



KfK 2783
November 1979

Serielles 5-Strahl- γ -Densitometer zur Dichtemessung einer Zweiphasenströmung

H. John, J. Reimann, H. Alsmeyer, H. Hahn, A. Megerle
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 2783

Serielles 5-Strahl- γ -Densitometer
zur Dichtemessung einer Zweiphasenströmung

von

H. John, J. Reimann, H. Alsmeyer, H. Hahn, A. Megerle

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

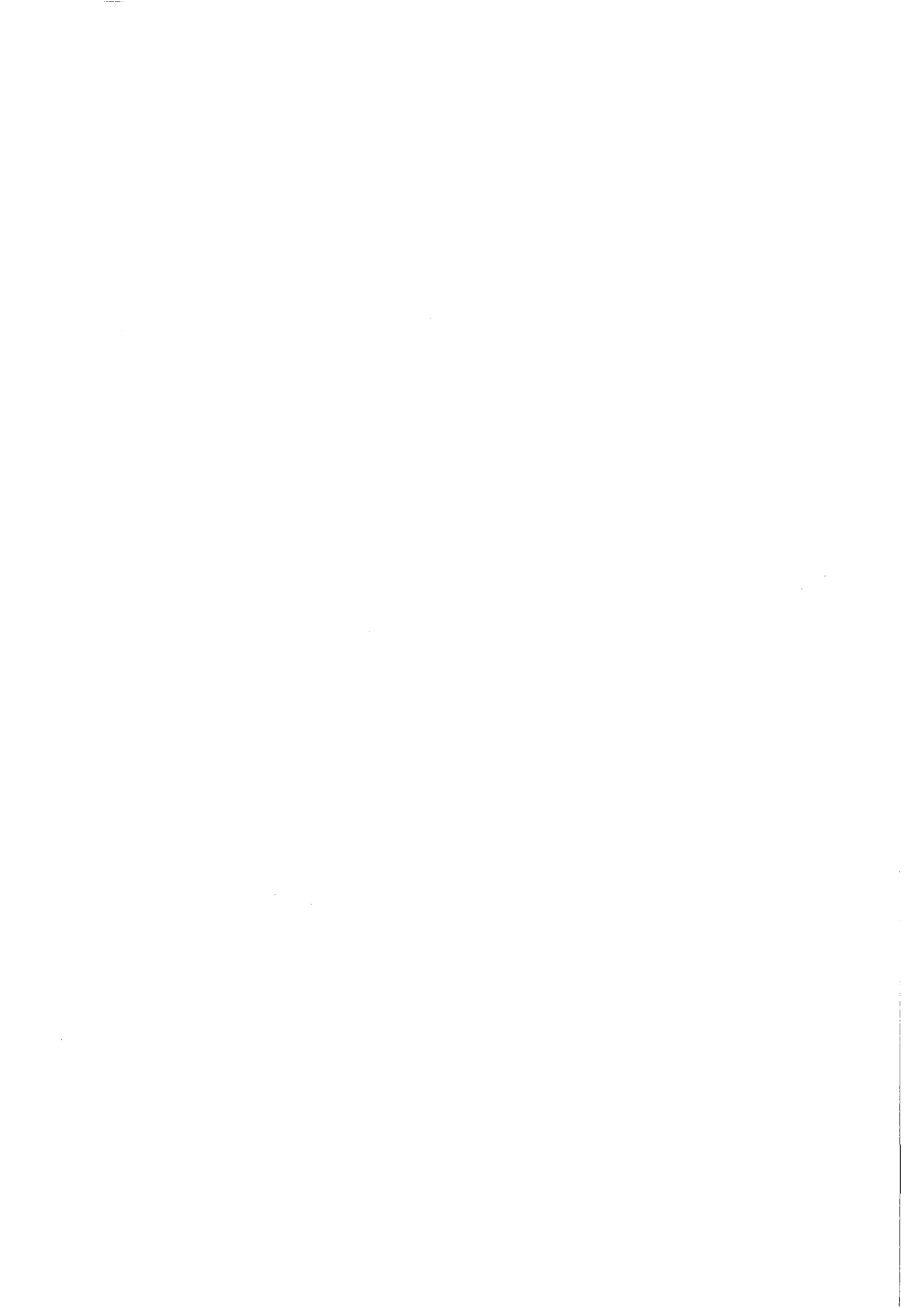
Eine Vorrichtung zum Messen der Dichte (Gasvolumenanteil) eines strömenden Zweiphasengemisches, mittels Gamma-Strahlen-Absorption, wird beschrieben. Das Gerät arbeitet mit 5, den Querschnitt des Strömungskanals durchdringenden Gamma-Strahlen, die von einer Quelle ausgehen und in einer elektronischen Meßkette verarbeitet werden. Ein sechster Referenzstrahl sorgt für die Korrektur möglicher Drifte in der Meßkette. Das Densitometer wurde für den KfK-IRB-Zweiphasen-Kreislauf, für einen Teststreckendurchmesser von 50 mm und Dampf-Wasser-Strömungen bis 150 bar entwickelt, ist jedoch prinzipiell für jedes strömungsfähige Zweiphasengemisch mit anderen Kanalweiten anwendbar. Die digitale Signalverwertung wird bis zum on-line betriebenen Rechner einschließlich des Rechenprogramms beschrieben. Eine detaillierte Genauigkeitsbetrachtung, die Vergleiche mit einem Scanning- und einem 3 Strahl-Densitometer enthält, wird gebracht. Betriebserfahrungen einschließlich Meßergebnisse mit Luft Wasser-Strömung schließen den Bericht ab.

Abstract

Serial 5-Beam Gamma Densitometer for Measuring of Two-Phase Flow Density

A device for measuring the density (void fraction) of a flowing two-phase mixture, using the method of x-ray-absorption is described in this report. The gamma-densitometer uses five gamma-beams, coming from one source, which penetrates the cross section of the flow channel and are then processed in one electronic chain. An additional reference beam is used for correction of system electronics drifts.

The densitometer has been developed for a pipe of 50 mm inner diameter in the two-phase-flow test facility Karlsruhe (KfK/IRB) for steam water mixtures at pressures up to 150 bar. The digital signal conditioning system is described including the on-line data acquisition and processing by computer programs. The report contains a detailed uncertainty analysis including comparisons with a scanning densitometer and a 3 beam-Densitometer. Operation experiences and measuring results obtained with air-water flow are included in the report.



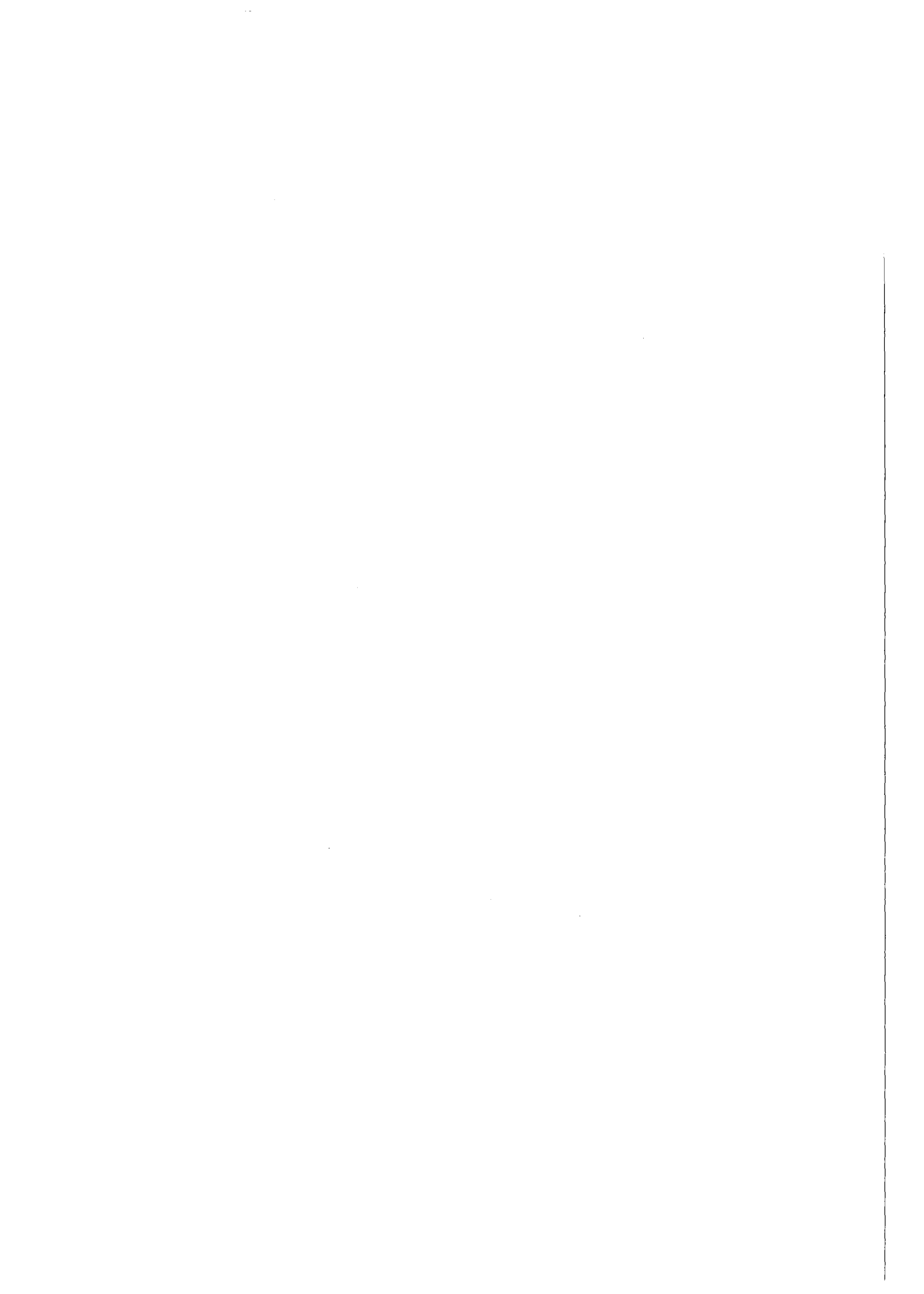
Die Zusammenstellung, Beschaffung und Funktionsprüfung der elektronischen Meßkette, bestehend aus:

