt{\Delta P}}$	τ_ρ	$\tau_{\dot{m}_D}$ %
10	1,0	0,8	0,5	8,67	4,55
50	1,0	0,16	0,5	2,12	1,55
100	1,0	0,1	0,5	1,56	1,37
150	1,0	0,1	0,5	1,57	1,37

Da die Massenstrommessung des Wassers wegen der geringen Druckabhängigkeit mit größerer Genauigkeit durchführbar ist, ist die Toleranz des Zweiphasen-Massenstromes je nach Wasseranteil kleiner. Die in der Tabelle angegebenen Werte $\tau_{\dot{m}_D}$ liegen daher auf der sicheren Seite. Im Teillastbereich einer Blende wird der relative, auf den jeweiligen Massenstrom bezogene Fehler, größer, weil der

relative Fehler der ΔP -Messung steigt. Aus diesem Grunde sind 3 der 4 Meßstrecken mit 2 Meßumformern ausgestattet, die bei etwa 1/3 der Volllast-Bereiche rechnerseitig umgeschaltet werden. Die $\sqrt{\Delta P}$ -Messung hat dann im Bereich von 100 % bis 33 % die gleiche Genauigkeit wie von 33 % - 10 %. Unter 10 % Massenstrom steigt der Fehler wieder stärker an.

Die folgende Tabelle zeigt im Teilbereich die Massenstromtoleranzen unter der Annahme, daß der Meßfehler $\tau_{\Delta P}$ bezogen auf 33 % bzw. 10 % des $\sqrt{\Delta P}$ -Bereiches den 3-fachen Wert erreicht.

P [bar]	$\tau_{m_{0,1}}$ [%]
10	4,76
50	2,10
100	1,97
150	1,97

Geht man von diesen Werten aus und berücksichtigt, daß durch entsprechende Kombination der Kessel (kleine Menge mit kleinem Kessel, große Menge mit großem Kessel) der Bereich genauer Messung um den Faktor 2,5 erweitert werden kann, so kann man sagen, daß jede Phase (Wasser, Dampf) einzeln betrachtet über einen Massenstrombereich von 100 bis 4 % mit einem entsprechenden Toleranzbereich von ca. 1,5 - 2,5 % gefahren werden kann, wenn der Druck an der Drosselblende nicht unter 50 bar sinkt.

Werden beide Kessel mit einer Phase betrieben, so vergrößert sich der Massenstrombereich auf 100 % bis 3 %. Diese Betrachtungen beruhen auf der Annahme, daß die vom Hersteller der Meßumformer angegebenen Toleranzgrenzen voll ausgenutzt werden und die Meßbereiche nicht verstellt werden. Der durch Eichen der Meßumformer erzielbare Gewinn wurde hier vernachlässigt, jedoch im Programm vorgesehen.

3.2 Bestimmung von Druck, Temperatur und Massenstrom im Luft-Wasser-Betrieb

Im Abschnitt 2.2 wurde die Anlage anhand der Abbn. 1 und 8 für Luft-Wasser-Betrieb beschrieben. Die Druckmessung wird hier mit Rohrfedermanometern der Güteklasse 0,6 und die Temperaturmessung mit Quecksilberthermometern durchgeführt. Die Messung der einphasigen Luft- und Wasser-Massenströme wird wie bei Dampf-Wasser mit Drosselblenden betrieben. Die Differenzdruckmessung an der Blende wird mit Quecksilbermanometern 0 - 1400 mm Hg durchgeführt. Im Gegensatz zur Dampf-Wasser-Messung, wo der ΔP -Meßbereich zur Erhöhung der Meßgenauigkeit mit 2 Meßumformern mit abgestuftem Meßbereich bestückt ist, stehen bei der Luft-Wasser-Messung jeweils 3 Meßblenden mit unterschiedlichem Massenstrombereich, jedoch gleichem ΔP -Bereich, zur Verfügung. Wie das Schema Abb. 8 zeigt, sind für beide Phasen jeweils eine Meßstrecke NW 100 und NW 50 vorhanden. Die große Meßstrecke ist mit einer Blende und die kleine mit zwei auswechselbaren Blenden ausgestattet. Tabelle 2 zeigt die wichtigsten Auslegungsdaten für die 6 Meßblenden.

Da beim Luft-Wasser-Betrieb die Massenstromwerte und die Zustandswerte in der Teststrecke erheblich einfacher zu berechnen sind, weil kein Phasenwechsel stattfindet, die Stoffwerte einfacher zu bestimmen sind und nahezu konstante Temperaturen herrschen, wurde auf die Verbindung zum Rechner verzichtet.

Die Massenströme werden je nach eingesetzter Blende nach den folgenden Beziehungen mit der Blendenformel durch Umrechnung der Auslegungswerte bestimmt:

Luft:

Meßbereich bis 4000 Nm³/h NW 100:

$$\dot{m} = 741,322 \cdot \sqrt{P/T} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{Hg}}} \quad |\text{kg/h}|$$

Meßbereich bis 1000 Nm³/h NW 50:

$$\dot{m} = 185,330 \cdot \sqrt{P/T} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{Hg}}} \quad |\text{kg/h}|$$

Meßmedium	Wasser			Luft		
	100	50		100	50	
Nennweite der Meßstrecke	100	50		100	50	
Fabrik-Nr. der Blende	13963	13964	13964A	13961	13962	13962A
Wirkdruck mmHg				1400	1400	1400
Wirkdruck mmHg-H ₂ O	1400	1400	1400			
Durchsatz m ³ /h	120	30	7,5			
Durchsatz Nm ³ /h				4000	1000	250
Druck vor Blende ata	11	11	11	11	11	11
Temperatur vor Blende °C	20	20	20	20	20	20
Durchmesser der Blendenbohrung mm	59,55	29,51	15,24	38,08	18,94	9,53
Durchmesser des Teststreckenrohres mm	107,1	51,2	51,2	107,1	51,2	51,2
α (Ausleg.)	0,64444	0,65609	0,61482	0,61328	0,61969	0,61131
ε (Ausleg.)	1	1	1	0,9783	0,9783	0,9789

Tabelle 2: Luft-Wasser-Meßblenden, Auslegungsdaten)

Meßbereich bis 250 Nm³/h NW 50:

$$\dot{m} = 46,333 \cdot \sqrt{P/T} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{Hg}}} \quad |\text{kg/h}|$$

Wasser:

Meßbereich bis 120 m³/h NW 100:

$$\dot{m} = 3205,21 \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{Hg}}} \quad |\text{kg/h}|$$

Meßbereich bis 30 m³/h NW 50:

$$\dot{m} = 801,30 \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{Hg}}} \quad |\text{kg/h}|$$

Meßbereich bis 7,5 m³/h NW 50:

$$\dot{m} = 200,32 \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta P_{\text{Hg}}} \quad |\text{kg/h}|$$

P = Druck vor Blende |b|

T = Temperatur vor Blende |°C|

ρ = Wasserdichte vor Blende |in g/cm³|

ΔP_{Hg} = mm Quecksilbersäule unter Luft

ΔP_{Hg} ' = mm Quecksilbersäule unter Wasser

3.3 Seriellles 5-Strahl- γ -Densitometer zur Dichtebestimmung des Gemisches

3.3.1 Grundlagen

Die Kenntnis der Dichte ρ bzw. des Gasvolumenanteils α ist für die Zweiphasenmassenstrommessung von großer Bedeutung. Da ρ und α durch die einfachen Beziehungen

$$\rho = \rho_G \cdot \alpha + \rho_W (1-\alpha)$$

ρ_G = Gasdichte

$$\alpha = (\rho - \rho_W) / (\rho_G - \rho_W)$$

ρ_W = Wasserdichte

miteinander verknüpft sind, wird im folgenden meistens nur eine der beiden Größen erwähnt. Der Gasvolumenanteil α unterscheidet sich von dem in Abschnitt 3.1.2.3 behandelten, aus der Bilanzrechnung bestimmten α_H , durch den Schlupf zwischen der Dampf- und der Wassergeschwindigkeit.

Ist S das Verhältnis dieser beiden Geschwindigkeiten

$$S = v_D / v_W$$

so gibt die folgende Beziehung die Verknüpfung von α , S und α_H wieder:

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot S = \frac{\alpha_H}{1-\alpha_H}$$

Da der Schlupf S nicht bekannt ist, muß α meßtechnisch bestimmt werden. Es wurde eine Dichtemeßvorrichtung entwickelt, die nach dem bekannten Prinzip der γ -Strahl-Schwächung arbeitet.

Beim Durchtritt eines γ -Strahles durch Materie wird er nach dem Absorptionsgesetz

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot l}$$

geschwächt, wenn:

- I_0 = Photonenanzahl des γ -Strahles vor der Schwächung
- I = Photonenanzahl nach der Schwächung
- μ = Massen - Absorptionskoeffizient
- l = Dicke der durchdrungenen Materieschicht
- ρ = Dichte der durchdrungenen Materie

ist.

Für die direkte Bestimmung von ρ oder α aus dem Meßwert I müßten die Größen I_0, μ, l genau bekannt sein und zwar für verschiedene Zustandsgrößen der Medien, was nicht der Fall ist. Es wird daher die Relativmessung vorgezogen, um diese Größen zu eliminieren. Aus den aufgeführten Beziehungen für I und α ergibt sich durch Umformung:

$$\alpha = \frac{\ln I - \ln I_W}{\ln I_G - \ln I_W}$$

- I = Zählrate (Photonenzahl) beim Gemisch
- I_G = Zählrate beim Gas
- I_W = Zählrate beim Wasser

Nach diesem Gesetz läßt sich α allein aus den Zählraten der Zweiphasenmessung, einer Messung bei Gas (Dampf) und einer bei Wasser errechnen.

Der Wert α als Meßwert eines Strahles ist für den ganzen Querschnitt der Zweiphasenströmung nur bei absolut homogener Strömung repräsentativ. Da das im allgemeinen nicht der Fall ist, muß eine möglichst große Zahl von γ -Strahlen über den Querschnitt verteilt werden, um einen genauen Mittelwert zu erhalten. Wegen der hohen Kosten für mehrere Meßketten und wegen des Platzbedarfs für die γ -Detektoren, sind aus der Literatur außer Einstrahlanlagen höchsten 2 oder 3 Strahlanlagen bekannt geworden /11/. Um eine möglichst hohe Meßgenauigkeit mit relativ niedrigen Kosten zu erreichen, wurde für den beschriebenen Versuchsstand ein 5-Strahl- γ -Densitometer entwickelt, das im folgenden beschrieben wird.

3.3.2 Beschreibung des γ -Densitometers

Abb. 15 zeigt schematisch die Arbeitsweise der Meßvorrichtung. Von einer zentralen Quelle gehen die γ -Strahlen aus, die von einem speziellen Kollimatorblock zu 6 engen Strahlenbündeln (3x5 mm) kollimiert werden und schließlich auf einen gemeinsamen, quer zur Strahlenrichtung angeordneten Szintillationszähler treffen. 5 der 6 γ -Strahlen durchdringen dabei fächerförmig den Querschnitt des Strömungskanals. Der sechste Strahl wird an dem Strömungskanal vorbei zum Szintillator geführt. Zwischen dem Kollimatorblock und dem Szintillator dreht sich eine mit Blei ausgegossene Scheibe. Sie hat eine Reihe bogenförmiger Schlitze, die so angebracht sind, daß ein Strahl nach dem anderen zum γ -Detektor freigegeben wird, während die 5 anderen Strahlen solange zurückgehalten werden. 5 Strahlen dienen zum Abtasten der Querschnittsdichteverteilung und der 6. Strahl ist ein Referenzstrahl, der die Aufgabe hat, Änderungen der Zählrate, die nichtsmit der Dichteveränderung zu tun haben, festzustellen. Bekanntlich ist ein Fotomultiplier sehr

empfindlich gegen Temperatur-Hochspannungs- und Magnetfeldänderungen, die sich durch Driften des Ausgangssignals auswirken. Deshalb kommt dem Referenzstrahl die große Bedeutung zu. Beim Driften der Anlage während der Messung der Werte I_G , I_W und I für die 5 Strahlen, kann die Änderung des Referenzstrahles zur Korrektur der Werte herangezogen werden.

Der Kollimatorblock ist aus warmfestem Stahl (13 CrMo 44) gefertigt und übernimmt im Bereich seiner Länge die Funktion des druckführenden Rohres. Die eingesetzte Hülse hat daher nur die Aufgabe, die Kollimatorbohrungen abzudichten und konnte mit 1 mm Wandstärke sehr dünn gehalten werden. Die γ -Strahlen (außer dem Referenzstrahl) müssen deshalb zwischen Quelle und Szintillator nur ca. 2 mm Strukturmaterial durchdringen. Es konnte aus diesem Grunde ein relativ "weicher" Strahler (niederenergetische) wie Tm-170 oder Ir-192 gewählt werden. Ein weicher Strahler hat wiederum den Vorteil, daß der γ -Strahl vom Meßmedium relativ stark geschwächt wird und damit der Meßhub und das Auflösungsvermögen groß sind. Bei einem Kanaldurchmesser von 50 mm hat sich Ir-192 mit einer Halbwertszeit von 74,3 Tagen und einem Energiespektrum von 0,2 bis 0,6 MeV (Schwerpunkt bei 0,3 MeV) als besonders günstig erwiesen.

Abbn. 16 und 17 zeigen den Längs- und Querschnitt durch die ausgeführte Meßvorrichtung und Abb. 19 ein Foto der Anlage. Der Abschirmbehälter für die γ -Quelle, die bei Neuanschaffung ^{40}Co besitzt, wurde aus Densimet, einer Legierung mit ca. 98% Wolfram, gefertigt. Densimet hat einen wesentlich höheren Schmelzpunkt als Blei und einen um den Faktor 2 höheren linearen Absorptionskoeffizienten. Wegen der Nähe der Schmelztemperatur des Bleis an der Betriebstemperatur des Dampf-Wasser-Gemisches (342°C bei 150 bar) schied eine Bleiabschirmung für die γ -Quelle trotz Wasserkühlung schon aus Sicherheitsgründen aus.

Die Szintillator-Fotomultiplier-Kombination ist zur Reduzierung des Strahlenuntergrundes von einem Bleizylinder (3 cm Wand) mit eingegossener Kühlschlange für Wasserkühlung umschlossen. Zur Magnetfeldunterdrückung wurde über das ganze nachträglich ein Strahlzylinder mit 2 mm Wandstärke geschoben.

Abb. 18 zeigt das Blockschaltbild der γ -Strahl-Meß- und Auswertelektronik.

Die von der γ -Unterbrechungsscheibe nacheinander freigegebenen γ -Strahlen durchdringen den Szintillator, wo sie eine der γ -Pulszahl proportionale Anzahl von Lichtblitzen erzeugen. In dem optisch angekoppelten Fotomultiplier werden sie in elektrische Impulse umgewandelt und um ein charakteristisches, besonders von der Größe der angelegten Hochspannung abhängiges Maß, vervielfältigt. Der in den Fotomultiplier eingebaute Vorverstärker hat die Aufgabe, die Impulse für den Transport zum räumlich getrennten Hauptverstärker (Timing Filter Amplifier) anzuheben und eine zusätzliche galvanische Trennung gegen die Einwirkung von Hochspannung auf den Hauptverstärker zu schaffen. Der Hauptverstärker hat neben seiner Verstärkungsfunktion die der Pulsformung der weitergeleiteten Impulse. In Zusammenarbeit mit der nachfolgenden Komponente, dem Diskriminator, dient diese Pulsformung der Optimierung des Signal- zu Rauschverhältnisses.

Der Diskriminator hat vor allem die Aufgabe, das niederenergetische Ende des passierenden Impulshöhenspektrums, das im wesentlichen aus Rauschen besteht und z. T. durch γ -Streuimpulse (Compton-Untergrund) erzeugt wurde, abzuschneiden.

Hinter dem Diskriminator verzweigt sich der Weg der Signalverarbeitung.

Der eine Weg geht zum Ratemeter, in dem ein analoges elektrisches Signal aus der statistisch unregelmäßigen Pulsfolge erzeugt wird. Dieses Signal wird in erster Linie zur Funktionskontrolle der Dichtemeßvorrichtung benutzt und wird zu diesem Zweck mit einem Linienschreiber aufgezeichnet oder mit einem Analogbandgerät zur späteren Verwendung gespeichert. Der zweite Weg führt zur Datenverarbeitung und wird digital bis zum on-line-Rechner durchgeführt, um Fehlerquellen, die mit der Umwandlung digital-analog-digital verbunden wären, auszuschalten.

Zu diesem Zweck werden die elektrischen Impulse, vom Diskriminator kommend, zum Counter geleitet und gezählt. Die Zählzeit wird vom Timer gemessen, der nach Ablauf der vorgewählten Zeit dem Counter ein Stoppsignal gibt. Die kleinste vorwählbare Zeit des Timers ist 10 ms. Timer und Counter werden gestartet durch ein Signal der Lichtschranke 1, das immer dann kommt, wenn ein γ -Strahl durch einen Bogenschlitz in der Unterbrecherscheibe gerade voll freigegeben ist. Die Drehzahl der Unterbrecherscheibe und die im Timer eingestellte Zählzeit müssen so aufeinander abgestimmt sein, daß das Timer-Stoppsignal kommt, bevor der γ -Strahl durch das Ende des Bogenschlitzes wieder unterbrochen wird. Die Lichtschrankensignale werden von einem Lochkranz ausgelöst, der an der γ -Unterbrecherscheibe montiert ist. Der Counter kann eine 6-dekadige Anzahl Impulse zählen und bis zum Reset-Signal speichern und mit Leuchtdioden anzeigen. Der Wert steht im BCD-Code am Ausgang des Counters an und kann über 24 Leitungen parallel zur weiteren Verarbeitung abgerufen werden. Der weitere Weg des Datenwortes vom Counterausgang zum Rechner PDP 11/40 ist sehr kompliziert und soll deshalb hier nicht wiedergegeben werden. Er ist aus /8,9,10/ detailliert zu entnehmen. Multiplexer und Ablaufsteuerung haben die Aufgabe, die 6-dekadigen Zählraten zum Rechner digital weiterzuleiten und sie vorher mit einer Adresse zu versehen, damit im Rechner eine Zuordnung zur Kanalnummer möglich ist.

Aufgabe des Rechners ist es, die Zählraten, die für die vorausgegangene Messung mit Dampf und die Messung mit Wasser gewonnen wurden, abzuspeichern und für die α -Rechnung bei Zweiphasenmessung bereitzuhalten. Die Zählraten des Referenzstrahlers werden dabei zur Driftkorrektur der Werte verwendet. Gibt man dem Referenzstrahl den Index 0 und den Strahlen 1 bis 5 den Index i , so rechnet der Rechner den korrigierten α -Wert für einen Strahl i zu:

$$\alpha_i = \left| \ln\left(\frac{I_i}{I_{Wi}} \cdot \frac{I_{W0}}{I_0}\right) \right| / \left| \ln\left(\frac{I_{Gi}}{I_{Wi}} \cdot \frac{I_{W0}}{I_{G0}}\right) \right|$$

I_W = Zählrate bei Wasserfüllung

I_G = Zählrate bei Gas (Dampf)-Füllung

Dieser Wert kann nach Vorgabe bis zu 80 mal bestimmt und gemittelt werden zu α_{im} .

An den 5 Mittelwerten α_{im} wird anschließend durch Wichtung mit den einzelnen Strahllängen L_i (Länge des vom Strahl i im Zweiphasengemisch zurückgelegten Weges) der Querschnittsmittelwert des Strömungskanals bestimmt:

$$\alpha_m = \frac{\sum_1^5 \alpha_{im} \cdot L_i}{\sum_1^5 L_i}$$

Diese Art der Mittelwertbildung führt bei einer 5-Strahlanlage zu tragbaren Fehlern. Bei extrem separierter Zweiphasenströmung kann der Fehler im Bereich von $\pm 5\%$ liegen. Durch Anwendung einer Rechenmethode, die mit Strömungsmodellen arbeitet, kann der Fehler weiter verringert werden. Diese Berechnungsmethoden werden bei 2- und 3-Strahlanlagen angewandt /11/. Wegen der Kompliziertheit eines entsprechenden Programmes für die 5-Strahlanlage wurde zunächst die o.g. Methode genommen. Die Entwicklung einer Modell-Berechnungsmethode für die vorliegende Anlage ist jedoch geplant.

Eine detaillierte Beschreibung des γ -Densitometers mit Wiedergabe des Rechenprogrammes ist in /8,9,10/ enthalten.

3.4 Impedanz-Sonde

3.4.1 Meßprinzip

Für die Interpretation der Signale der getesteten Meßverfahren ist die Kenntnis der Strömungsform und der Phasenverteilung von großer Bedeutung. Zu diesem Zweck wurde eine lokal messende Impedanz-Sonde entwickelt (Müller 12, 2, 3) die auch bei Dampf-Wasser-Strömung und hohen Drücken (vernachlässigbare elektrische Leitfähigkeit) einsetzbar ist. Das Meßprinzip beruht auf der unterschiedlichen Dämpfung einer elektromagnetischen Welle am offenen Ende einer koaxialen Leitung. Dieser Effekt wird durch die unterschiedlichen dielektrischen Verluste der Gas- und Flüssigkeitsphase

an der Sondenspitze verursacht (Abb. 24). Die dielektrischen Verluste nehmen mit zunehmender Frequenz zu und hängen wesentlich ab von der dielektrischen Konstante ϵ_r . Längs des Leitungssystems bildet die Vorwärtswelle und die an der Meßspitze reflektierte Welle eine "stehende Welle" und damit längs der Leitung eine definierte Differenzspannung. Wenn sich die Dämpfung an der Sondenspitze ändert, ändert sich auch die Differenzspannung. Diese Differenzspannung wird mit einem Stehwellenmeßgerät (SWR-Meter) abgegriffen, in einem Grätz-Gleichrichter gleichgerichtet und anschließend verstärkt. Die hohe Trägerfrequenz wird dabei von den üblichen Aufzeichnungsgeräten nicht mehr wahrgenommen.

Die hochfrequente Spannungsversorgung erfolgt mit einem kommerziellen Hochfrequenzgenerator mit einer variablen Frequenz von 30 bis 300 MHz und einer Ausgangsspannung von ca. 3 V bei 50 Ω . Je nach Frequenz, Leitungssystem und Stoffdaten beträgt die Spannung nach dem Gleichrichter 1 - 100 mV. Ein π -Filter wird verwendet, um den Wellenwiderstand der Sonde an den 50 Ω -Ausgang des Generators anzupassen.

3.4.2 Sondenbauweise

Die hohe Löslichkeit vieler Isoliermaterialien in Dampf-Wasser-Strömung bei hohem Druck erfordert eine spezielle Sondenbauweise. Wie Abb. 25 zeigt, wird die Spitze durch eine auf ca. 0,6 mm \emptyset gehämmerte, koaxiale Edelstahl-Mantelleitung gebildet. Sie ist mit einem gesinterten Al_2O_3 -Röhrchen verschlossen. Dieses Röhrchen kann nach dem Entfernen der pulverisierten Al_2O_3 -Leitungsisolierung eingeschoben und mit Emaille festgeklebt und gedichtet werden. Die Spitze wird anschließend schlank ausgeschliffen. Diese Leitung wird dann isoliert durch die metallische Rohrwand und zur elektrischen Versorgung geführt.

Die Sonden können - ähnlich Thermoelementen - mit Hochdruckverschraubungen fest installiert werden. Um ein Profil der Phasenverteilung zu messen, wurde eine Traversiervorrichtung gefertigt, die in Abb. 26 dargestellt ist.

3.4.3 Anwendungsbeispiele

Abb. 25 zeigt schematisch Sondensignale für die Fälle, daß sich die Sondenspitze in disperser Blasenströmung (oberer Teil) bzw. in disperser Tropfenströmung (unterer Teil) befindet. Die Information über die Strömungsform erhält man aus dem zeitlichen Verlauf der Signale bei verschiedenen Sondenpositionen. Ein Maß für die lokale Phasenverteilung ist der zeitlich gemittelte lokale Dampfvolumenteil α , der sich ergibt aus dem Verhältnis der Summe aller Zeiten, während derer das Signal Gas bzw. Dampf anzeigt, zur gesamten Meßzeit.

In Abb. 23 (aus [2]) werden Sondensignale bei Dampf-Wasser-Strömung gezeigt. Abb. 27 zeigt Sondensignale und Phasenverteilungen bei verschiedenen Strömungsformen in Luft-Wasser-Strömung. Entsprechende Messungen bei Dampf-Wasser-Strömung sind in [13,14,15] enthalten. In [16] wurde gezeigt, daß dieses Meßverfahren selbst in Flüssigkeiten mit sehr kleiner Dielektrizitätskonstante, z.B. Freon, einsetzbar ist.

4. Teststrecken-Beobachtungsfenster

Abb. 22 zeigt eine Vorrichtung im Querschnitt, die die Beobachtung der Strömung bei vollem Druck (150 bar) im 50 mm Strömungskanal ermöglicht. Durch 2 gegenüberliegende Fenster aus künstlichem Saphir mit jeweils einem effektiven Durchmesser von 23 mm (40 mm maximaler Scheiben-Durchmesser) kann das Zweiphasengemisch beleuchtet und beobachtet werden. Wegen der hohen Löslichkeit der meisten transparenten Materialien in Wasser unter hohem Druck und hoher Temperatur mußte Saphir verwendet werden. Um die Strömungskontur des kreisförmigen Kanals nicht zu stören, haben die Scheiben auf der Innenseite einen Zylinderschliff. Als zweite Sicherheitsbarriere dient eine druckentlastete 10 mm starke Quarzscheibe, die von der Saphir-Scheibe durch einen 0,5 mm dicken Ring getrennt ist. Eine weitere Sicherheitsbarriere ist ein druckentlastetes, kaltes Gehäuse, das für den Durchblick 2 Panzerglasscheiben (geschichtetes Sicherheitsglas) enthält.

Die Saphirscheibe wird im Kanalblock mittels It-Dichtung gedichtet und wird zu diesem Zweck über einen federbelasteten Flansch ange-drückt. Die ganze Vorrichtung ist als Einsatz von 0,5 m Länge ausgeführt. Bei kleinen Dampfgehalten ergaben Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskammer gute Ergebnisse. Abb. 23 zeigt eine Serie von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei einem Dampfgehalt von $X = 0,042$, Massenstrom von $\dot{m} = 3,5 \text{ kg/s}$ und einem Druck von ca. 50 bar. Im Bild ist die Spitze der Impedanzsonde zu sehen und darunter das synchron aufgenommene Sondersignal abgebildet. Bei höherem Dampfgehalt ging die Transparenz der Strömung so stark zurück, daß die Aufnahmen nicht auszuwerten waren. Leider waren die Scheiben bezüglich thermischer Spannungen sehr empfindlich. Meistens entstanden Risse beim Abkühlen der Anlage. Die Vorrichtung war deshalb nicht geeignet für den kontinuierlichen Versuchsbetrieb.

5. Betriebserfahrungen

In der ersten Jahreshälfte 1976 begann die Inbetriebnahmephase des Dampf-Wasser-Kreislaufes und wurde in der 2. Jahreshälfte abgeschlossen /1, 2/.

In dieser Zeit wurde nach dem Beseitigen anfänglicher Funktionsmängel einzelner Komponenten, dem Einjustieren der Meß- und Regeltechnik und der Erprobung und Verbesserung des Betriebsdaten-Rechenprogrammes, die beste Fahrweise erprobt, die das Erreichen möglichst vieler Betriebspunkte am Tag ermöglicht. Es wurde dabei die unter 2.4 beschriebene Betriebsweise als optimal herausgefunden. Es wurden im Mittel ca. 15 Versuchspunkte am Tag gefahren. Bei den Betriebspunkten mit Schwallströmung in der Teststrecke, wirkten sich Strömungssoszillationen rückwärts bis zum Meßblendensignal aus. Durch den späteren Einbau von Drosselventilen vor der Mischkammer wurde auch für diese Betriebspunkte die Stabilität ausreichend verbessert.

Als sehr zuverlässiges Kontroll- und Meßgerät für die Bestimmung der Strömungsform und der Strömungsstabilität hat sich die traversierbare Impedanzsonde erwiesen. Mit ihrer Hilfe wurden über weite Betriebsbereiche die Phasenverteilungsformen untersucht und zu Strömungskarten zusammengestellt. Bei allen späteren Versuchen wurde die Impedanzsonde als örtliche Kontroll-Sonde in der Teststrecke eingesetzt. In der ersten Jahreshälfte 1977 /3/ wurde der Luft-Wasserkreislauf erfolgreich in Betrieb genommen. Erste Tests von Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren wurden begonnen. Ende 1977 wurde nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Elektronik das serielle 5-Strahl- γ -Densitometer erfolgreich in Betrieb genommen. Mit ihm können im on-line-Rechenbetrieb beim Einsatz der 50 mm-Teststrecke der Dampfvolumenteil α des Querschnitts und die Verteilung desselben über den Querschnitt ermittelt werden.

Von Anfang 1977 bis zum Zeitpunkt der Berichterstattung (Oktober 1978) wurden folgende Meßverfahren getestet /3, 4/:

- Dragbody + Turbinendurchflußmesser + 2-Strahl- γ -Densitometer
(Euratom Ispra: LOBI-Projekt, RS 109)
- Temperaturkorrelationsverfahren
(TU-Berlin-IKT, RS 135)
- Dragbody
(Battelle-Frankfurt, RS 147)
- Radionuklid-Meßverfahren + 3-Strahl- γ -Densitometer
(KfK-LIT, PNS 4214, RS 146)
- LOFT - Free Field DTT (Drag-Disc-Turbine-Transducer) + 3-Strahl- γ -Densitometer in einer 5" und 3" Teststrecke
SEMISCALE-Full Flow DTT + 2-Strahl- γ -Densitometer in 3" Teststrecke (mit drag disc und drag-screen)
Scanning- γ -Densitometer
(EG & G Idaho, Inc., Idaho Falls/USA)
- True Mass Flow Meter (TMFM) (erste Messungen)
(KfK-IRE, PNS 4236)
- Zweiphasen-Teststrecke zur Code-Verifizierung
(KfK-IRE, PNS 4126)

6. Literaturverzeichnis

- /1/ KfK 2375 PNS Halbjahresbericht 1976/1, (S. 221 - 230)
- /2/ KfK 2435 PNS Halbjahresbericht 1976/2 (S. 202 - 208)
- /3/ KfK 2500 PNS Halbjahresbericht 1977/1 (S. 206 - 223)
- /4/ KfK 2600 PNS Halbjahresbericht 1977/2 (S. 240 - 247)
- /5/ VDI-Wasserdampfatafeln, Sechste Auflage, 1963, Springer Verlag.
- /6/ VDI 2040 Blatt 1, Entwurf VDI-Richtlinien, Oktober 1971, Abschnitt 3.2.
- /7/ DIN 1952, VDI-Durchflußmeßregeln, August 1971.
- /8/ H. John, J. Reimann,
Seriellcs 5-Strahl- γ -Densitometer zur Dichtemessung einer
Zweiphasenströmung; KfK 2783.
- /9/ A. Megerle,
(1978) unveröffentlicht
- /10/ W. Heep, U. Padligur,
Multiplexer zur Übertragung von Meßwerten an ein PDP11-
Rechensystem; Handbuch 1978, unveröffentlicht
- /11/ Gordon D. Lassahn, EG&G Idaho Inc.
TREE-NUREG 1111, Okt. 1977, Loft Three-Beam Densitometer
Data Interpretation.
- /12/ St. Müller,
Verfahren und Einrichtung zum Identifizieren einer Zweiphasen-
Strömung, Reaktortagung 1978, Hannover (Germany) Apr. 5-7, 1978
pp. 174-177.

- /13/ J. Reimann, H. John,
Phasenverteilung in horizontaler Luft-Wasser- sowie Dampf-
Wasser-Strömung; Reaktortagung 1978, Hannover, Germany,
April 4-7, 1978, pp. 170-173.
- /14/ W. Riebold, D. Barschdorf, G. Class, G. Hampel, R. Kosfeld,
R. Löffel, J. Reimann, U. Wesser,
Summary of German Instrumentation Research; 6th Water
Reactor Safety Res. Inf. Meeting, Wash, Nov. 7-11, 1978.
- /15/ J. Reimann, H. John,
Measurements of the Phase Distribution in Horizontal Air-
Water- and Steam-Water-Flow; Second CSNI Specialist Meeting
on Transient Two-Phase Flow, Paris (France), 12th-14th June
1978.
- /16/ J. Reimann, H. John, St. Müller,
Impedance Probe for Detecting Flow Regime and Measuring the
Phase Distribution in Horizontal Air-Water- and Steam-Water-
Flow; Two-Phase Flow Instrumentation Review Group Meeting,
Troy, New York, March 13-14, 1978.