Szintillator / Fotomultiplier, Hochspannungsversorgung, Verstärker, Discriminator und Ratemeter

wurde von KfK-LIT, Herrn R. Löffel und Herrn Büttner durchgeführt.

Die Entwicklung und der Bau des Multiplexers wurden vom KfK-ADI, Herrn W. Heep und Herrn U. Padligur durchgeführt.

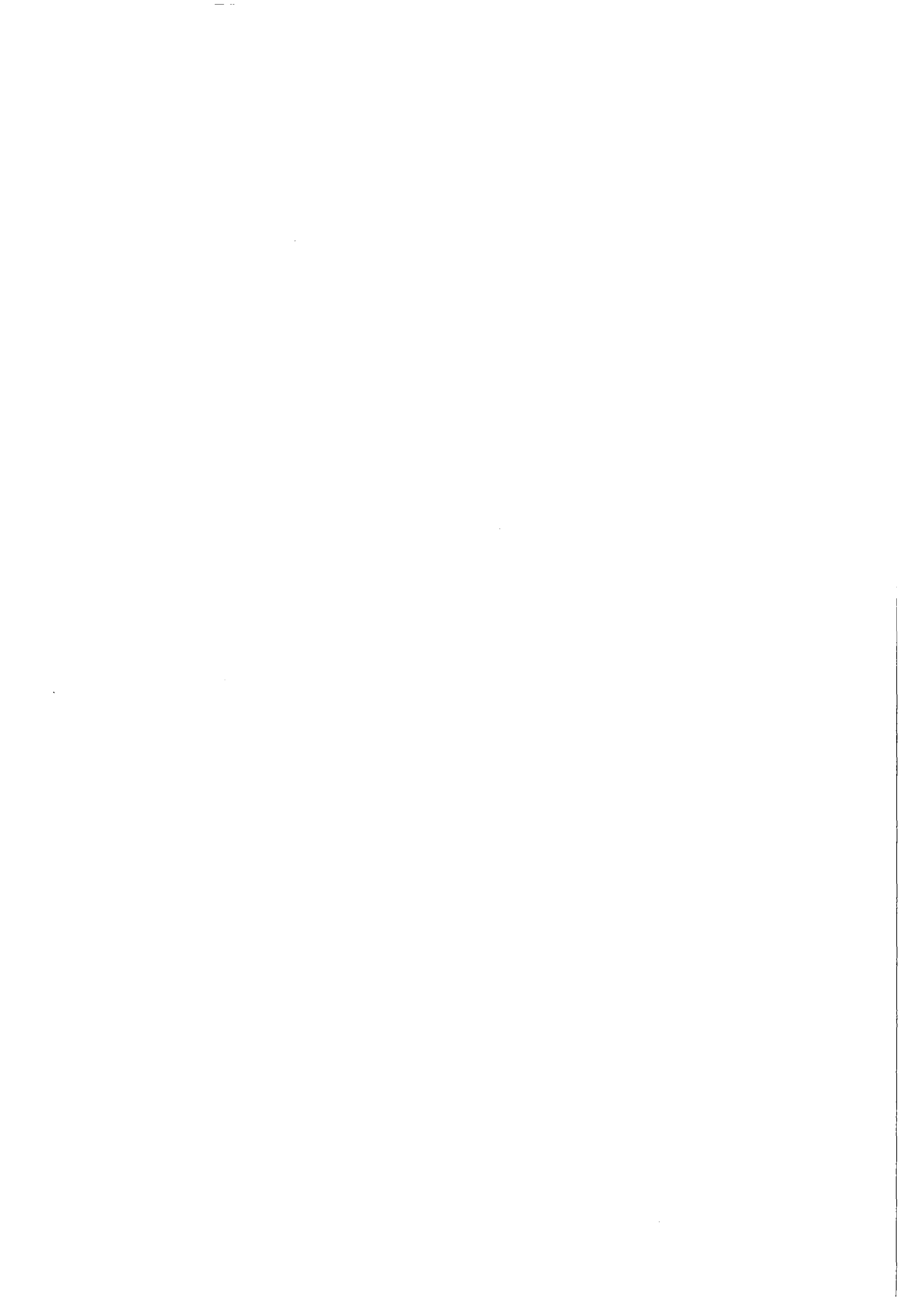
Ihnen sei hiermit gedankt.



Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Grundlagen	2
3.1	Beschreibung des Gamma-Densitometers	5
3.2	Auswahlkriterien für die Gamma-Quelle und den Szintillator	6
3.3	Elektronischer Teil des Densitometers	9
3.4	On-line-Berechnung des Dampfanteils α	13
4.	Genauigkeitsbetrachtung der Meßmethode	15
4.1	Meßfehler des Einzelstrahles	15
4.2	Dynamischer Fehler	15
4.3	Querschnitt-Mittelungsfehler	16
4.3.1	Längenwichtung	16
4.3.2	Bestimmung der Dichteverteilung mit Hilfe von Strömungsmodellen	20
5.	Vergleichsmessungen	21
6.	Betriebserfahrungen	25
7.	Anhang (Rechenprogramm zur on-line Berechnung des Dampf- volumenanteils α)	26
	Literaturverzeichnis	33



1. Einleitung

Die Bestimmung der mittleren Dichte eines strömenden Mediums, das aus mehreren Phasen besteht, ist auf konventionelle Weise nicht möglich, weil die einzelnen Phasenanteile unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten annehmen. Aus strömungstechnischen Gründen hängen diese Geschwindigkeiten stark von der Phasenverteilungsform ab und sind schon deshalb schwer bestimmbar. Für Reaktorsicherheitsexperimente, deren Ziel die Untersuchung des Kühlmittelverluststörfalles ist, ist die Kenntnis der Dichte eines aus einem Leck ausströmenden Dampf-Wasser-Gemisches von großer Bedeutung. An anderen Stellen wurden für diesen Zweck bereits Dichtemeßvorrichtungen entwickelt, die nach dem Prinzip der Absorption energiereicher Strahlung arbeiten.

In dem vorliegenden Bericht wird eine 5-Strahl-Gamma-Dichtemeßvorrichtung beschrieben, die für den 'Gemeinsamen Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren' (Projekt-Nr. PNS 4137, RS 145) entwickelt wurde /1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11/.

Dieser Entwicklung lag zugrunde, hohe Meßgenauigkeit mit möglichst geringem Kostenaufwand zu verbinden. Es wurde ein neues Meßprinzip entwickelt, das darin besteht, daß 5- γ -Strahlen von einer einzigen elektronischen Meßkette ausgemessen und automatisch driftkorrigiert werden. Dieses ist grundsätzlich für jedes strömungsfähige Mehrphasen-Gemisch anwendbar. Im vorliegenden Bericht wird jedoch nur die Anwendung auf Zweiphasengemische (flüssig-, gasförmig) beschrieben.

2. Grundlagen

Ein zweiphasiges Gas-Flüssigkeits-Gemisch ist durch die folgenden wichtigen Definitionen gekennzeichnet.