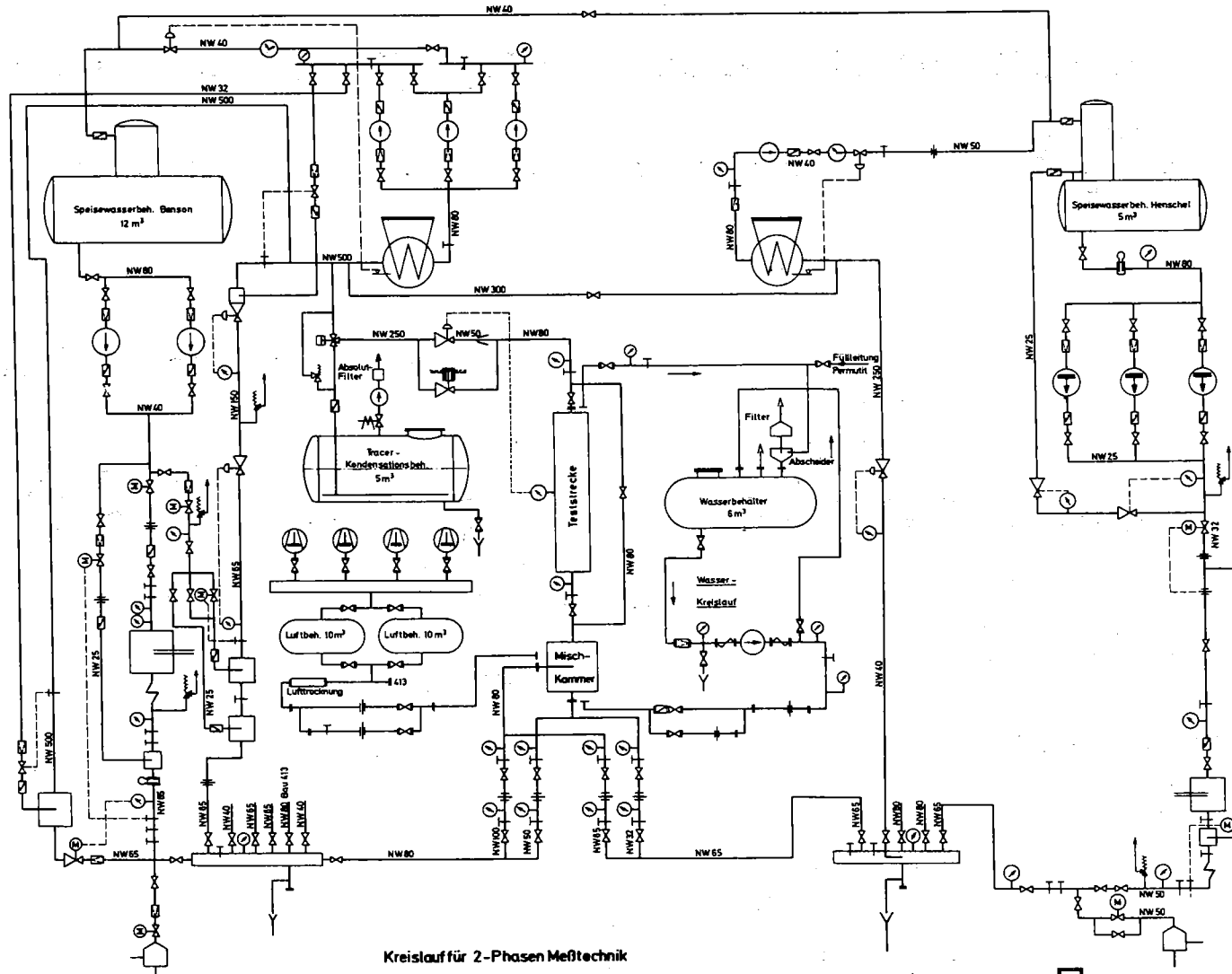
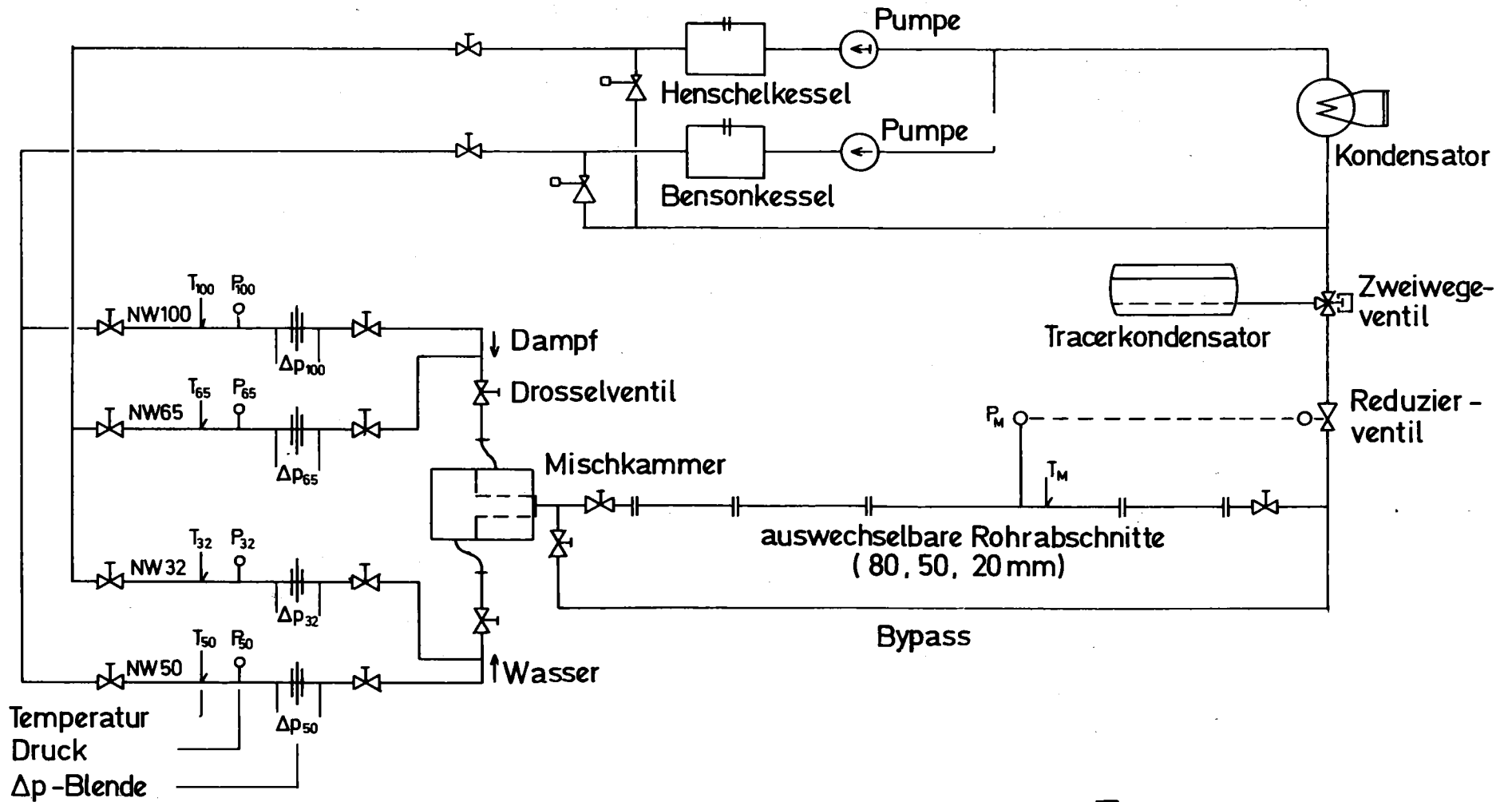


Abb.1 Kreislauf für 2-Phasen Meßtechnik Schema der Gesamtanlage



KFK

Abb. 2 2-Phasen Dampf-Wasser Kreislauf, Schema der Teststrecke

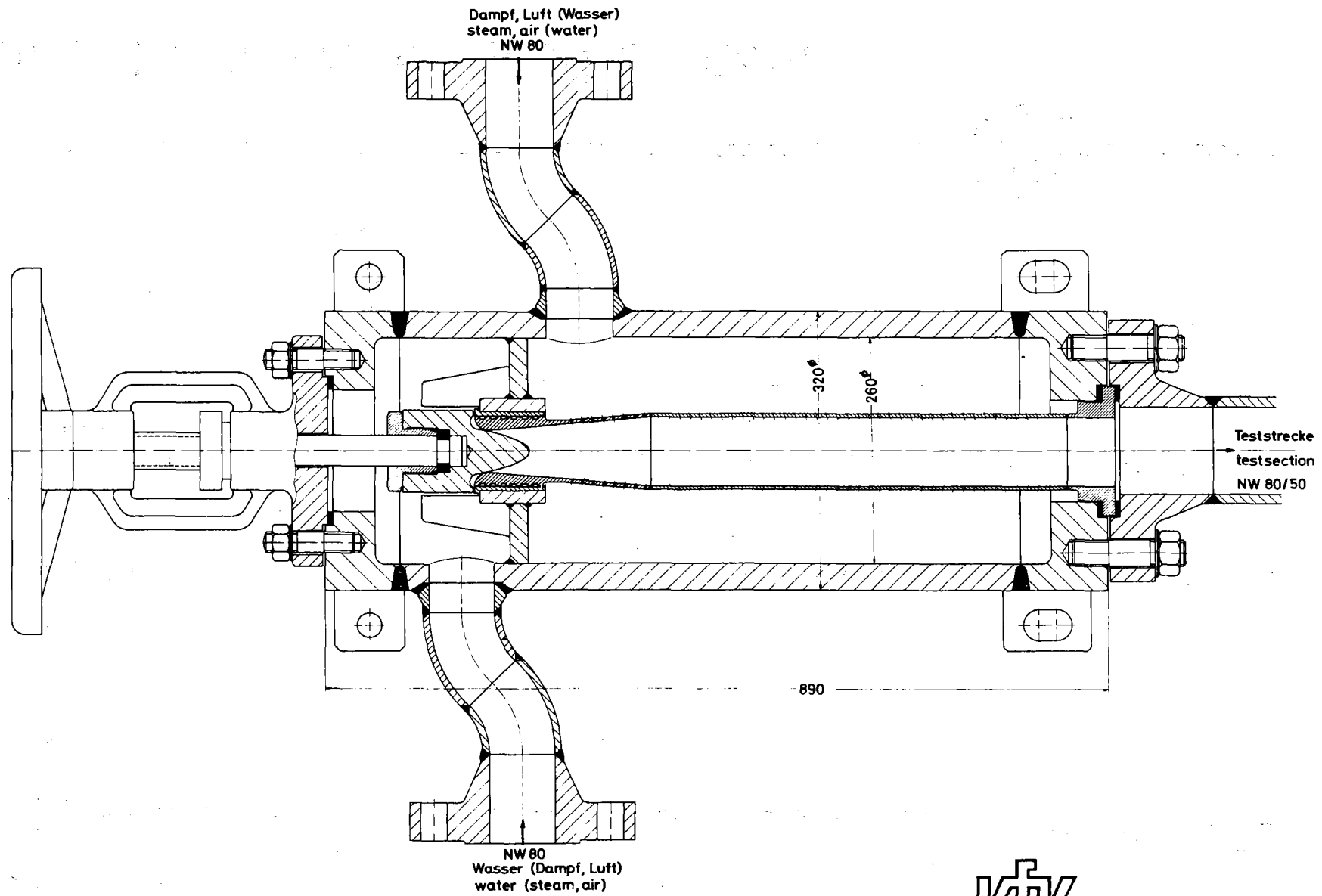


Abb. 3 Mischkammer

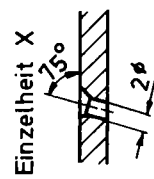
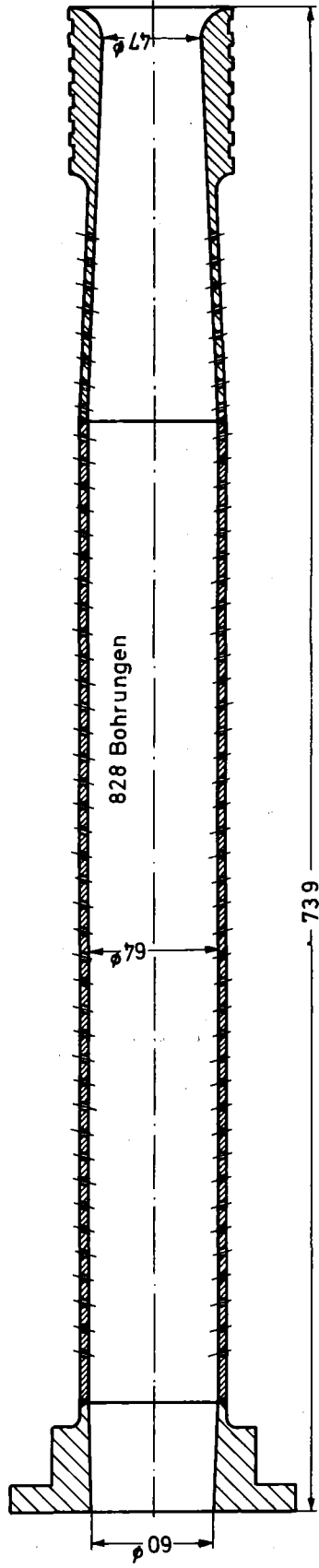
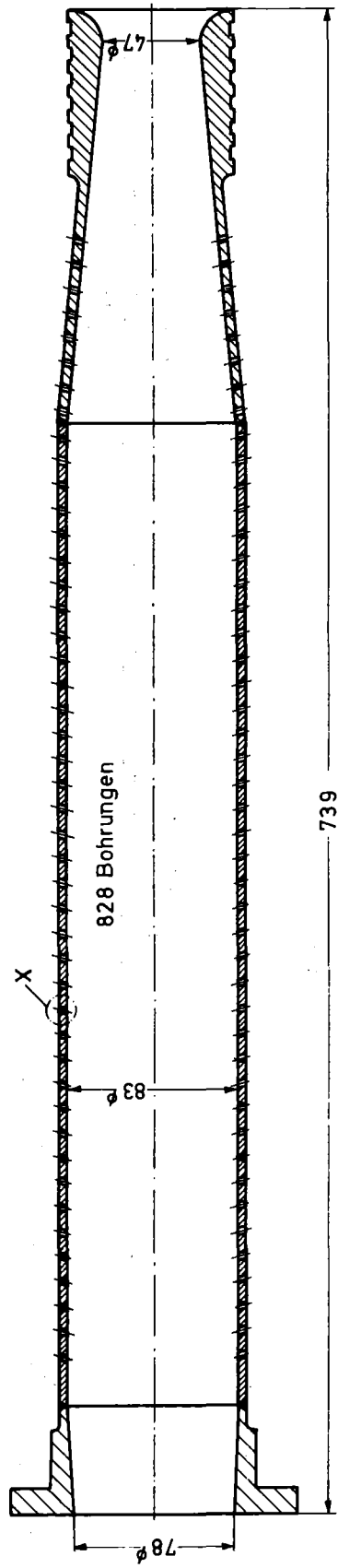
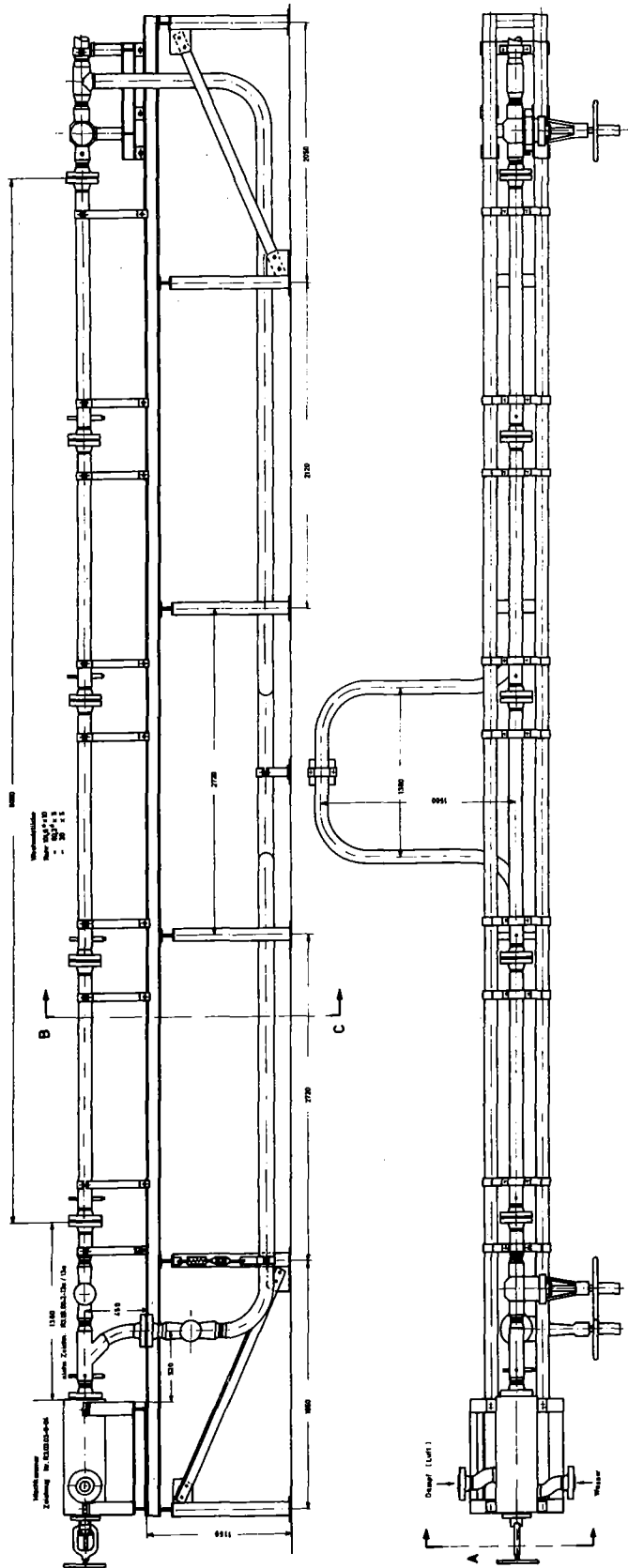
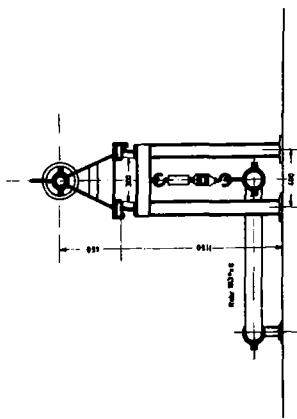