Gasvolumenanteil

$$(1) \quad \alpha = \frac{V_G}{V_F + V_G} = \frac{A_G}{A_F + A_G}$$

V_G, V_F = Gas- bzw. Flüssigkeitsvolumen im abgeschlossenen Zweiphasenvolumen

A_G, A_F = von Gas- bzw. Flüssigkeit eingenommene Fläche des Strömungsquerschnittes

Mit diesem Gasvolumenanteil läßt sich eine mittlere Dichte des Zweiphasen-Gemisches berechnen.

$$(2) \quad \rho = \rho_G \cdot \alpha + \rho_F (1 - \alpha)$$

ρ_G - Dichte der Gas-Phase

ρ_F - Dichte der Flüssigkeits-Phase

Aus (2) ergibt sich explizit der Gasvolumenanteil:

$$(3) \quad \alpha = \frac{\rho - \rho_F}{\rho_G - \rho_F}$$

Betrachtet man anstelle der Phasenvolumina die Volumenströme, so folgt analog für den Gasvolumenstromanteil α_H :

$$(4) \quad \alpha_H = \frac{V'_G}{V'_F + V'_G}$$

V'_G = Gasvolumenstrom
 V'_F = Flüssigkeitsvolumenstrom

Bei absoluter vermischter homogener Strömung ohne Schlupf der Geschwindigkeiten ist

$$\alpha = \alpha_H$$

Zwischen α und α_H besteht die folgende Verknüpfung:

$$(5) \quad \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot S = \frac{\alpha_H}{1-\alpha_H}$$

$$(6) \quad S = \frac{C_G}{C_F} \quad \text{Phasenschlupf}$$

C_G = Geschwindigkeit der Gasphase

C_F = Geschwindigkeit der flüssigen Phase

α_H ist mit der Kenntnis der Massenströme für Gas und Flüssigkeiten \dot{m}_G und \dot{m}_F und deren Dichten ρ_G und ρ_F aus den folgenden Beziehungen zu berechnen:

$$(7) \quad \frac{\alpha_H}{1-\alpha_H} = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_G}$$
$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_F + \dot{m}_G} = \text{Dampfanteil}$$

α ist, wie eingangs erwähnt wurde, von der unbekanntem Größe S abhängig und muß experimentell bestimmt werden.

Im Folgenden sollen kurz die wichtigsten Grundlagen der γ -Absorptionsmethode zur Bestimmung des Gasvolumenanteils α aufgezeigt werden:

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

$$(8) \quad I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot l}$$

bezüglich seiner Photonenzahl geschwächt, wenn:

I_0 = Photonenzahl des γ -Strahles vor der Schwächung

I = Photonenzahl nach der Schwächung

μ = Massen-Absorptionskoeffizient

l = Dicke der durchdrungenen Materieschicht

ρ = Dichte der durchdrungenen Materie

ist.

Sind die Größen I_0 , μ und l bekannt, kann ρ aus dem Meßwert I bestimmt werden nach der Beziehung

$$(9) \quad \rho = \frac{\ln I_0 - \ln I}{\mu \cdot l}$$

Dieses Gesetz gilt streng genommen nur für einen monoenergetischen unendlich dünnen γ -Strahl. Es muß deshalb dafür gesorgt werden, daß der γ -Strahl gut kollimiert wird und von der Auswerteelektronik ein möglichst schmales Energieband ausgefiltert wird.

Für eine direkte Bestimmung von ρ oder α aus dem Meßwert I müßten aber die Größen I_0 , μ und l genau bekannt sein, und zwar für verschiedene Zustandsgrößen der Medien was nicht der Fall ist. Außerdem müßte die Schwächung der γ -Strahlen durch die Rohrwand berücksichtigt werden. Es wird daher die Relativmessung vorgezogen, um diese Größen zu eliminieren. Aus den Gleichungen (3), (8) und (9) ergibt sich:

$$(10) \quad \alpha = \frac{\ln I - \ln I_F}{\ln I_G - \ln I_F}$$

I = Zählrate (Photonenzahl) beim Gemisch

I_G = Zählrate bei Gas

I_F = Zählrate bei Flüssigkeit

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

Der Einfluß der absorbierenden Rohrwand wird bei dieser Meßmethode eliminiert. Der Beweis wurde an anderer Stelle bereits gebracht /13/, weshalb hier darauf verzichtet werden kann. Der Meßwert α für einen Strahl 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 bisher vorwiegend 2 oder 3 Strahlanlagen eingesetzt worden /8/.

Um eine möglichst hohe Meßgenauigkeit mit relativ niedrigen Kosten zu erreichen, wurde für den beschriebenen Versuchsstand ein Fünfstrahl γ -Densitometer entwickelt, das im Folgenden beschrieben wird.

3.1. Beschreibung des γ -Densitometers

Abb. 1 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 sechs γ -Strahlen durchdringen dabei fächerförmig den Querschnitt des Strömungskanals der einen inneren Durchmesser von 50 mm hat. Der sechste Strahl wird an dem Strömungskanal vorbei zum Szintillator geführt. Abb. 2 zeigt die Geometrie des Kollimators. Zwischen dem Kollimatorblock und dem Szintillator dreht sich eine mit Blei ausgegossene 35 mm starke Scheibe. Sie hat eine Reihe bogenförmiger Schlitze, die so angeordnet sind, daß ein Strahl nach dem anderen zum γ -Detektor freigegeben wird, während die 5 anderen Strahlen in der Zeit zurückgehalten werden. 5 Strahlen dienen zum Abtasten der Querschnittsdichte und der 6. Strahl ist ein Referenzstrahl, der die Aufgabe hat, Änderungen der Zählrate, die nicht durch Dichteänderung des strömenden Mediums bedingt sind, festzuhalten. Bekanntlich ist ein Fotomultiplier sehr empfindlich gegen Temperatur- Hochspannungs- und Magnetfeldänderungen, die sich durch Driften des Ausgangssignals bemerkbar machen. Deshalb kommt dem Referenzstrahl eine große Bedeutung zu. Beim Driften der Anlage während der Messung der Werte I_G , I_F und für die 5 Strahlen kann die Änderung des Referenzstrahles zur Korrektur der Werte herangezogen werden.

Der Kollimatorblock ist aus warmfestem Stahl (13 Cr Mo 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.

Abb. 3 und 4 zeigen den Längs- und Querschnitt durch die ausgeführte Meßvorrichtung und Abb. 5 ein Foto derselben. Der Abschirmbehälter für die γ -Quelle, die bei Neuanschaffung 40 Ci 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-Wassergemisches (342°C bei 150 bar) schied eine Bleiabschirmung für die γ -Quelle trotz Wasserkühlung aus Sicherheitsgründen aus. Der Densimetbehälter kann durch einen Strahlenschieber nach der Messung geschlossen und durch ein Sicherheitsschloß gesichert werden.

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 Stahlzylinder mit 2 mm Wandstärke geschoben.

3.2. Auswahlkriterien für die γ -Quelle und den Szintillator

Die Auswahl eines geeigneten Nuklides für die γ -Quelle unterliegt einer Reihe von Kriterien, die sich für das 5-Strahl γ -Densitometer mit einer gewissen Rangfolge wie folgt darstellen.

- a) Härte des Strahlers (γ -Energie)
- b) Leistungsdichte und Halbwertszeit
- c) Stärke der verfügbaren Strahler
- d) Preis

Von den auf dem Markt erhältlichen gekapselten γ -Quellen kommen für diesen Zweck einige Nuklide in Frage, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind:

Nuklid	γ -Energie keV	Emissionswahrscheinlichkeit %	Halbwertszeit
Cs -137	662	85	30a
Am-241	60	36	458a
Co-60	1137 1332	100 200 100	5.2a
Tm-170	52 81 +Bremsstrahlung	7,5 11 3,5	127d
Ir-192	0,2-0,6 (0,29-0,468)	215 (190)	74d

Zum Auswahlkriterium a ist folgendes zu sagen:

Die Härte des γ -Strahles, d.h. die Energie der abgegebenen Photonen, bestimmt wegen der Energieabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten μ die Größe der Schwächung des γ -Strahls. Dadurch wird einerseits mit sinkender γ -Energie das Absorptionsverhältnis I_G/I_F bzw. I/I_F (Abschn. 2.) größer und damit der Meßhub und das Auflösungsvermögen des Verfahrens größer, jedoch wird andererseits auch die Zahl der den Szintillator erreichenden γ -Impulse kleiner und damit der statistische Fehler größer. Es kann daher theoretisch für jedes zu messende Medium (Wasser-Dampf bzw. Wasser-Luft) für jeden Kanaldurchmesser bzw. jede zu durchstrahlende Wandstärke ein Optimum bezüglich der γ -Energie bestimmt werden. Da jedoch die Auswahl der zur Verfügung stehenden Strahler nicht groß ist und die Kriterien b und c auch berücksichtigt werden müssen, ist die Optimierungsmöglichkeit stark eingeschränkt.

Die Größe des statistischen Fehlers kann durch die Beziehung

$$\Delta I/I = N^{-1/2}$$

N = Anzahl der vom γ -Detektor empfangenen Impulse

abgeschätzt werden.

Bei einer vom γ -Detektor registrierten Photonenzahl von 10^4 beträgt der statistische Fehler also ca. 1%.

Der Einfluß des statistischen Fehlers auf den Fehler $\Delta\alpha$ der α -Bestimmung ist aus der folgenden, unter Berücksichtigung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes, aufgestellten Beziehung nach /14/ abzuschätzen.

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{|2(1-\alpha+\alpha^2)|^{1/2}}{\alpha(\rho_F - \rho_G) \cdot \mu \cdot L \sqrt{I}}$$

- I = von γ -Detektor je Messung wahrgenommene Impulszahl
- L = Länge des γ -Strahles im Medium (Wasser, Dampf)
- ρ_F = Dichte des Wassers
- ρ_G = Dichte des Dampfes
- μ = Massen-Absorptionskoeffizient des Wassers cm^2g^{-1}
- α = Gasvolumenanteil

Der Wirkungsgrad des γ -Detektors wurde in dieser Beziehung mit 100 % angenommen und Übertragungsfehler der elektronischen Meßkette nicht berücksichtigt. Diese Beziehung zeigt ebenfalls den Einfluß der Dichten ρ_F und ρ_G , des Kanaldurchmessers und des energieabhängigen Faktors μ auf die Genauigkeit des Verfahrens und bestätigt das zu a) Gesagte.

Zu den Kriterien b) und c), die fast gleichen Rang haben, ist folgendes zu sagen:

Wegen der Heterogenität der meisten Zweiphasenströmungen und der Nichtlinearität des Absorptionsgesetzes ist, wie bereits genannt, eine starke Bündelung (Kollimierung) der γ -Strahlen erforderlich. Das setzt auch eine möglichst punktförmige γ -Quelle, d.h. hohe Leistungsdichte voraus. Bei der Geometrie der beschriebenen Anlage spielt die genaue Lokalisierung einer möglichst punktförmigen Quelle im Schnittpunkt der 6 γ -Kollimatorbohrungen eine besonders große Rolle. Nuklide mit kurzer Halbwertszeit und hoher Emissionswahrscheinlichkeit haben eine hohe Leistungsdichte. Das nach dem Kriterium a) günstig erscheinende Nuklid Am-241 scheidet aus diesem Grunde aus. Tm-170 hat zwar auch eine niedrige γ -Energie und wäre für den relativ kleinen Kanaldurchmesser von 50 mm geeignet. Trotz kurzer Halbwertszeit sind die Leistungsdichte und die Quellstärke (Aktivität x Emissionswahrscheinlich-

keit) wegen der geringen Emissionswahrscheinlichkeit zu gering. TM-170 erzeugt außerdem wegen seiner hochenergetischen β -Emission (ca. 1 MeV) einen hochenergetischen undefinierbaren Anteil Bremsstrahlung, der die Messungen verfälschen kann. Berücksichtigt man ferner die Tatsache, daß bei dem beschriebenen Densitometer möglichst kurze Meßzeiten je γ -Strahl erwünscht sind, um bei niederfrequenten Zweiphasenpulsationen noch ein brauchbares zeitliches Auflösungsvermögen für eine Querschnittsmessung zu bekommen, so bekommt die Quelle mit großer Stärke, d.h. hoher Aktivität und großer Emissionswahrscheinlichkeit, besonderes Gewicht. Alle diese Argumente haben zur Wahl von Ir-192 geführt. Es ist bezüglich Energiegröße, Photonen ausbeute und Leistungsdichte günstiger als Co-60 und Cs-137. Letztere werden bei größeren Strömungskanaldurchmessern interessant. Die aus Sicherheitsgründen erforderliche Quellenabschirmung kann bei gleicher Photonen ausbeute bei einer Ir-192-Quelle erheblich leichter sein als bei Cs-137 bzw. Co-60. Die anfangs nachteilig erscheinende Eigenschaft der größeren Anzahl emittierter γ -Energien bei Ir-192 (ca. 90% der Photonen werden im Bereich von 0,29 - 0,468 MeV abgegeben) hat sich, wie noch erwähnt wird, als vernachlässigbar gezeigt.

Das oben genannte Ziel, möglichst kurze Einzelmeßzeiten anzustreben, hatte aber auch bei der Szintillatorwahl entsprechende Konsequenzen. Für Meßzeiten bis hinunter zu 10 msec und mindestens 10^4 Impulsen je Messung, hat der Szintillator Impulsfrequenzen von 10^6 bis 10^7 /sec zu verarbeiten. Für die Auflösung so hoher Impulsfrequenzen muß ein Plastikszintillator eingesetzt werden, der wegen seines geringen Auflösungsvermögens für γ -Energien jedoch keine Trennung der Photonen unterschiedlicher Energie mehr ermöglicht. Die mathematisch schwer abschätzbaren Nachteile der nicht rein monoenergetischen Messung haben sich bei der Erprobung der Anlage, die eine Einzelstrahl-Meßgenauigkeit im Bereich von 1 bis 2% ergab, als vernachlässigbar erwiesen.

3.3 Elektronischer Teil des Densitometers

Abb. 6 zeigt das Blockschaltbild der γ -Strahl-Meß- und Auswerteelektronik. Im folgenden wird zuerst die Funktionsweise der elektronischen Anlage erklärt, und anschließend werden die wichtigsten Daten der einzelnen Komponenten gebracht.

Die von der γ -Unterbrechungsscheibe nacheinander freigegebenen γ -Strahlen durchdringen den Szintillator, wo sie eine der γ -pulszahlproportionale Anzahl von Lichtblitzen erzeugen. In dem optisch gekoppelten Fotomultiplier werden diese 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 vor Übertragung 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-Rausch-Verhältnisses. Zu diesem Zweck ist im genannten Verstärker außer der Verstellung des Verstärkungsfaktors auch die Verstellung der Integrationskonstante und der Differentiationskonstante möglich und im Diskriminator die Verstellung der Diskriminatorschwelle. 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 mit verstellbarer Zeitkonstante analoges elektrisches Signal aus der statistisch unregelmäßigen Pulsfolge erzeugt wird. Dieses Signal wird in erster Linie zur Funktions- und Stabilitätskontrolle 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 einstellbare Zählzeit wird vom Timer erzeugt, der nach Ablauf der 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 erzeugt wird, 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-Stopsignal 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 einer 7-Segment-Anzeige 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 soll hier nur verkürzt wiedergegeben werden. Als Unterlage diene /6, 7/.

Das aus 24 Bit bestehende Datenwort muß, damit es die richtige Zuordnung zum jeweils gemessenen γ -Strahl bekommt, mit der Adresse des entsprechenden γ -Strahles versehen werden. Dieses geschieht mit der Ablaufsteuerung, die vom Lichtschrankensignal 1 bei jedem Zählbeginn der 6 γ -Strahlen angestoßen wird und ein Adresswort (3 Bit) bildet. Die Lichtschanke 2 hat die Aufgabe, nach 4-maligem Durchgang der Strahlzählung (4x6 Werte), entsprechend einer Scheibenumdrehung, die Ablaufsteuerung wieder auf den Wert 0 zu setzen und damit die Richtigkeit der Adresse zu sichern. Da der Rechner PDP 11 nur 16 Digital-Eingänge besitzt, ist der parallele Datentransport eines 6-dekadigen Wortes + 3 Adresse nur seriell in 2 Halbworten möglich. Dies wird mit Hilfe des Multiplexers ADI-41 /7/ ermöglicht. Dieser ruft den im Counter anstehenden Wert nach Empfang eines ready Signals ab, versieht jede Hälfte eines übernommenen Wortes mit der von der Ablaufsteuerung gelieferten Adresse und speichert die codierten Halbworte in einem Zwischenspeicher (Fifo) ab. Nach jedem Meßwert wird der Counter von der Ablaufsteuerung auf 0 gesetzt und damit aufnahmebereit für das nächste Zähler-Start-Signal gemacht. Der Multiplexer macht die Daten mittels Leitungstreiber störunempfindlich für den Transport zum ca. 30 m entfernt liegenden Rechner. Der Rechner übernimmt die Daten vom Speicher des Multiplexers, wenn dieser 16 Worte (32 Halbworte) gespeichert hat und ein ready-Signal an den Rechner gesendet hat. Vom Rechner werden die Halbworte mittels eines entsprechenden Programms wieder zu Datenworten zusammengesetzt und nach Identifikation der Adresse der weiteren rechnerischen Verarbeitung zugeführt. Darüber wird in Abschnitt 3.4 berichtet.

Im folgenden werden die Daten der einzelnen elektronischen Komponenten gebracht:

a) Szintillator

Scintillator Counter Nr. 1322

Nuclear Enterprises/Edinburgh

Maße 2" \emptyset x 170 mm, Plastik-Szintillator Typ NE 111

b) Fotomultiplier mit Vorverstärker

EMI Typ 9656L, Ser. Nr. 65942

mit:

Dynode chain assembly DM 1-2 Typ D

c) Hauptverstärker

454 Timing Filter Amplifier / Ortec

d) Diskriminator

436 100 MHz Diskriminator / Ortec

e) Digital-Analog-Wandler

9349 Log/Lin Ratemeter / Ortec

f) Hochspannungsversorgung für Fotomultiplier

456 High-Voltage Power Supply / Ortec

g) Zähler

770 Counter m. Option 770-0L / Ortec

h) Zeitbasis

773 Timer-Counter / Ortec

i) Ablaufsteuerung

KfK-IRB Eigenbau /6/

j) Multiplexer ADI-41

KfK-ADI Eigenbau /7/

k) Interface Box ADI-41/8
KfK-ADI Eigenbau /7/

Die Komponenten a - f wurden von KfK-LIT ausgewählt und beschafft. Komponente i wurde im IRB entworfen und gebaut und j und k im ADI des KfK entwickelt und gebaut.