Abb. 4 Mischkammer - Mischer - Rohre



Schnitt B-C



Ansicht A

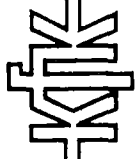
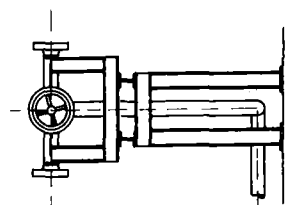


Abb. 5 Teststrecke

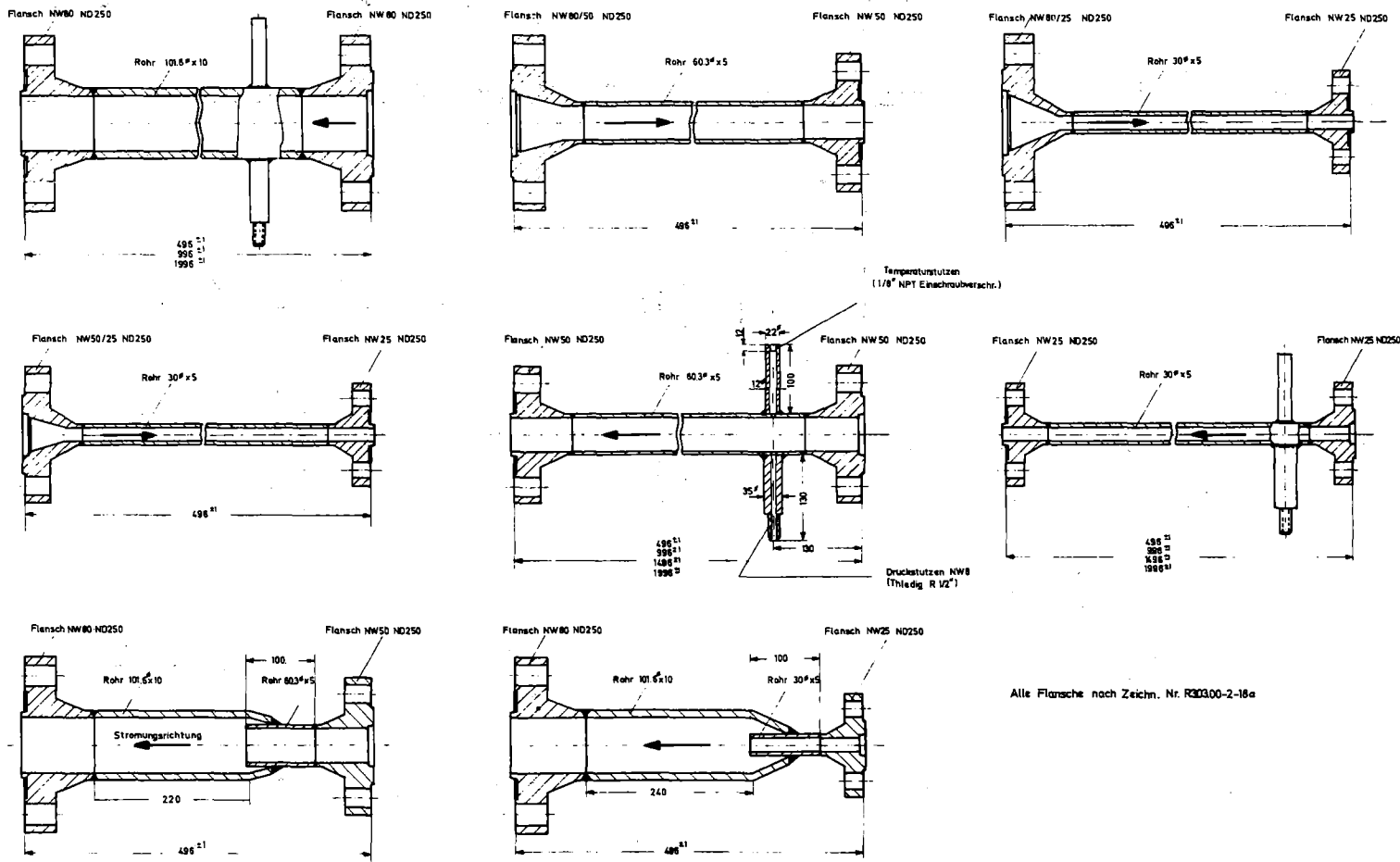


Abb. 6.1 Teststrecken - Rohre

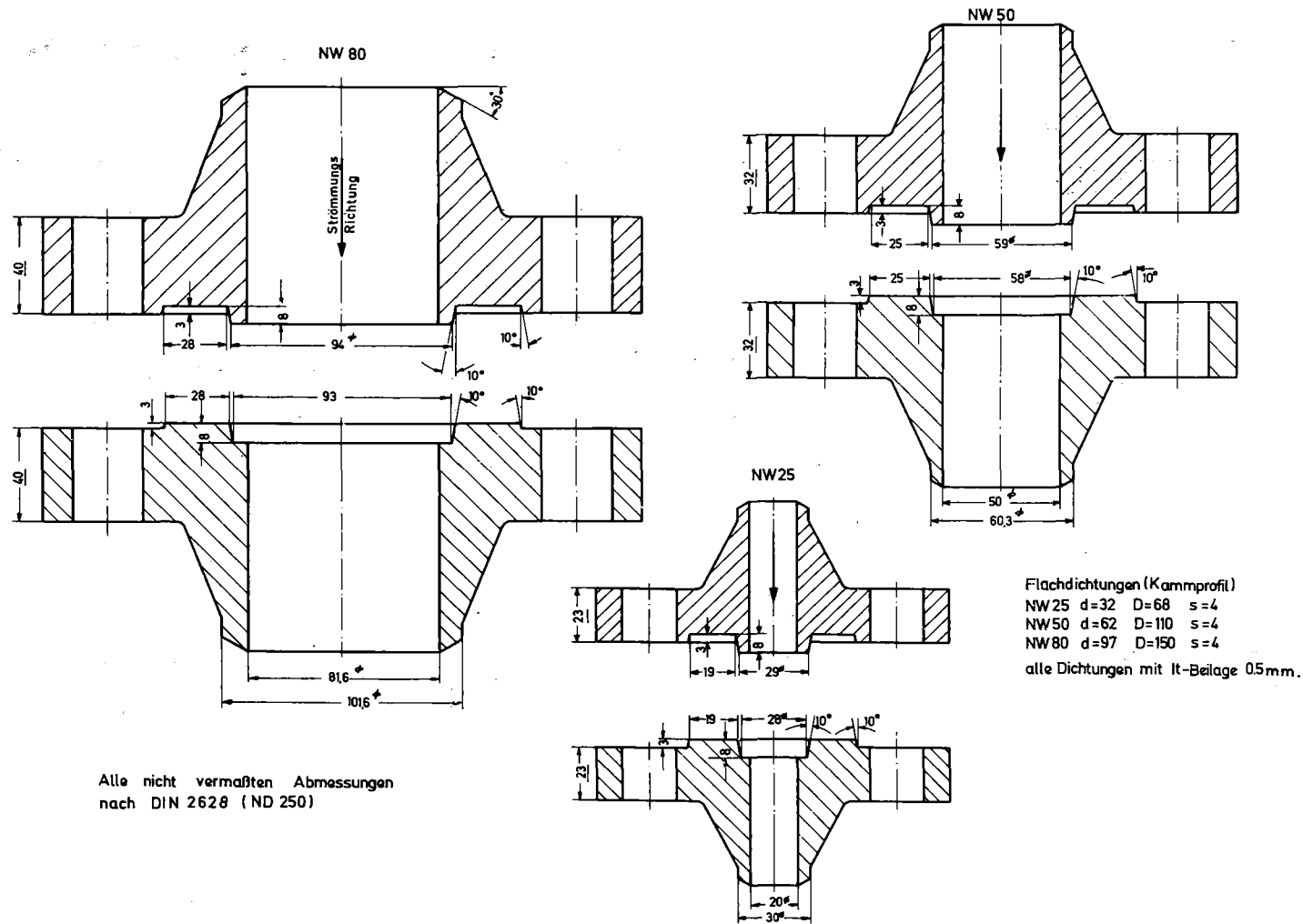
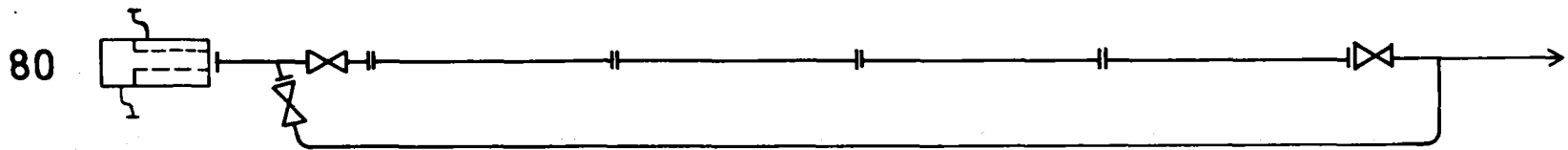
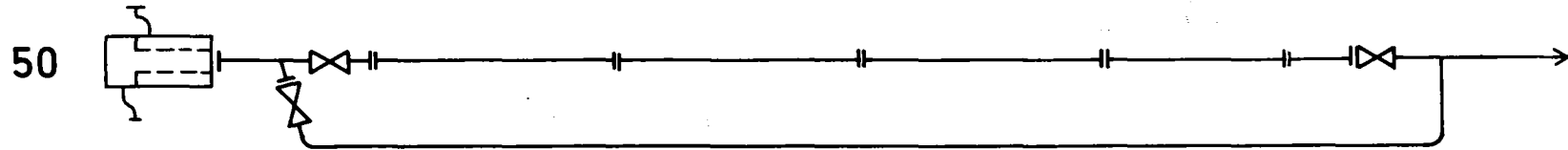


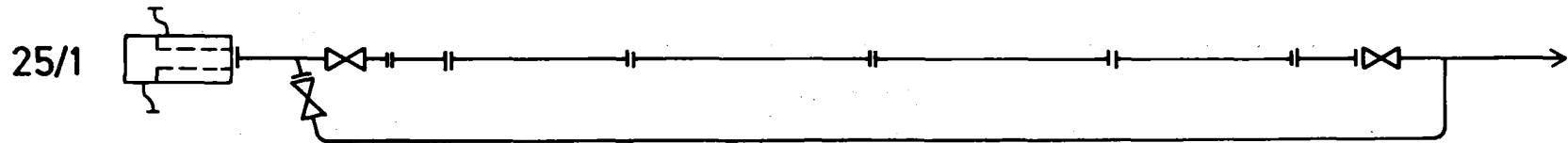
Abb. 6.2 Flansche für Teststrecken - Rohre



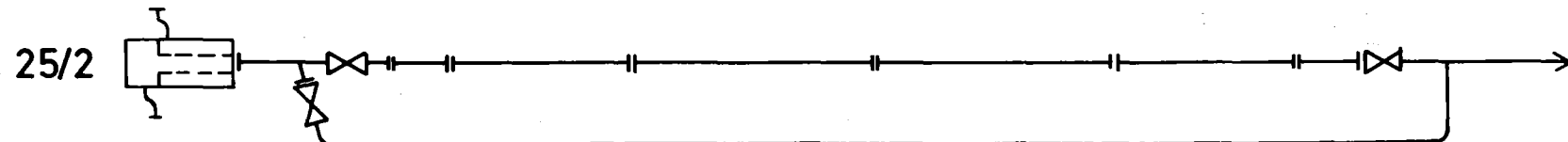
Bezeichnung	M-Ein.	Abzweig	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr
Länge m		1,36	2	2	2	2
Nennweite	80	80	80	80	80	80



Bezeichnung	M-Eins	Abzweig	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	Ü-Ro
Länge m		1,36	2	2	2	1,5	0,5
Nennweite	50	50	50	50	50	50	50/80