3.4 On-line-Berechnung des Dampfanteils α

Aufgabe des Rechners PDP 11/40 ist es, zunächst die im Fifo des externen Multiplexers gespeicherten in Halbworte zerlegten codierten Zählraten abzurufen, nach den Adressen zu sortieren, zu decodieren und zu den dekadischen Ausgangswerten zusammzusetzen. Die Berechnung des Dampfvolumentanteils aus den entschlüsselten Zählraten erfolgt nach der in 2. angeführten Beziehung

$$\alpha = \frac{\ln (I/I_F)}{\ln (I_G/I_F)}$$

wobei I die Zählrate beim Zweiphasengemisch und I_G und I_F die Eichzählraten sind, die vorher bei Gasfüllung (Dampf) bzw. Wasserfüllung des Kanals aufgenommen wurden.

Da die Messungen von I, I_G und I_F in 3 zeitlich versetzten Versuchsschnitten erfolgen, muß auch das Rechenprogramm aus 3 Teilen bestehen und Zwischenwerte auf einem Speicher bereithalten. Wegen der besonders großen Drift-Empfindlichkeit einer Gamma-Meßelektronik, bedingt durch die Eigenschaften eines Fotomultipliers, sind die Werte I, I_G und I_F nicht einwandfrei korrelierbar. Es wird daher eine Korrektur der Zählraten mit dem Verhältnis der Referenzstrahlwerte, die im selben Maß driften, vorgenommen. Gibt man dem Referenzstrahl den Index 0 und den anderen Strahlen den Index i (i = 1 bis 5), so ist die korrigierte Liniendichte für den Strahl i:

$$\alpha_i = \frac{\ln |(I_i/I_{Fi}) \cdot (I_{F0}/I_0)|}{\ln |(I_{Gi}/I_{Fi}) \cdot (I_{F0}/I_{G0})|}$$

Die Werte I_{Gi} und I_{Fi} müssen, wie erwähnt, vor dem eigentlichen Zweiphasenbetrieb aufgenommen werden. Streuungen der Meßwerte sind in erster Linie statistische Schwankungen der γ -Impulsfolge, die durch Mehrfachmessung und Mittelwertbildung verkleinert werden können. Das Programm ist so aufgebaut, daß alle Kanäle nach Vorgabe bis zu 80 mal abgefragt werden können und dann die Mittelwerte I_{Fim} , I_{Fom} bzw. I_{Gim} , I_{Gom} gebildet werden. Diese Werte werden auf den peripheren Plattenspeicher gebracht und stehen für das Hauptprogramm abrufbereit.

Im Hauptprogramm beim Zweiphasenbetrieb werden nun unter Rückgriff auf die Eichwerte die Werte α_i gerechnet. Eine einfache Mittelwertbildung ist hier nicht mehr möglich, weil die Schwankungen der Werte I_i zusätzlich zur statistischen Streuung besonders durch die Pulsationen der Zweiphasenströmung bedingt sind. Lediglich die Referenzwerte I_0 sind strömungsunabhängig und werden vor der Auswertung gemittelt (zu I_{om}). Es werden daher die zeitabhängigen Werte

$$\alpha_{it} = \frac{\ln \left| (I_{it}/I_{Fim}) \cdot (I_{Fom}/I_{om}) \right|}{\ln \left| (I_{Gim}/I_{Fim}) \cdot (I_{Fom}/I_{Gom}) \right|}$$

gerechnet und anschließend über der Zeit gemittelt zu α_{im} .

Die Anzahl der Werte α_{it} kann wieder je nach Vorgabe bis zu 80 bei einem Rechenlauf betragen. Die Werte α_{it} über der Zeit aufgetragen, geben ein Bild über den zeitlichen Verlauf der Strömung im Bereich des Strahles i . Aus den 5 Mittelwerten α_{im} wird nun durch Wichtung mit den einzelnen Strahllängen der Querschnittsmittelwert α_m der Zweiphasenströmung berechnet. Ist die Strecke, die der einzelne Strahl beim Durchdringen des Zweiphasengemisches zurücklegt L_i , so ist:

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

Diese Art der Mittelwertbildung wird in den Kap. 4.3 und 5 ausführlicher behandelt.

Im Anhang ist das für die PDP 11 geschriebene Fortran IV Programm zur Berechnung der α -Werte wiedergegeben.

4. Genauigkeitsbetrachtung der Meßmethoden

Der Gesamtfehler, der bei der Messung des Gasvolumenanteils α mit dem 5-Strahl-Densitometer gemacht wird, läßt sich, nach den Ursachen gegliedert, am besten in die folgenden Einzelfehler unterteilen:

4.1 Meßfehler des Einzelstrahles

4.2 Dynamischer Fehler

4.3 Querschnitt-Mittelungsfehler

4.1 Meßfehler des Einzelstrahles

Dieser Fehler ergibt sich aus der praktisch nicht ganz erfüllbaren Bedingung des Absorptionsgesetzes (monoenergetische Strahlung, unendlich dünner Strahl), dem Fehler und den Schwankungen der Meßelektronik, der statistischen Streuung der γ -Emission von der Quelle und dem Auflösungsvermögen der Signalverarbeitung. Darüber wurde bereits in dem Abschnitt 3.2 geschrieben. Eine mathematische Bestimmung dieses Fehlers ist sehr kompliziert, die meßtechnische dagegen relativ einfach. Der absolute Einzelstrahlfehler $\Delta\alpha$ der beschriebenen Vorrichtung wurde durch Messungen mit Plexiglas-Luft und Wasser-Luft ermittelt. Er liegt bei Verwendung von Ir-192 als Quelle (ca. 20 Ci), ohne Diskriminierung der γ -Energien, unter 1% für den Mittelstrahl und 1-2% für die Randstrahlen. Im Vergleich zu den anderen Fehlern ist dieser der Geringste.

4.2 Dynamischer Fehler

Dieser Fehler entsteht durch die Dichtefluktuationen des Zweiphasenstromes während der Zeitspanne in der eine Zählrate gemessen wird. In dieser Zeit werden die ankommenden γ -Impulse im Zähler summiert, was einer linearen Mittelung des γ -Impuls-Stromes während dieser Zeit entspricht. Da aber durch den Charakter einer Zweiphasenströmung die Dichte selbst in dieser kurzen Zeit beträchtlich schwanken kann und der γ -Impuls-Strom der Dichte nicht proportional ist, kann dadurch ein nicht zu vernachlässigender Fehler entstehen. Honan und Lahey /14/ haben für diesen Fehler eine mathematische Beziehung aufgestellt. Für den extremsten Fall, der dann vorliegt, wenn

das Zweiphasengemisch während der Zählzeit in Form eines gasförmigen und eines flüssigen Kolbens den γ -Strahl passiert, zeigt das nach dieser Beziehung aufgestellte Diagramm. Abb. 7 den entstehenden maximalen dynamischen Fehler. Hierin bedeuten die Parameter

f das Verhältnis der Zeit, in der der Flüssigkeitskolben den γ -Strahl passiert zur Gesamtmeßzeit.

$$\lambda = L \cdot \mu_{\gamma}$$

L = Länge des γ -Strahles im Strömungskanal

μ_{γ} = Linearer Absorptionskoeffizient der Flüssigkeit.

Für das behandelte γ -Densitometer beträgt λ bei kaltem Wasser 0,165. Nach dem Diagramm ergibt das für den Mittelstrahl (5 cm) einen Fehler von ca. 2,5 %.

4.3 Querschnittsmittelungsfehler

4.3.1 Längenwichtung

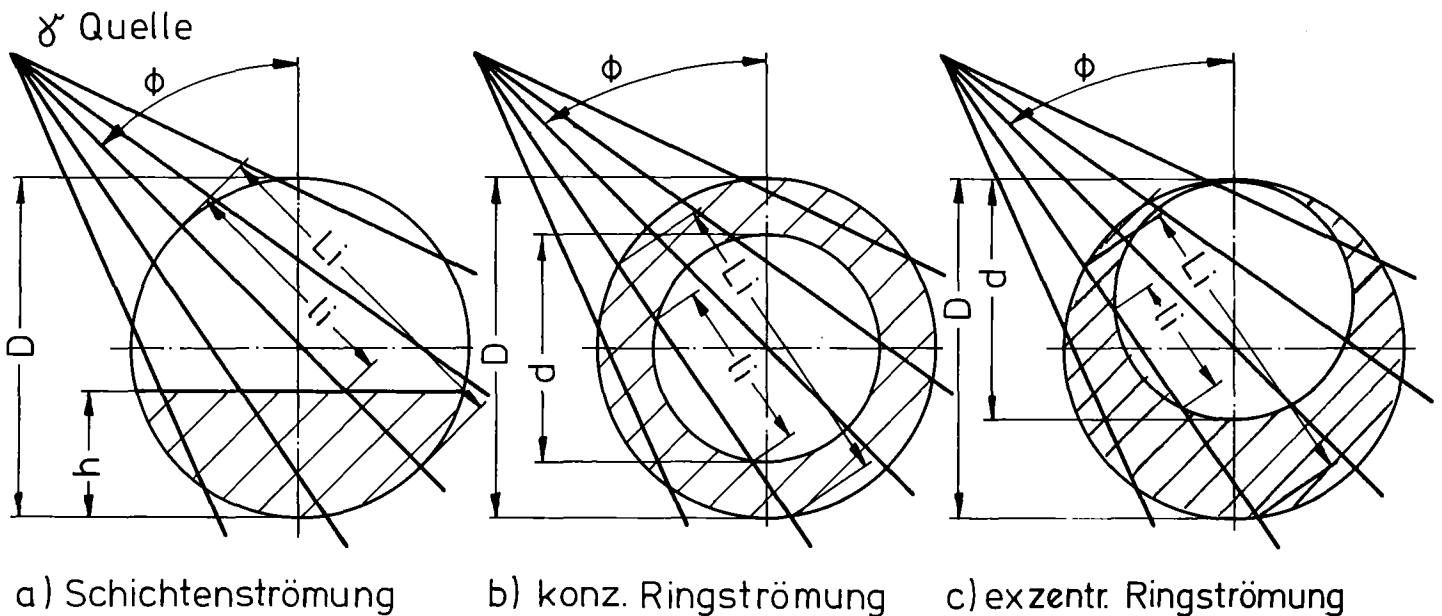
Die Bildung des über die Querschnittsfläche gemittelten Dampfvolumentanteils α (bzw. der Dichte) erfolgt meist mit den über die einzelnen Strahllängen gemittelten Meßwerten nach dem Prinzip der Längenwichtung (vgl. 3.4). Hierbei wird der Meßwert eines Strahles mit dem Verhältnis aus Strahllänge zu Summe aller Strahllängen multipliziert. Dies kann geometrisch so interpretiert werden, daß jedem Strahl ein der Strahllänge proportionaler Flächenanteil zugeordnet wird für den der gemessene Linienmittelwert gelten soll. Eine derartige Zuordnung ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Strahlen sich im Rohrquerschnitt nicht kreuzen. Je größer die Anzahl der Strahlen, umso kleiner ist die den Strahl umgebende Fläche und umso besser stimmt der Linienmeßwert mit dem Wert des zugehörigen Flächenanteils überein.

Der Mittelwert ist daher mit einem Fehler behaftet, der von der Zahl der vorhandenen Gammastrahlen, der Strahlenanordnung und der Strömungsform (Phasenverteilung in der Meßebeine) abhängt. Die Mittelungsfehler werden bei vollständig separierter Zweiphasenströmung am größten. Um diese maximalen Fehler für das 5-Strahl-Densitometer in Abhängigkeit von der Einbauposition abzuschätzen, werden folgende Phasenverteilungen ange-

nommen:

- a) Idealisierte Schichtenströmung: waagerechte Phasentrennfläche, unten reines Wasser, oben reiner Dampf
- b) Idealisierte Ringströmung: Kernströmung: reiner Dampf, konzentrischer Ring: reines Wasser
- c) Idealisierte exzentrische Ringströmung: Kernströmung: reiner Dampf, exzentrischer Ring: reines Wasser, Dicke des Ringes an der oberen Kanalmantellinie: Null

Variiert wird bei a) das Verhältnis von Schichthöhe zu Rohrdurchmesser; bei b) und c) das Verhältnis von Durchmesser der Kernströmung zu Rohrdurchmesser.



Die Skizze zeigt die 3 genannten idealisierten Strömungsformen jeweils mit der γ -Quellen-Position ϕ unter 45° gezeichnet. Die gesamte Strahlänge

im Bereich des Strömungskanals ist L_i ($i = 1,2,3,4,5$) und in der gasförmigen Phase l_i .

Der mit dem Densitometer gemessene Linienwert des Gasvolumenanteils ist:

$$\alpha_i = \frac{l_i}{L_i}$$

und der daraus gemittelte Querschnittswert

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 \cdot L_1 + \alpha_2 \cdot L_2 + \alpha_3 \cdot L_3 + \alpha_4 \cdot L_4 + \alpha_5 \cdot L_5}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}$$

Der theoretische Wert für den Kanalquerschnitt ist:

$$\alpha_{th} = \frac{F_g}{F_{ges}} \quad \begin{array}{l} F_g = \text{gasgefüllter Querschnitt} \\ \quad \text{(nicht schraffierte Fläche)} \\ F_{ges} = \text{Kanalquerschnitt} \end{array}$$

Daraus ergibt sich der zu ermittelnde absolute Fehler, $\Delta\alpha$ bzw. der relative Fehler $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_{th}}$

$$\Delta\alpha = \alpha_{th} - \alpha_m$$

Die Parameter α_{th} bzw. h/d oder d/D wurden zwischen 0 und 1 variiert und in den Abb. 8-13 wiedergegeben. Der physikalisch sinnvolle Bereich, der im Folgenden besprochen wird, wurde in den Abbildungen gekennzeichnet.

Zur Reduzierung des mathematischen Aufwandes wurden für die Aufstellung der Diagramme, Abbn. 8-13, die Werte l_i und L_i graphisch bestimmt. Die daraus errechneten Kurvenpunkte wurden eingezeichnet und die Kurvenverläufe diesen Punkten angepaßt. Auf eine Analyse der Wendepunkte und Unstetigkeitsstellen wurde verzichtet.

Die Abb. 8 und 9 zeigen die absoluten und relativen Meßfehler bei idealisierter Schichtenströmung. Mit Hilfe der Strömungskarte von Mandhane, Gregory und Aziz /15/ wird angenommen, daß diese Strömungsform für Werte $\alpha_{th} > 50\%$ existiert. (Bei Werten $\alpha_{th} < 50\%$ stellt sich je nach Massenstromdichte eine disperse Blasenströmung, eine Schwallströmung oder eine Strömung mit großen Einzelblasen (elongated bubble flow) ein. Bei diesen Strömungsformen ergeben sich wesentlich kleinere Mittelungsfehler). Den kleinsten Fehlerverlauf ergibt die Einbauvariante Nr. 4 (Mittelstrahl unter 45° ge-

neigt, Quelle oben); der maximale relative Fehler dabei beträgt ca. 4,5%.

Die Abb. 10 und 11 zeigen die Fehler bei der idealisierten konzentrischen Ringströmung. Eine solche Strömungsform tritt bei waagerechter Strömungsrichtung auch angenähert kaum auf, am ehesten noch bei Dampfgehalten $\alpha_{th} > 0,95$. In diesem Bereich ist der berechnete Fehler $\approx 2\%$.

Bei waagerechter Strömung ist die Ringströmung i.a. exzentrisch, ähnelt also eher den in den Abb. 12 und 13 dargestellten Verteilungen. Nimmt man an, daß diese Strömungsform auf den Bereich $\alpha_{th} > 70\%$ beschränkt ist, so ergibt wiederum Einbauvariante Nr. 4 die besten Werte; der maximale Fehler ist - 4,5%.

Der in der Praxis sehr wichtige Bereich der Schwallströmung läßt sich idealisiert zusammensetzen aus dem Schwall (homogenes Gemisch im ganzen Rohrquerschnitt) und einem Bereich mit idealisierter Schichtenströmung (Wasserspiegel unterhalb der Mittellinie). Bei homogener Strömung entsteht kein Fehler bei der Mittelwertsbildung; der resultierende Fehler ist also kleiner als bei idealisierter Schichtenströmung. (Allerdings ist bei dieser Strömungsform der dynamische Fehler am ausgeprägtesten).

Die diskutierten idealisierten Strömungsformen ergeben, wie schon erwähnt, die größten Mittelungsfehler. In der Praxis sind die Phasenverteilungen im Rohrquerschnitt stark "verschmiert" d.h. im Wasser sind Gasblasen vorhanden, im Gas entsprechend Wassertröpfchen, die Trennfläche ist bei weitem nicht glatt, in manchen Fällen kaum zu detektieren, da ein nahezu kontinuierlicher Übergang zwischen der Flüssigkeits- und Gasphase vorhanden ist (vgl. /11/). Diese Tendenzen bewirken eine Homogenisierung der Phasen und verringern daher den Mittelungsfehler. Wegen der Komplexität der Phasenverteilungen ist es rechnerisch schwer möglich, quantitativ darüber Aussagen zu machen.

Kennt man den Typ der Strömungsform, so ist eine grobe Korrektur des Mittelungsfehlers dadurch möglich, daß man den mit den Meßwerten gebildeten Mittelwert mit dem für die total separierte Strömung berechneten Fehler korrigiert (vgl. Abschnitt 5).

Abb. 14 zeigt für die idealisierte Schichtenströmung einen Vergleich der Mittelungsfehler des 5-Strahl-Densitometers und des 3-Strahl LOFT-Densitometers /15/ bei ähnlicher Position der Quelle. Der Mittelungsfehler nimmt bei Übergang von 5 auf 3 Strahlen merklich zu.