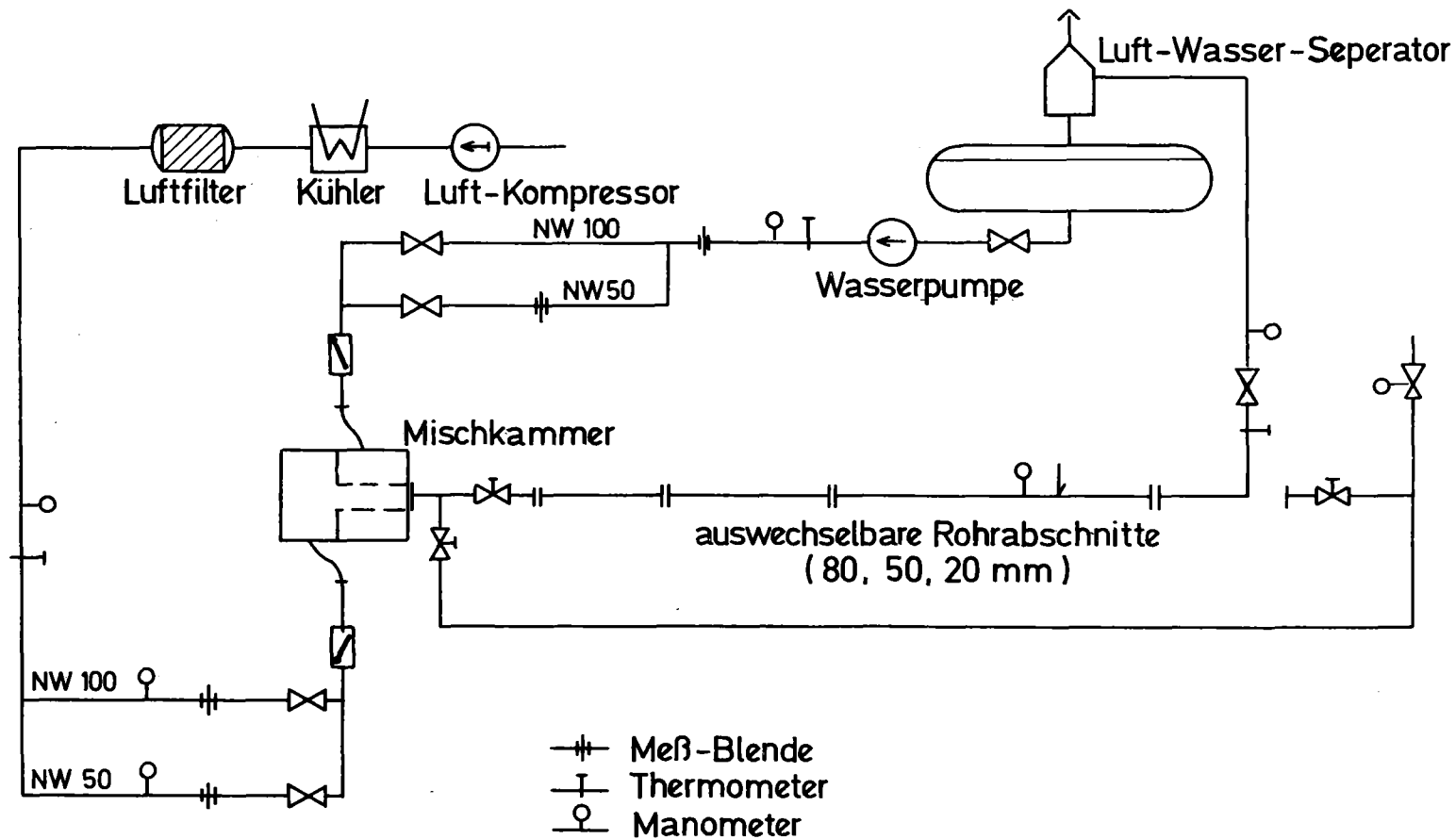
Bezeichnung	M-Eins	Abzweig	Ü-Ro	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	T-Ro	Ü-Ro
Länge m		1,36	0,5	1,5	2	2	1	0,5	0,5
Nennweite	50	50	50/25	25	25	25	25	25	25/80



Bezeichnung	M-Eins	Abzweig	Ü-Ro	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	T-Rohr	T-Ro	Ü-Ro
Länge m		1,36	0,5	1,5	2	2	1	0,5	0,5
Nennweite	80	80	80/25	25	25	25	25	25	25/80

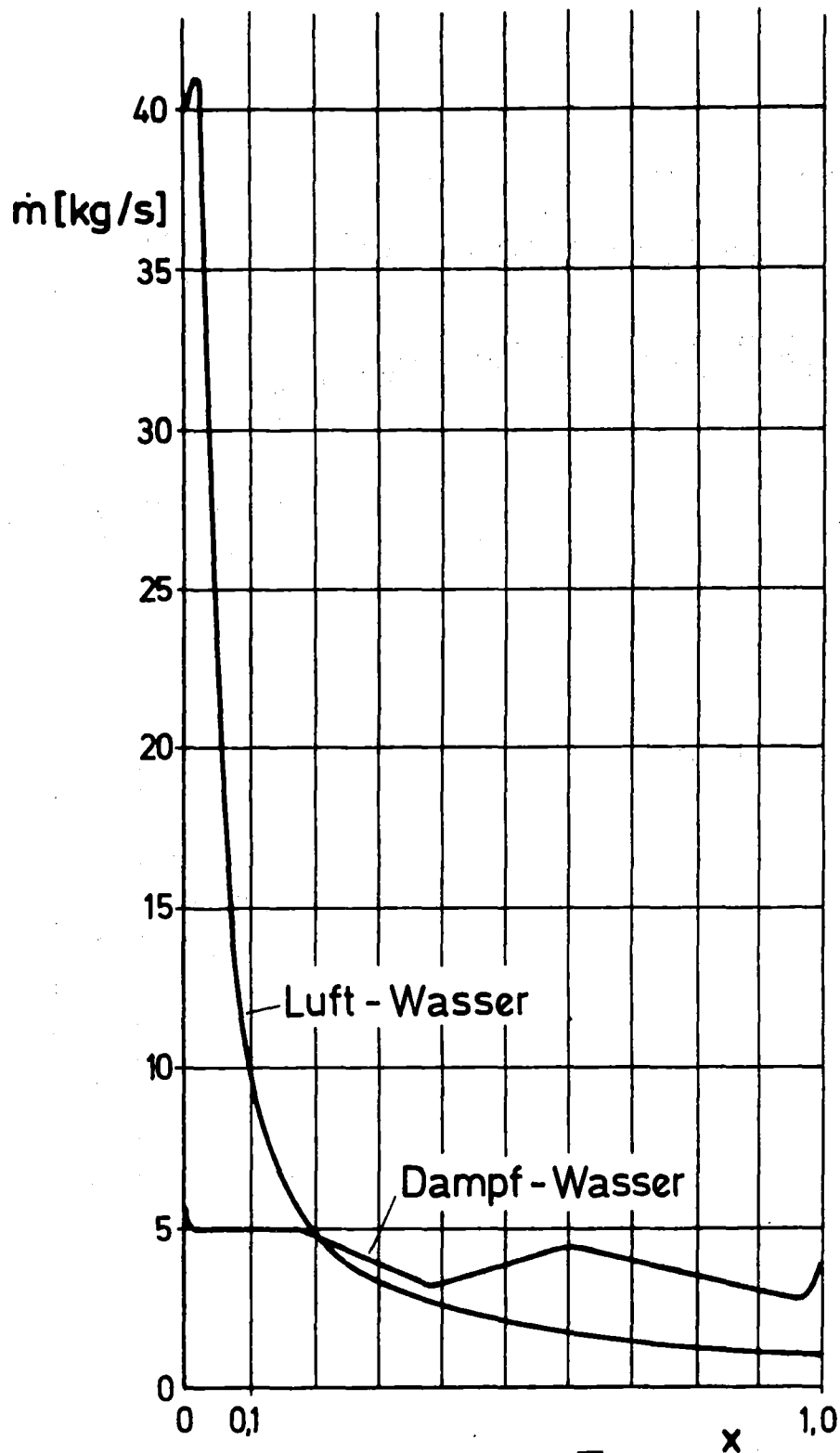


Abb.7 Teststrecke - Grundkombinationen



KJK

Abb.8 2-Phasen Luft-Wasser-Kreislauf Schema der Teststrecke



KIK

Abb. 9.1 Verfügbarer Massenstrom des 2-Phasen-
kreislaufes bei Dampf-Wasser oder
Luft-Wasserbetrieb

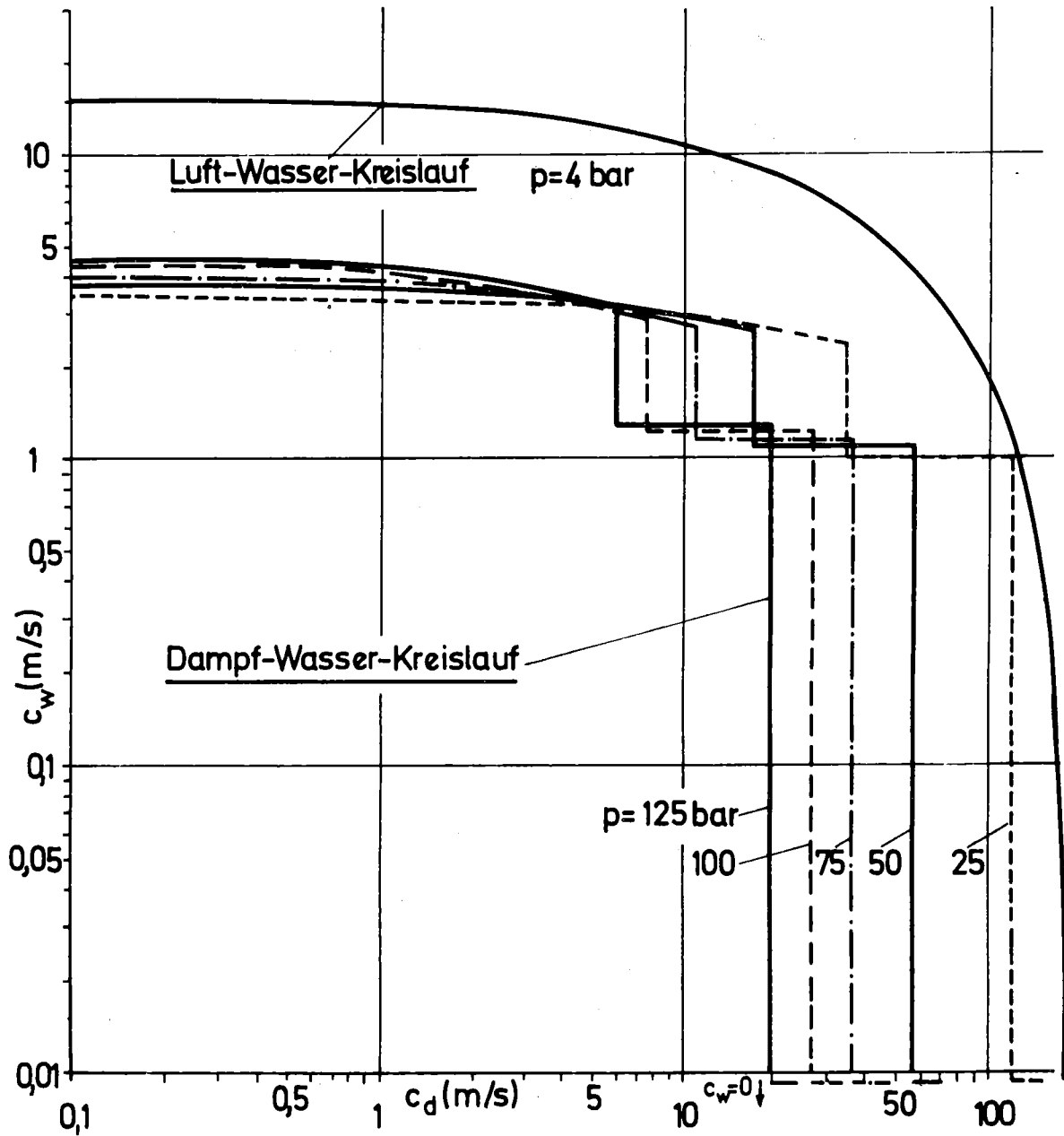


Abb. 9.2 Betriebsbereiche der 2-Phasen-Kreisläufe
(Superficial velocities für $d = 50\text{mm}$)

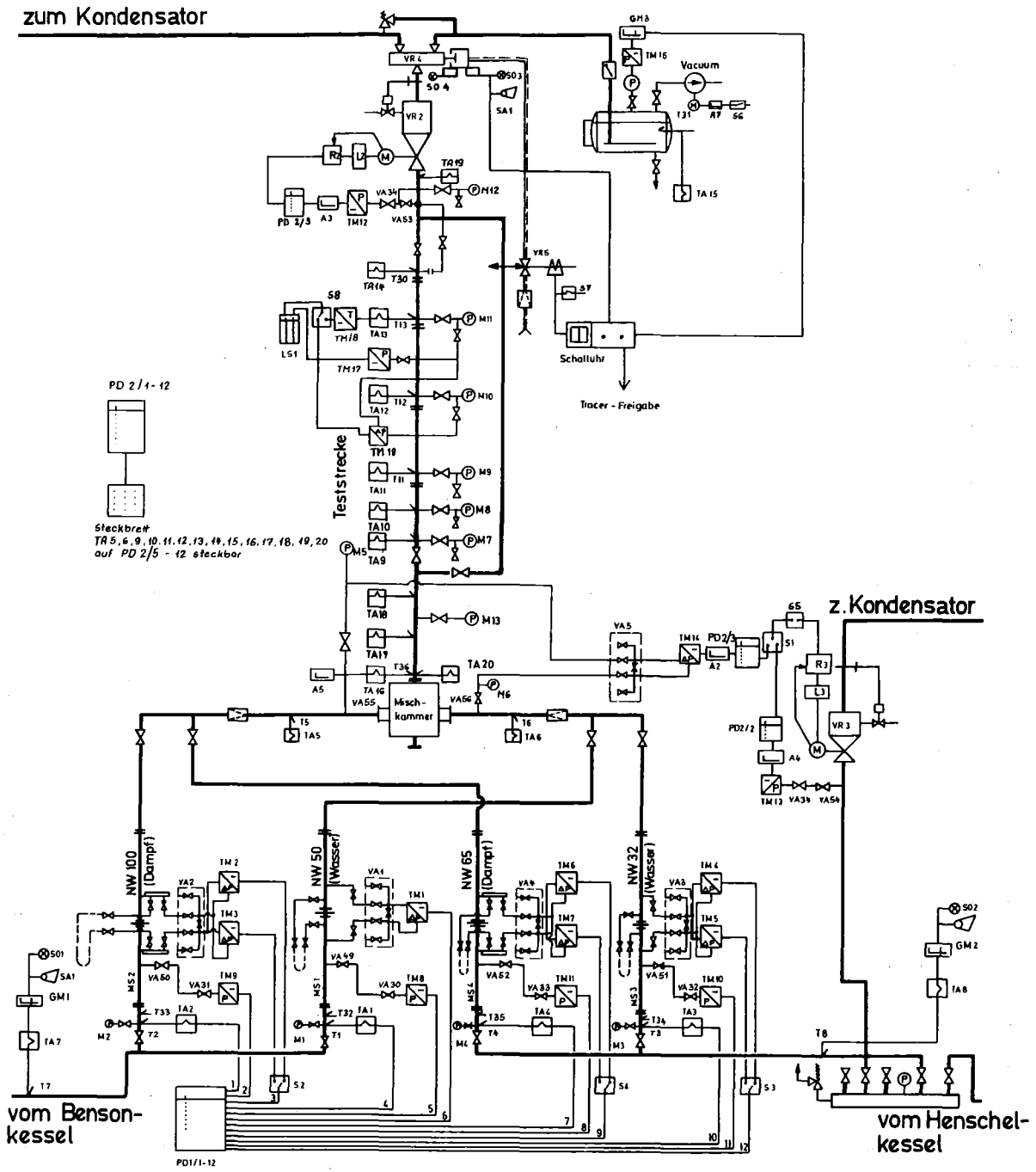


Abb.10 Kreislauf für 2-Phasenmeßtechnik
Meß - und Regelschema

Symbol	Bezeichnung	Hersteller	Firmen-Name	Techn. Daten	Bemerkungen
TM1	Meß-Umf.f.Diff.Druck	H & B	TVE-155	Meßber. 0-2bar 0-20 mA rad	Einstellz. 0,3 sec ND 250
2	"	"	"	0-2bar " "	" "
3	"	"	"	0-250mbar " "	" "
4	"	"	"	0-2bar " "	" "
5	"	"	"	0-250mbar " "	" "
6	"	"	"	0-2bar " "	" "
7	"	"	"	0-250mbar " "	" "
8	Meß-Umf. f. Druck	"	TDE-120	0-165bar 0-20 mA	" "
9	"	"	"	" "	" "
10	"	"	"	" "	" "
11	"	"	"	" "	" "
12	"	"	"	" "	" "
13	"	"	TDE-220	" "	" "
14	Meß-Umf.f.Diff.Druck	"	TDE-170	0-10bar 0-20 mA	" "
15	Meß-Umf.f.Druck	"	"	" "	im Bensonkessel eingeb.
16	"	"	"	0,05-0,5ata 0-20 mA	Vacuum
17	"	"	TDE-220	0-165bar	"
18	Meß-Umf.f.Temperatur	"	Geatherm 10	0-600°C	"
19	Meß-Umf.f.Diff.Druck	"	TDMZ 199	0-5000 mm WS rad	"
T 1-36	Thermo-Elemente	KfK	"	Ni-CrNi 1/8" Ø Mantelelem.	Einschraubversch. 1/8"NPT
TA1-20	Thermoelem.-Ausgl.	"	"	Bezugstemperatur 0°C	"
PD 1	12-Punkte-Drucker	H & B	Polycomp 2	Meßbereiche: 0-600°C, 0-100 %	Meßbereichsk.f. mV und mA
2	"	"	"	"	"
LS1	2-Linienschreiber	"	Minicomp	Meßber.: (0-20mA) 0-600°C, 100 %	Einstellzeit ca. 1 sec.
R2 L2	Dreipkt.Schritt-Regl.	"	Motric 96E m.	"	"
R3 L3	"	"	" m.Leitger.	"	"
VR 2	Zweiph.-Drosselvent.	Schroed.	DZR 88-163	50/260 Ø	mit Wassereinspritzung
3	Drosselventil	"	DZR 58-133	26,5/160 Ø	"
4	Zweiwege-Ventil	Phönix	"	NW 250 ND 10	mit Kolbenbetätigung
5	Magnetventil	"	331 B 21	R 1/2"	für Druckluft
VA 1-5	5-fach Ventilblöcke	"	"	"	"
VA6-56	Manometer-Ventile	"	"	"	"
M1-17	Rohrfedermanometer	"	"	0-250 ata K.1,0	"
S01-4	Optische Signale	H & B	"	Leuchttafel	"
SA 1	Akustisches Signal	"	"	Horn	"
S 1-8	Handschalter	"	"	"	"

ABB. 11: INSTRUMENTIERUNGSLISTE ZUM REGELSCHEMA

STABILE VERSUCHSZUSTAENDE NICHT ERREICHT (34)

MESSWERTE :MESS-STRECKE1:WASSER MESS-STRECKE2:DAMPF

VERSNR = 24.0578
 ZEIT =09:08:09

	P [MV] [BAR]	T [MV] [C]	DP [MV] [BAR]	DT [C]
W	1098.630	7.734	3393.546	
W	(5) 37.113	(4) 190.183	(6) 0.955	-55.720 (31)
D	925.291	7.412	4.883	
D	(2) 31.365	(1) 182.186	(3) 0.000	-54.115 (30)
M	822.752	7.720		
M	(8) 28.307	(7) 189.819		

STABILE VERSUCHSZUSTAENDE ERREICHT (32)

RECHENWERTE

VERSNR = 7.0678
 ZEIT =17:15:08

	P [BAR]	T [C]	DT [C]	H [KCAL/KG]	W [M/S]	MP [KG/S]
W	(5) 48.930	(4) 224.052	(31) -38.479	(9) 229.770	(28) -0.009	(20) 0.007
D	(2) 49.945	(1) 294.062	(30) 30.252	(10) 694.571	(29) 9.868	(21) 0.476
M	(8) 50.400	(7) 269.289	0.000	(25) 678.016	(-) 0.000	(22) 0.483
	X	ALFAH				
	%	%				
M	(23) 1.027	(27) 1.001				



Abb. 12 + 13 Rechner - Ausdruck

2

STABILE VERSUCHSZUSTAENDE ERREICHT (35)

RECHENWERTE :MESS-STRECKE1:WASSER MESS-STRECKE2:WASSER

VERSNR = 31.0578
 ZEIT =13:27:57

	P [BAR]	T [C]	DT [C]	H [KCAL/KG]	WW/WD [M/S]	MP [KG/S]
W	(5) 67.541	(4) 265.699	-17.669 (31)	277.567 (9)	1.238 (28)	0.001 (20)
W	92.758	301.910	-3.594	323.265	3.989 (29)	2.086 (20)
M	(8) 53.945	(7) 264.981	0.000	321.012 (35)	0.000	2.087 (22)
	X	ALFAH				
	0.01%	0.01%				
M	0.103 (23)	0.763 (27)				



Abb. 14 Rechner - Ausdruck

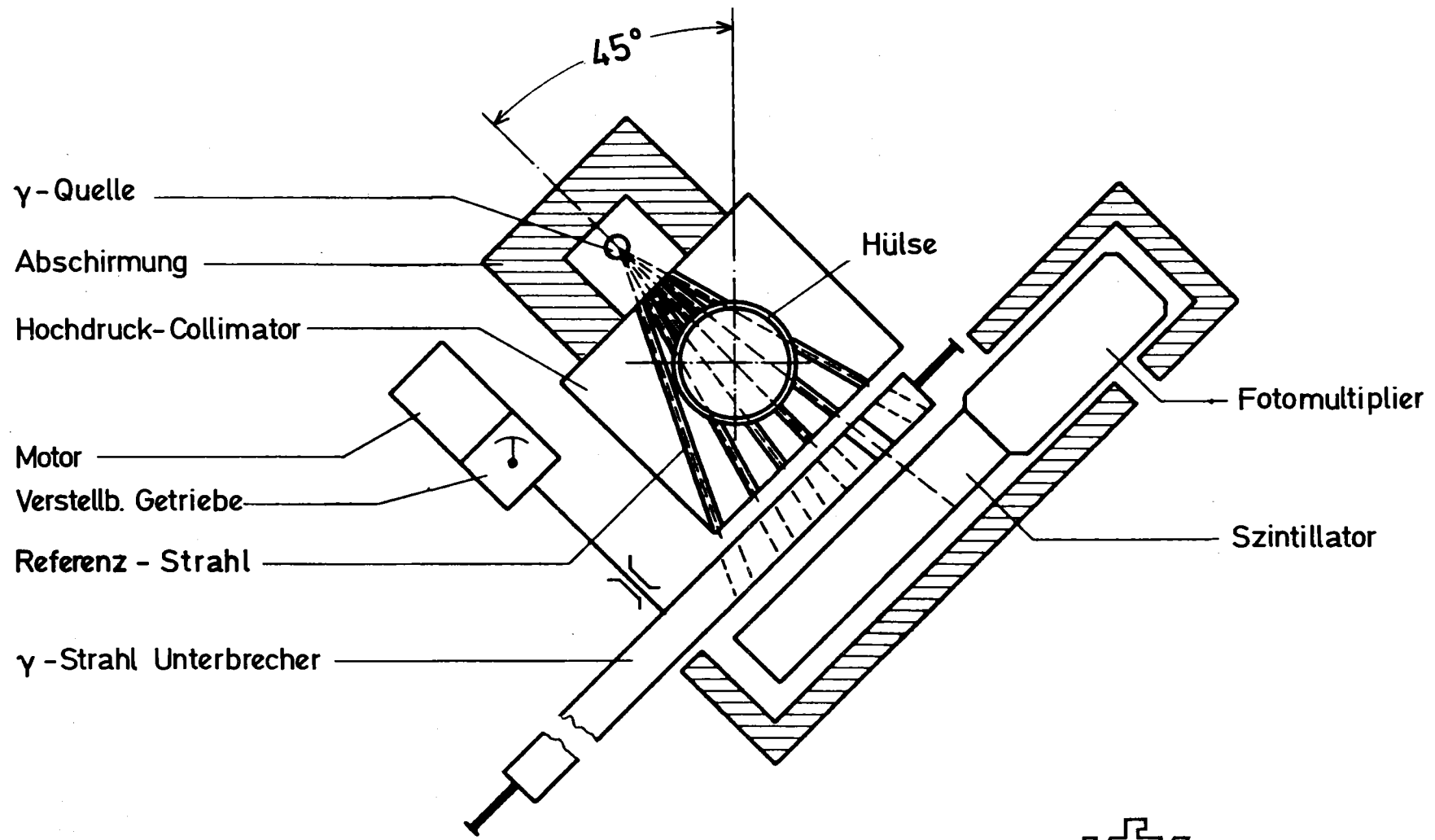
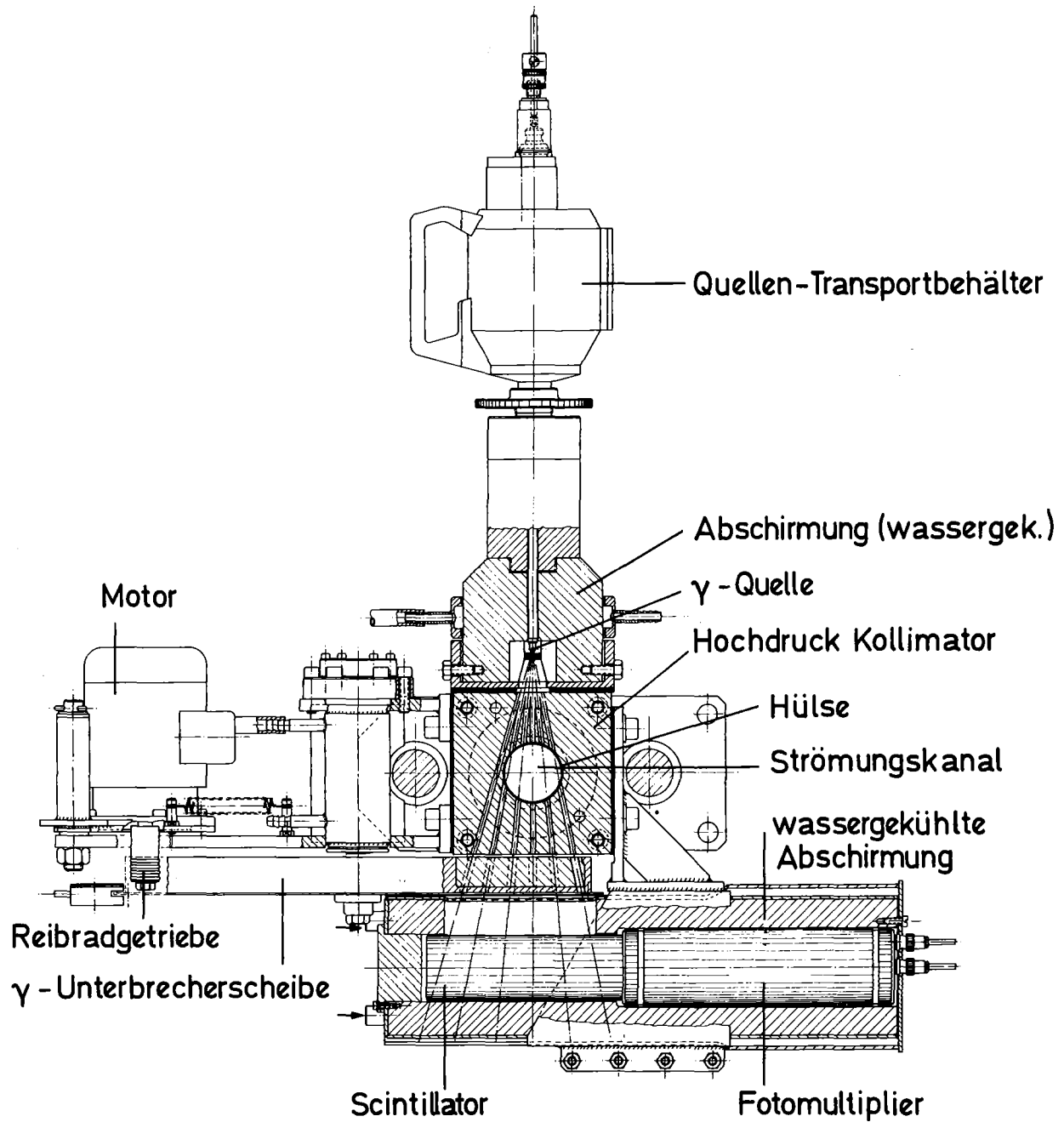


Abb.15 Serielles 5 Strahl γ - Densitometer (Schema)



KJK

Abb.16 Serielles 5 Strahl γ -Densitometer
(Querschnitt in senkrechter Position)

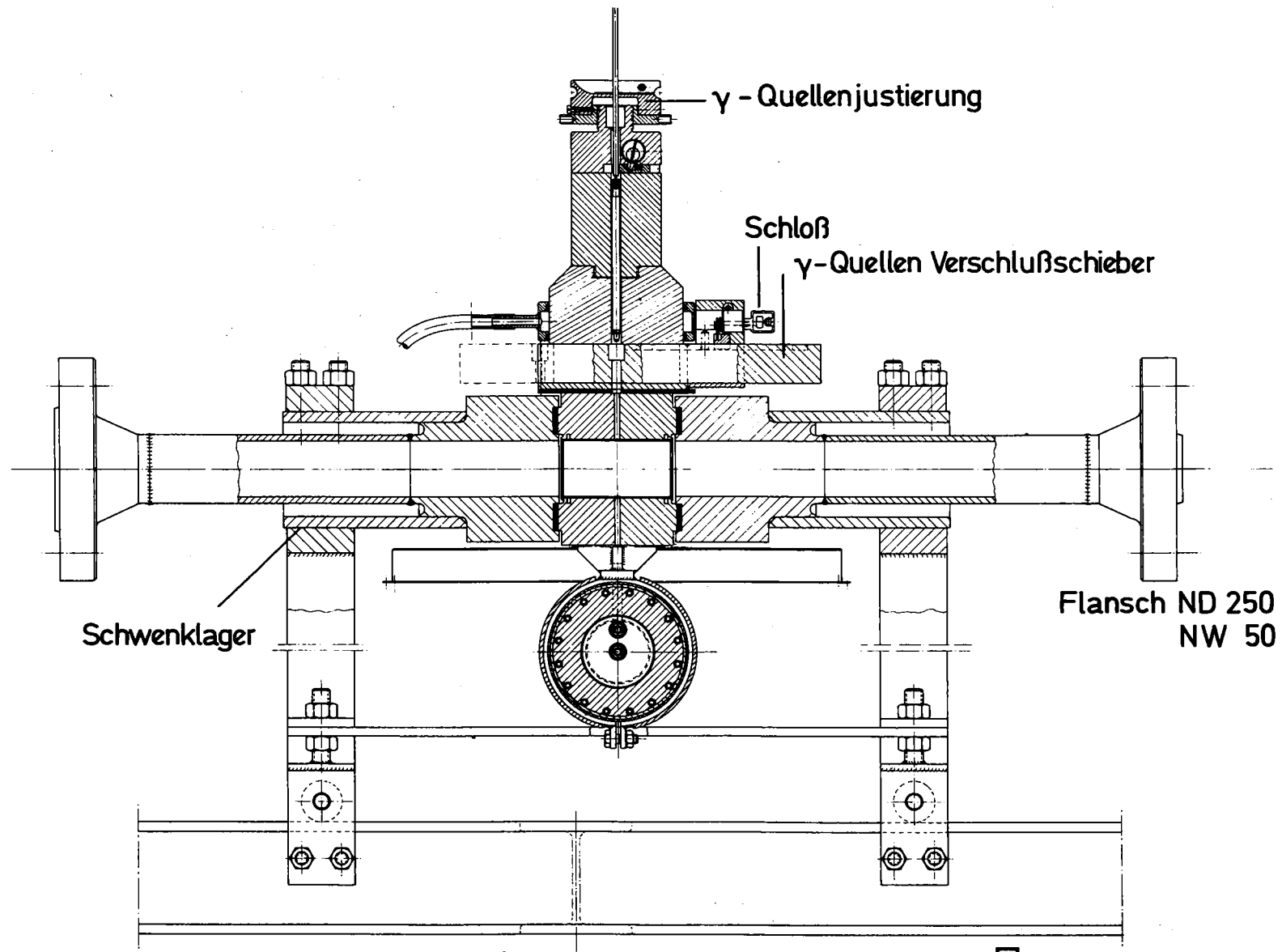


Abb.17 Serielles 5 Strahl γ -Densitometer (Längsschnitt)