Speziell für geschichtete Strömung wird der Mittelungsfehler etwas verringert, falls anstelle der Strahllängen die entsprechenden vertikalen Projektionen zur Wichtung benutzt werden. Abb. 14 enthält einige Punkte, die für die 3-Strahl-Geometrie nach dieser Methode (vertical weighting) berechnet wurden.

4.3.2 Bestimmung der Dichteverteilung mit Hilfe von Strömungsmodellen

Bei Reaktorsicherheitsexperimenten werden meist 2 oder 3 Strahl-Densitometer verwendet. Da bei dieser geringen Strahlzahl der Mittelungsfehler bei Verwendung der Längenwichtung nicht mehr vernachlässigbar ist, wurde von Lassahn /8/ für das LOFT 3-Strahl-Densitometer eine andere Methode entwickelt (Abb. 15): Durch einen Vergleich der einzelnen Strahlen untereinander wird die Strömungsform bestimmt. Jede Strömungsform kann bei Vorhandensein von 3 Strahlen durch maximal 3 Parameter modelliert werden, z.B. wird für geschichtete Strömung für die Dichteverteilung als Funktion der Höhe angenommen

$$\rho(y) = \frac{\rho_l - \rho_g}{1 + \exp(-4a(y-b))}$$

ρ_l = Wasserdichte
 ρ_g = Gasdichte

wobei a und b mit Hilfe der Einzelstrahlen bestimmt werden.

Aus der Dichteverteilung wird dann die über den Querschnitt gemittelte Dichte (bzw. der Dampfvolumenteil) bestimmt.

Diese Methode der Mittelwertbildung ist, speziell für ein Densitometer mit 2 oder 3 Strahlen, der Mittelwertbildung durch Längenwichtung überlegen. Allerdings ist die Zahl der freien Parameter zur Modellierung der Phasenverteilung nur ausreichend zur Modellierung recht einfacher Verteilungen wie rein geschichtete Strömungen, oder rein rotationssymmetrische Strömungen (Ringströmung und invertierte Ringströmung). Eine realistische Modellierung

der bei waagerechter Strömungsrichtung wichtigen exzentrischen Ringströmung ist nicht möglich.

Die Übertragung des Lassahn Verfahrens auf das 5-Strahlverfahren gestattet prinzipiell eine verbesserte Modellierung der Phasenverteilungen (einschließlich der exzentrischen Ringströmung). Der mathematische Aufwand ist beträchtlich; bereits beim 3-Strahl Verfahren traten oft Konvergenzprobleme beim Berechnen der freien Parameter auf. Auf eine derartige Modellierung kann verzichtet werden, wenn durch Vergleichsmessungen bei verschiedenen Phasenverteilungen, der mittlere Meßfehler des 5-Strahl Densitometers (zusammengesetzt aus den diskutierten 3 Einzelfehlern) einen bestimmten Wert (z.B. 3%) nicht übersteigt (vgl. Abschnitt 5).

5. Vergleichsmessungen

Im Rahmen der Tests der LOFT-Massenstrom-Instrumentierung /16/ wurde das LOFT-3 Strahl-Densitometer verglichen mit dem von Stephens /18/ entwickelten Scanning Densitometer. In anschließenden Versuchen wurde das 5-Strahl Densitometer mit dem Scanning Densitometer verglichen.

Das Scanning Densitometer besitzt eine ortsfeste Gamma Quelle und einen Detektor der schrittweise auf einer Kreisbahn um die Quelle bewegt wird, so daß der Kanalquerschnitt in beliebig vielen Schritten "abgetastet" werden kann. Es wurden pro Versuch ca. 30 verschiedene Meßpositionen angesteuert und der Querschnittsmittelwert des Dampfvolumentanteils durch Längenwichtung gebildet. Aufgrund der hohen Zahl verschieden durchstrahlter Sehnen ist der Mittelungsfehler vernachlässigbar.

Die Matrix der Versuche bei dem Vergleich des 3-Strahl- mit dem Scanning Densitometer überdeckte folgenden Bereich:

-waagerechte Dampf-Wasser-Strömung bei $p=40$ und 75 bar

-Volumenströme bezogen auf den Rohrquerschnitt (superficial velocities)

des Dampfes bzw. Wassers

$$0,2 < V_{sg} < 10 \text{ m/s}$$

$$0,5 < V_{sl} < 1,8 \text{ m/s}$$

- mittlerer Dampfvolumenanteil $\bar{\alpha}_{Sc} = 0,64$
- Teststreckendurchmesser 66,6 mm
- 14 Versuchspunkte

Mit Impedanzsonden wurden folgende Strömungsformen detektiert /17/:

bei $V_{sg} \lesssim 5$ m/s: Schwall- oder Wellenströmung

1. Versuchspunkt: elongated bubbles flow

bei $V_{sg} \approx 10$ m/s: Übergang zu exzentrischer Ringströmung

Im folgenden sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der relativen Fehler aufgeführt, wobei der mit dem Scanning Densitometer gemessene Dampfvolumenanteil α_{Sc} als Bezugsgröße genommen wurde.

	$\frac{\alpha_{LW} - \alpha_{Sc}}{\alpha_{Sc}}$	$\frac{\alpha_{VW} - \alpha_{Sc}}{\alpha_{Sc}}$	$\frac{\alpha_{LW_C} - \alpha_{Sc}}{\alpha_{Sc}}$	$\frac{\alpha_{SF_X} - \alpha_{Sc}}{\alpha_{Sc}}$
Mittelwert	-0,114	-0,100	-0,015	-0,019
Standardabweichung	0,181	0,169	0,067	0,132

Es bedeuten:

- LW = Längenwichtung
- VW = Wichtung mit den vertikalen Projektionen
- LW_C = Längenwichtung + $\Delta\alpha$ aus Abb. 14
- SF_X = Mittelung mit dem Schichten-Strömungsmodell

Das Lassahn Modell detektierte bei allen Versuchspunkten eine geschichtete Strömung. Zur Berechnung von α wurde die in 4.3.2 aufgeführte Dichtefunktion verwendet.

Die Längenwichtung ergibt einen Mittelwert, der um ca. 11% zu klein ist. Diese Abweichung entspricht in guter Näherung dem relativen Fehler der sich bei einem mittleren Dampfvolumenanteil von 64% aus Abb. 14 ergibt. Die Vertikalwichtung ergibt einen etwas kleineren Fehler. Eine starke Verringerung des mittleren Fehlers wird durch das Lassahn-Modell erreicht. Den sowohl

kleinsten Fehler als auch kleinste Standardabweichung erhält man mit der korrigierten Längenwichtung.

Die Testmatrix bei dem Vergleich des 5-Strahl Densitometers (Quellenposition 45° oben) mit dem Scanning Densitometer überdeckte folgenden Bereich

- waagerechte Dampf-Wasser-Strömung $p = 10, 25, 50, 75$ und 100 bar
- Volumenströme bezogen auf den Rohrquerschnitt (Superficial Velocities) des Dampfes bzw. des Wassers

$$\begin{matrix} 2 < V_{sg} < 40 \\ 0,5 < V_{se} < 2 \end{matrix}$$

- Dampfvolumenteil $0,5$ bis $\approx 1,0$
- Teststreckendurchmesser 50 mm
- 52 Versuchspunkte

Diese Versuchsmatrix überdeckte folgende Strömungsformen (vgl. /11/).

Schwallströmung, Wellenströmung, geschichtete disperse Strömung, exzentrische Ringströmung. Die wie beim 3-Strahl-LOFT-Densitometer errechneten mittleren- bzw. Standard-Abweichungen ergeben für den Vergleich des 5-Strahl-Densitometers mit dem EG&G-Scanning-Densitometer folgende Werte

$$\frac{\alpha_{LW} - \alpha_{SC}}{\alpha_{SC}}$$

Mittelwert	0,01
Standard	0,04
Abweichung	

Wie der Vergleich zeigt, sind die Abweichungen des 5-Strahl Densitometers bei Verwendung der simplen Längenwichtung kleiner als die Abweichungen des 3-Strahl-Verfahrens berechnet nach der Methode von Lassahn.

In den Abb. 16, 17, 18 wurden die Ergebnisse des Densitometervergleichs für die jeweils gefahrenen Betriebsdrücke detailliert aufgetragen. Das Verhältnis der gemessenen Dampfvolumentanteile $\alpha_{5\text{Str.}}/\alpha_{\text{SC}}$ wurde hier über α_{H0} , das aus der thermischen Bilanzrechnung gewonnen wurde, aufgetragen. Als Parameter der Kurven wurde die "superficial velocity" des Wassers (C_{W}) gewählt. Die Meßpunkte einer Kurve haben in positiver Richtung von α_{H0} steigende "superficial velocity" des Dampfes (C_{D}). Geht man bei der Interpretation der Ergebnisse davon aus, daß der Wert α_{SC} frei von Mittelungsfehlern ist, so muß man annehmen, daß die Abweichung der Verhältnisse von dem Wert 1 vorwiegend durch Mittelungsfehler des 5 Strahl-Densitometers verursacht wird. Entnimmt man weiterhin der Strömungskarte von Mandhane /15/, daß die Kurven bis zu $C_{\text{D}} \approx 15$ m/s grob betrachtet geschichteter Strömung und etwa ab $C_{\text{D}}=15$ m/s Ringströmung entsprechen, kann man nach der Abb. 8 (Kurve 4) für den ersten Fall und Abb. 12 (Kurve 4) für den 2. Fall erkennen, weshalb die Verhältnisse $\alpha_{5\text{St}}/\alpha_{\text{SC}}$ mit steigender Dampfgeschwindigkeit erst steigen und größer als 1 sind und später abnehmen und meistens unter 1 gehen. Die Mittelungsfehler für Schichtenströmung bei den vorliegenden Verhältnissen sind nämlich positiv bis ca. 3 % und für die Ringströmung negativ bis ca. -4% in dem betrachteten α -Bereich.