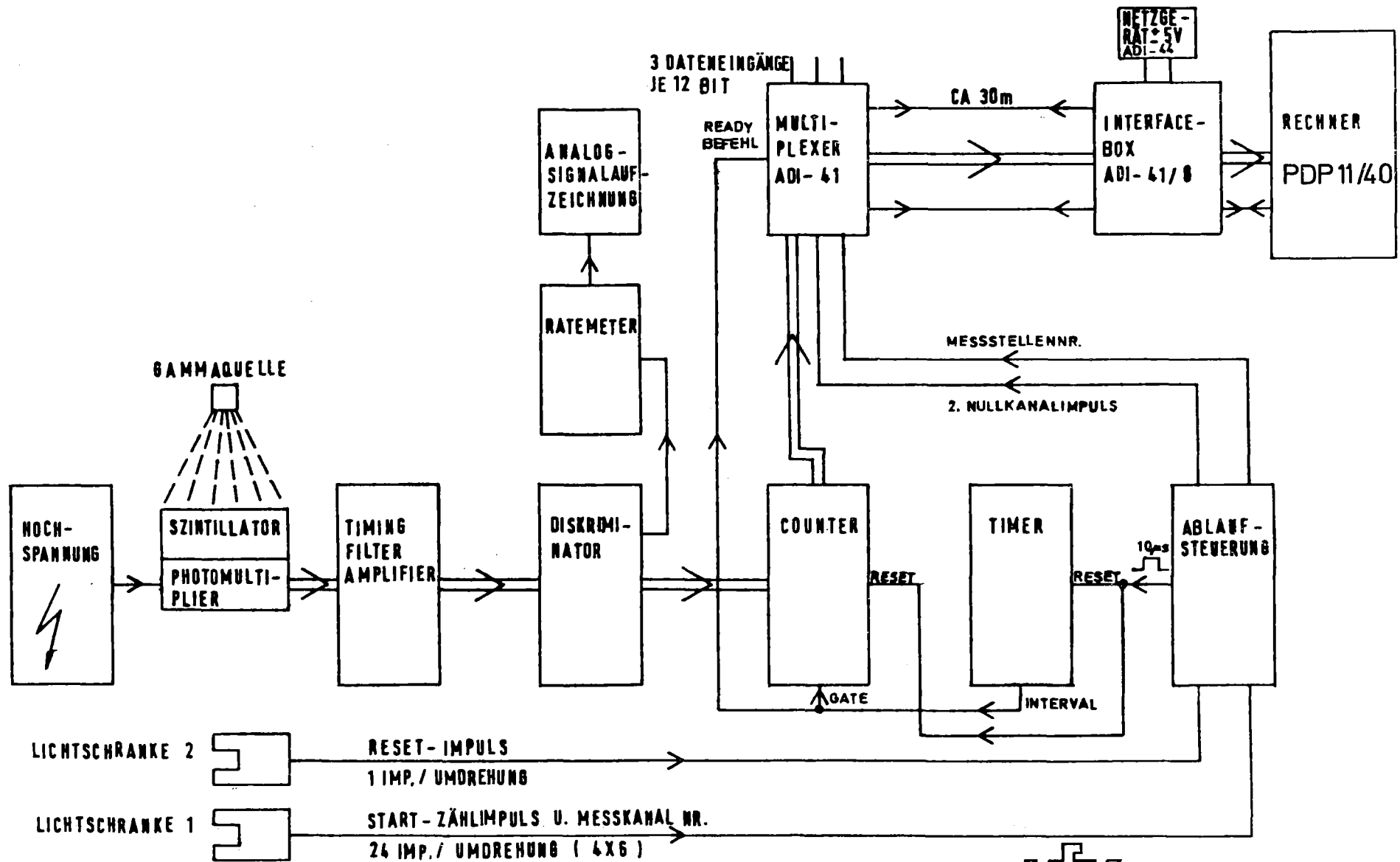
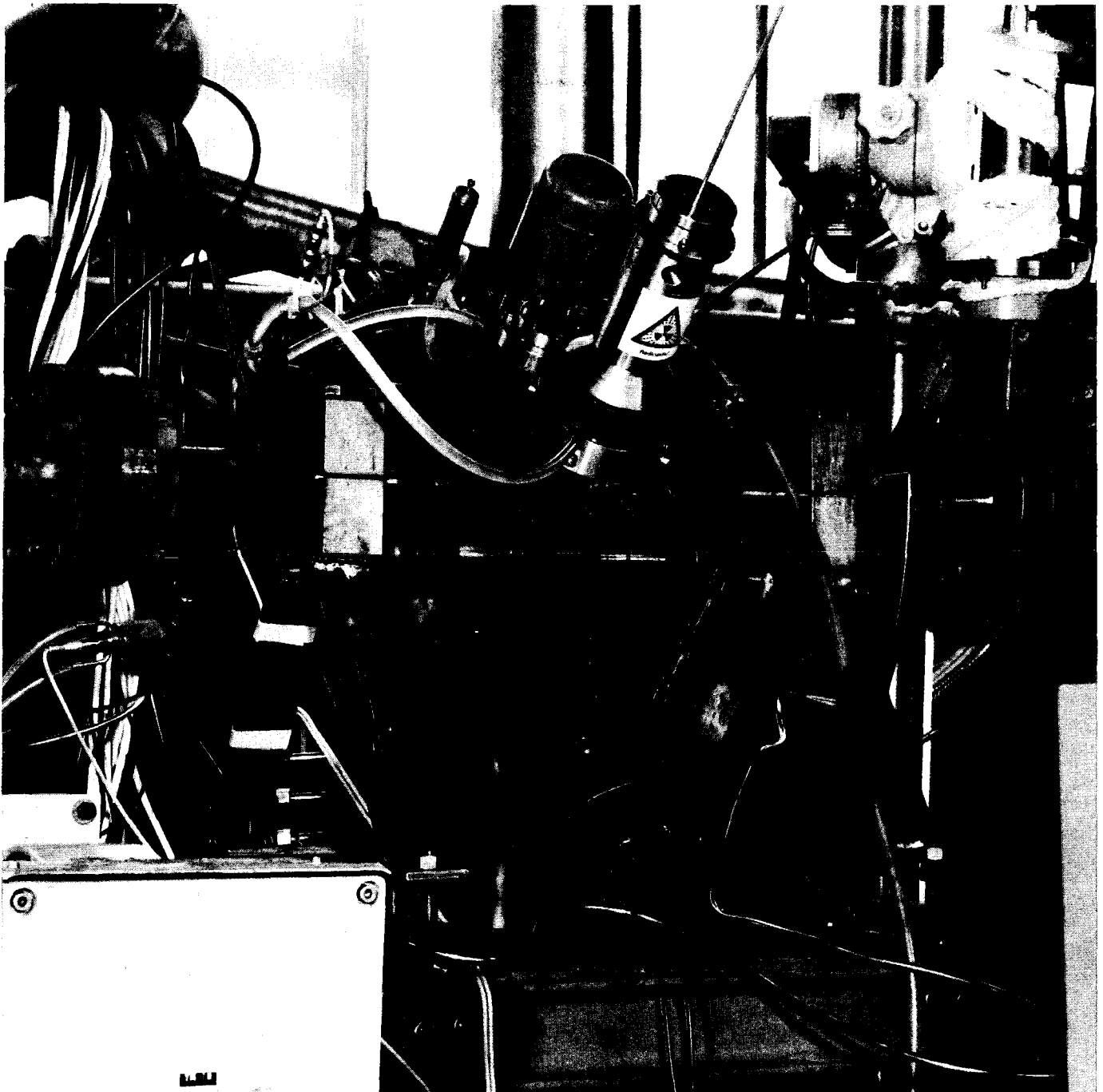
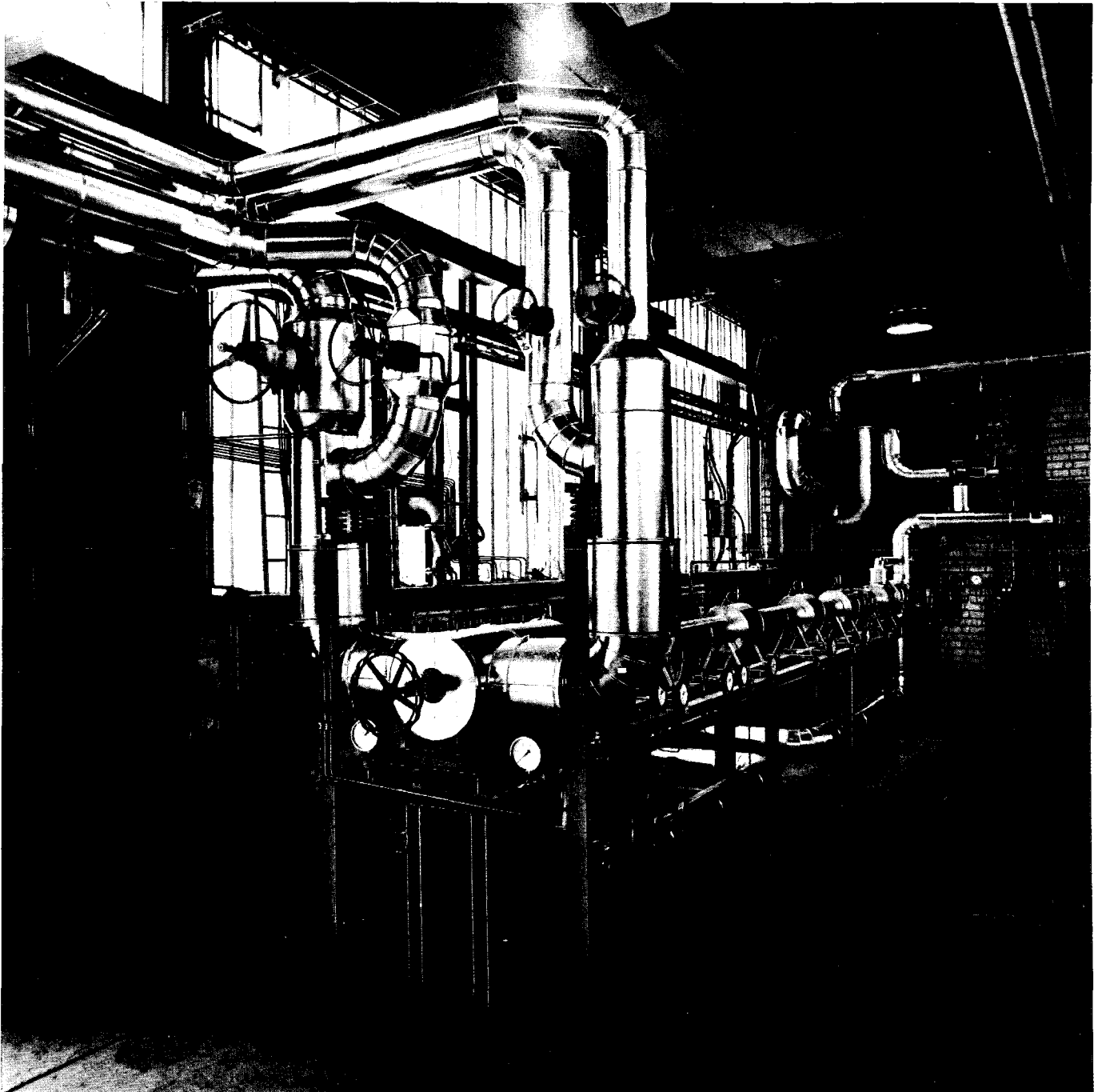


Abb.18 Elektronik für Serielles 5 Strahl- γ - Densitometer



KJK

Abb. 19 Serielles 5 Strahl γ Densitometer
45° geneigt



KIK

Abb. 20 Versuchsstand für 2-Phasenmeß-
technik (ohne Einbauten)



KTK

Abb.21 Versuchsstand für 2-Phasenmeßtechnik
(Wasserbehälter und Pumpe für Luft-
Wasserbetrieb)

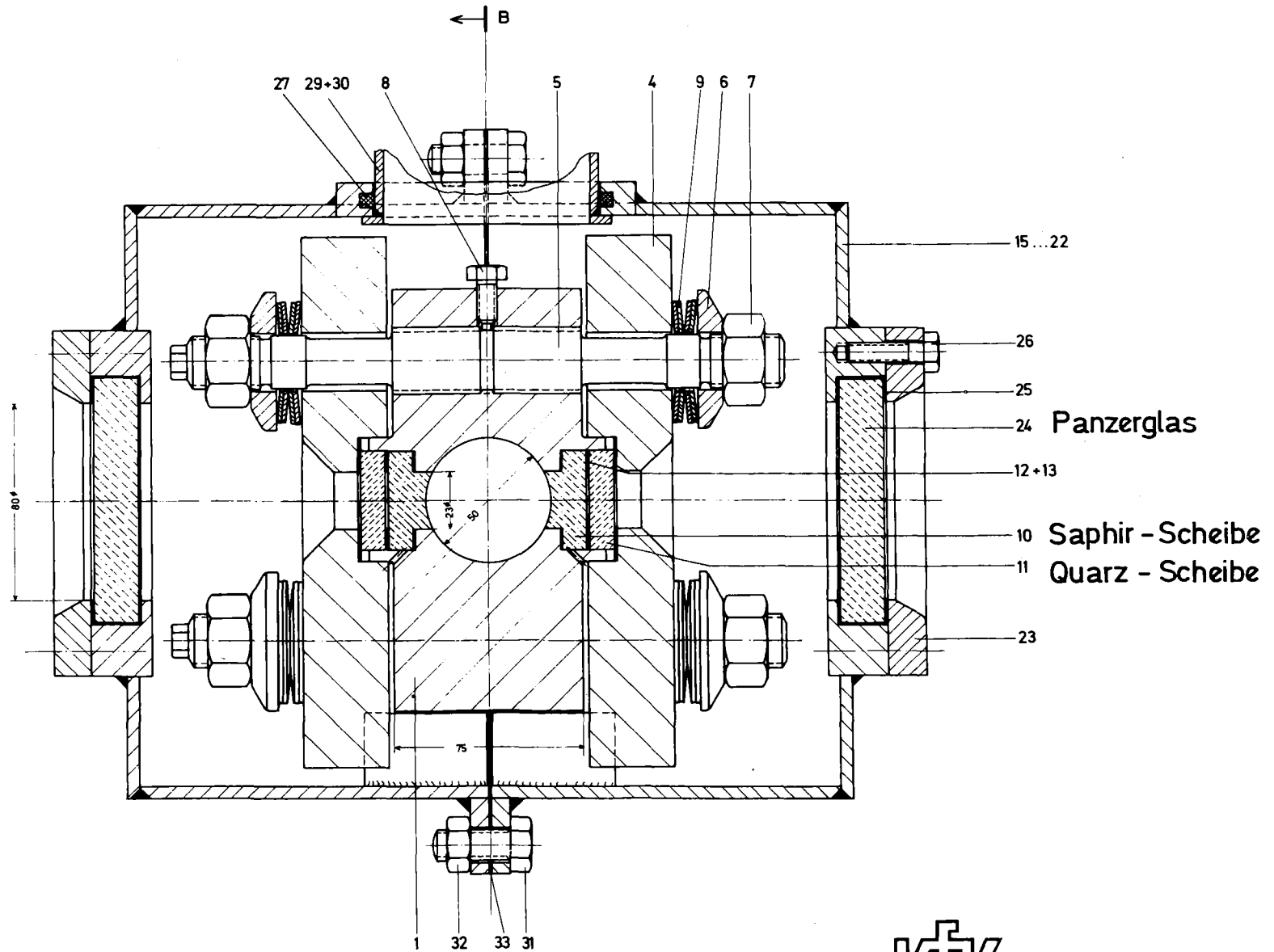


Abb. 22 Fenster für Beobachtung von 2-Phasenströmungen

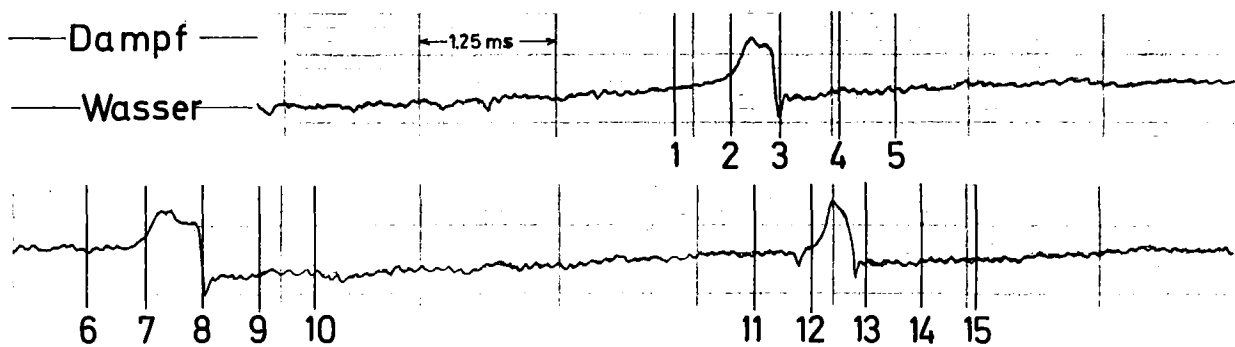
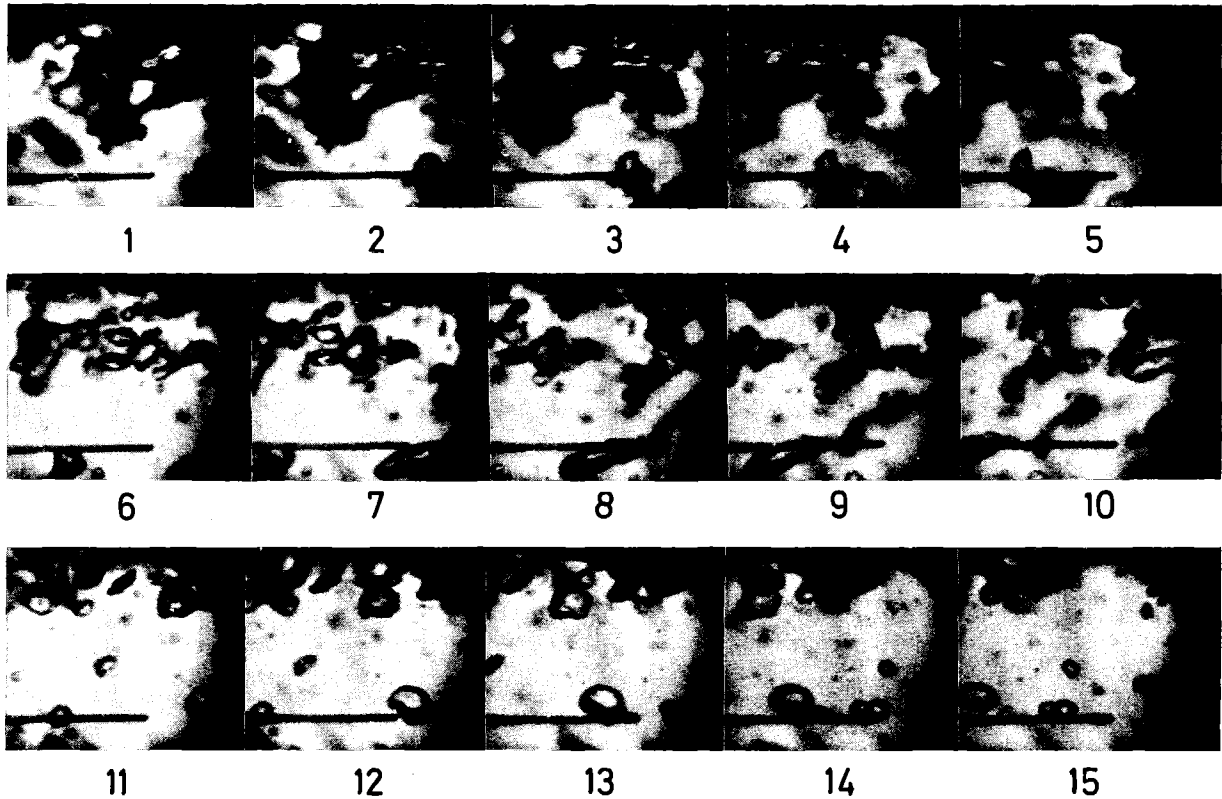
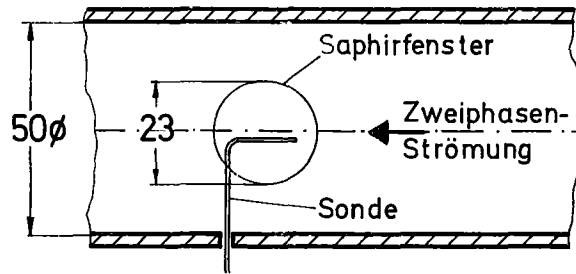
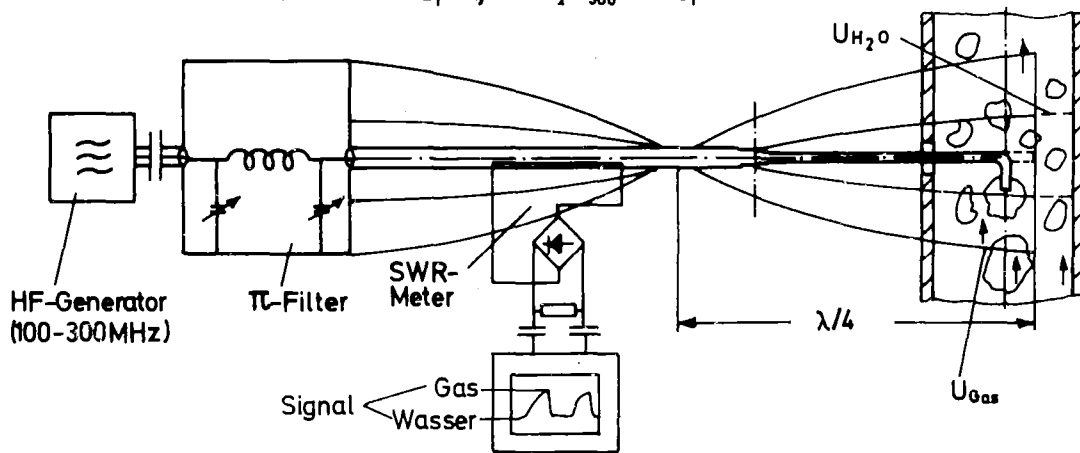


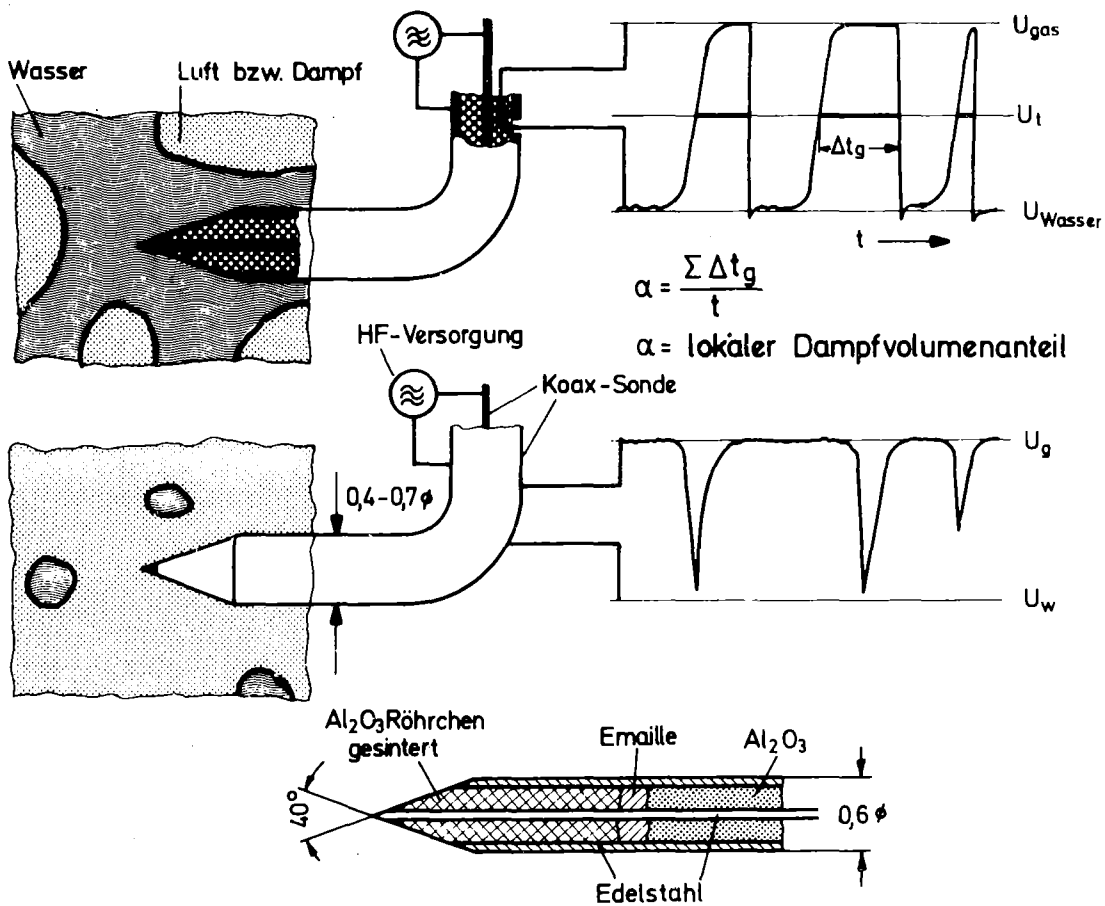
Abb. 23 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Bildabstand 0,5ms) und zugehöriges Sondensignal von einer Dampf-Wasser-Strömung ($\dot{m} = 3,5 \text{ kg/s}$, $x = 0,042$, $p = 50 \text{ at}$)

Äthyl Alkohol	$\epsilon_r = 24$	$H_2O_{20^\circ}$	$\epsilon_r = 81$
Aceton	$\epsilon_r = 20$	$H_2O_{100^\circ}$	$\epsilon_r = 53$
Freon	$\epsilon_r = 2,5$	$H_2O_{300^\circ}$	$\epsilon_r = 15$



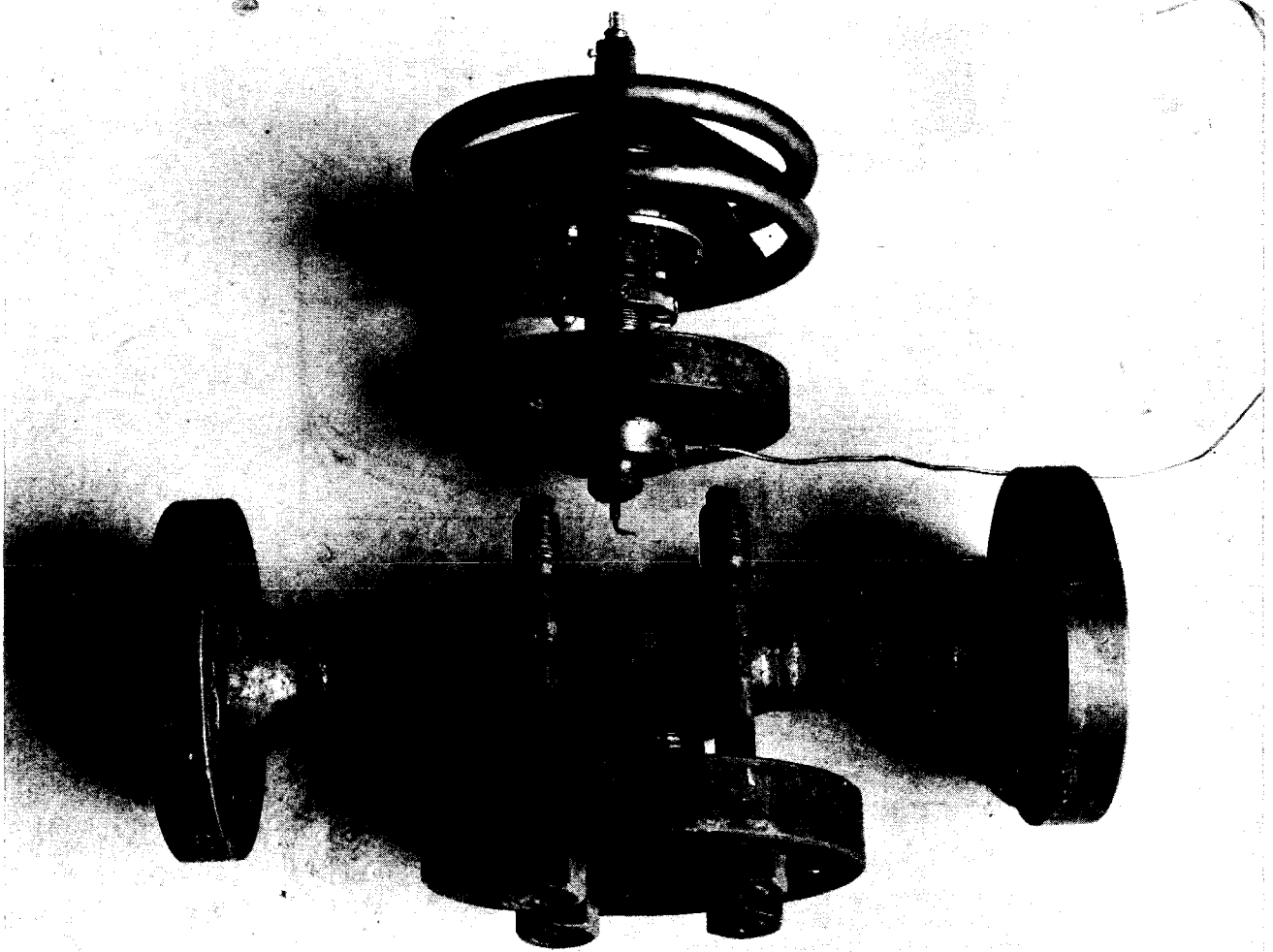
KIK

Abb.24 Meßprinzip der Impedanz - Sonde



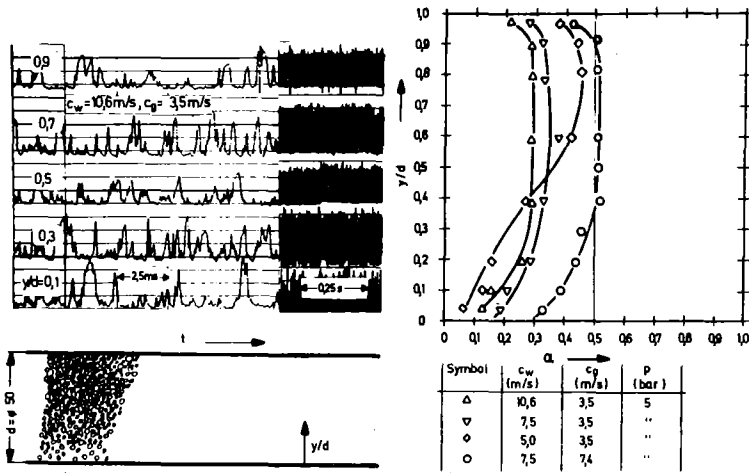
KIK

Abb.25 Details der Sondenspitze und Signale bei verschiedenen Strömungsformen

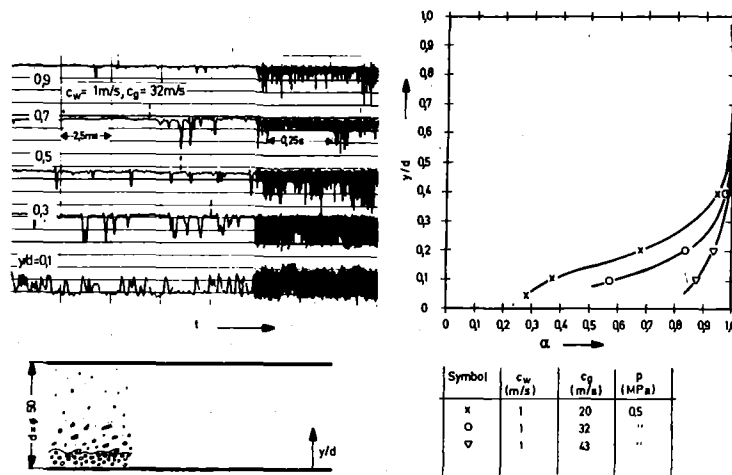


KTK

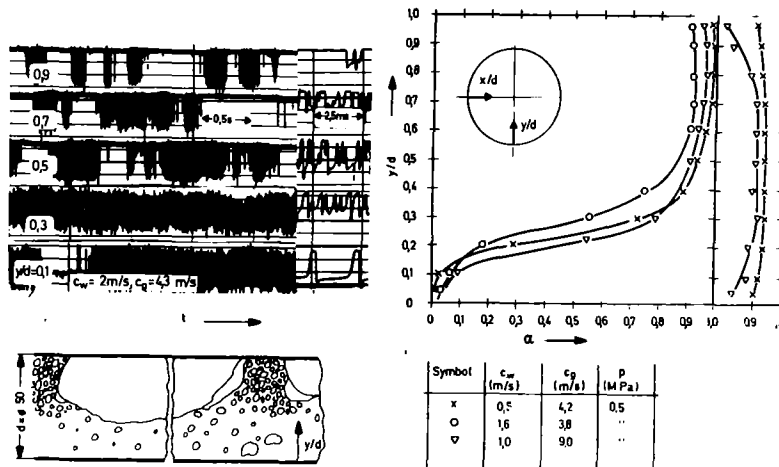
Abb.26 Traversierbare Impedanz-Sonde



Disperse Blasenströmung



Ring-Spritzerströmung



Schwallströmung



Abb.27 Impedanz-Sonden Signale und Profile des Dampf-volumenanteils bei verschiedenen Strömungsformen