Die größten Abweichungen (speziell bei $p=10$ bar) traten bei Versuchspunkten mit kleinen Dampfdurchsätzen bzw. kleinen Werten von C_{D} auf (C_{D} meist 2,5 m/s). Diese Versuchspunkte liegen in einem ungünstigen Betriebsbereich der Kreislaufanlage, es war z.T. nicht zu vermeiden, daß während der Meßzeit des Scanning Densitometers (≈ 20 min) der Betriebszustand sich geringfügig änderte. Die Abweichung dieser Versuchspunkte kann daher im wesentlichen durch diese Tatsache bedingt sein. Außerdem traten geringe elektronische Drifte beim Scanning Densitometer auf.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das vorgestellte 5-Strahl Densitometer eine sehr befriedigende Meßgenauigkeit besitzt. Aufgrund der 5 Strahlen ist eine ausreichend genaue Ermittlung des Querschnittswertes der Dichte bzw. des Dampfvolumentanteils mit der Längenwichtungsmethode bei beliebiger Phasenverteilung möglich. Eine wesentliche Verbesserung des Querschnittswertes mit Hilfe von Phasenverteilungsmodellen ist daher nicht zu erwarten.

6. Betriebserfahrungen

Das 5-Strahl γ -Densitometer ist seit August 1977 im Einsatz.

Anfängliche Schwierigkeiten bestanden darin, daß Hochspannungsüberschläge vom Fotomultiplier zum Verstärker eintraten und dessen Eingangsstufe zerstörten. Durch Einbau eines integrierten Vorverstärkers konnten diese Schwierigkeiten behoben werden.

Die automatische Driftkorrektur mit dem Referenzstrahl hat sich als sehr vorteilhaft erwiesen.

Die on-line-Berechnung des Meßergebnisses hat sich als äußerst wirtschaftlich und für die schnelle Beurteilung von Strömungsvorgängen als vorteilhaft erwiesen.

Bei horizontaler Quellenposition eignet sich das Densitometer besonders gut zur schnellen Bestimmung der Verteilung des Gasvolumenanteils über der Kanalhöhe des waagerechten Strömungskanals. Für die Beurteilung von Strömungshomogenisatoren, die in Zusammenarbeit mit Battelle / Frankfurt zum Einsatz mit Drag-Body-Meßgeräten untersucht wurden, hat sich das Verfahren als sehr hilfreich erwiesen.

Zur Veranschaulichung einer solchen Messung zeigen die Abb. 19 und 20 die Verteilung von α über der Kanalhöhe bei einer ungestörten eingelaufenen Luft-Wasser-Strömung im waagerechten Rohr von 50 mm Durchmesser. Die Parameter C_w und C_L sind die "superficial velocities" von Wasser und Luft. Diese Kurven erwiesen sich durch Wiederholung der Versuche, als rekonstruierbar. Entsprechende Kurven wurden für den Strömungsschlupf, der aus α und α_{H0} errechnet wurde, aufgestellt /20/.

7. Anhang

Rechenprogramme zur on-line Berechnung des Dampfvolumenanteils α

Kommando-Files:

Der Aufruf der Programme sowie die Ablage der Meßdaten auf Speicher geschieht durch indirekte Kommando-Files, die die Programme in entsprechender Reihenfolge starten. Diese Kommando-Files sind:

- "Eich d":

Aufarbeitung der Zählraten, die bei Gas-(Dampf)Füllung des Kanals aufgenommen wurden. Ausdruck und Speichern von I_{Gom} und I_{Gim}

```
eich d: te1=dk0leichd.cmd
RUN DKO: PLATT2/PRI=140./TASK=PLATT2
RUN DKO: MITTEL/TASK=MITTEL
PIF DKO: I200,200 IROH.DAT;* /DE
PIF DKO: I200,200 IDMITTL.DAT/NV=DKO: I200,200 MITTEL.DAT/RE
>
```

- "Eich w":

Aufarbeitung der Zählraten, bei Wasserfüllung des Kanals. Ausdruck und Speichern von: I_{Fom} und I_{Fim}

```
eich w: te1=dk0leichw.cmd
RUN DKO: PLATT2/PRI=140./TASK=PLATT2
RUN DKO: MITTEL/TASK=MITTEL
PIF DKO: I200,200 IROH.DAT;* /DE
PIF DKO: I200,200 IWHITTL.DAT/NV=DKO: I200,200 MITTEL.DAT/RE
>
```

- "Alph B5":

Berechnung der α -Werte. Ausdruck von α_{it} , α_{im} und α_m

```
*ip ti:=dk0:alphb5.cmd
RUN DK0: PLATT2/PRI=140./TASK=PLATT2
RUN DK0: ALPHB5/TASK=ALPHB5
PIF DK0: DK0: [200,200]ROH.DAT;*/DE
>
```

- "Alph C5":

Berechnung der α -Werte. Ausdruck von α_{im} und α_m

```
*ip ti:=dk0:alphc5.cmd
RUN DK0: PLATT2/PRI=140./TASK=PLATT2
RUN DK0: ALPHC5/TASK=ALPHC5
PIF DK0: [200,200]ROH.DAT;*/DE
>
```

Hauptprogramm "Platt 2"

Das Hauptprogramm Platt 2 mit den Unterprogrammen "Zähl 2" und "Warte" übernimmt die Werte aus dem Zähler der γ -Meßanlage, decodiert sie und speichert sie in die Datei ROH.DAT.

CORE=10K, UIC=[135,10]

,TI:=DK0:PLATT2,FTN

```
      C      PLATTE UEBERNIMMT ZAEHLERINHALT VON GAMMAMESSUNG MIT ZAEHLWIEDI
0001      DIMENSION A(24,20),IDA(5),ITM(4),ITXT(40)
0002      CALL ASSIGN(1,'DK0:[200,200]ROH.DAT')
0003      CALL FDBSET(1,'NEW')
0004      CALL ASSIGN(5,'TI:')
0005      WRITE(5,100)
0006  100   FORMAT('#WIEVIELE BLOECKE?  ')
0007      READ(5,110) N
0008  110   FORMAT(I10)
0009      CALL DATE(IDA)
0010      WRITE(5,130)
0011  130   FORMAT(' P,T UND TEXT?')
0012      READ(5,140) ITXT
0013  10    CALL TIME(ITM)
0014      IS=0
0015      CALL ZAEHL3(N,A,IS)
0016      IF(IS,LT,0)GOTO 10
0018  140   FORMAT(40A2)
0019      WRITE(1,150)IDA,ITM,ITXT,N
0020  150   FORMAT(1X,5A2,2X,4A2,2X,40A2,2X,I10)
0021      DO 120 I=1,N
0022      WRITE(1,110)I
0023  120   WRITE(1,200)(A(K,I),K=1,24)
0024  200   FORMAT(2X,6F8,0)
0025      STOP
0026      END
```

Unterprogramm "ZAEHL 3"

CDRE=10K* UIC=5135*103

*FI:=DK0:ZAEHL3.FTN

```
0001      SUBROUTINE ZAEHL3(N,A,IS)
          C      LIEST WERTE AUS ZAEHLER UND ENTSCHLUESSELT SIE
          C      N=ANZAHL DER MESSUNGEN PRO MESSSTELLE
          C      A=REAL-FELD 24*N DIMENSIONAL, ZAEHLERINHALT
0002      DIMENSION A(24,20)
0003      DIMENSION IA(16)
0004      CALL ASLSLN(A)
0005      LR=1
0006      N=0
0007      L=1
0008      IE=0
          C      LR=1 NIEDERWERTIGE ZAHN FROSKADEN
          C      0 MESSSTELLENINDEX FUEER A-1100
          C      L MESSSTELLENINDEX FUEER A-110
          C      ID=0;MESSSTELLE 1 WIRD OFFENET ANGEFRAGT
          C      SYNCHRONISATION MIT MASSENSTROMMESSUNG
0009      10  CALL READEF(40,IE)
0010          IF(IE.EQ.0)GOTO 15
0011          CALL MARK(11,2,2)
0012          CALL WAITR(11)
0013          GOTO 10
0014      15  CALL SETEF(41)
          C      ALTE WERTE IM FIF0 AUSLESEN
0015      DO 90 I=1,16
0016      90  CALL IDIR(1,0)
0017          CALL WARTF
0018          DO 100 I=1,16
0019      100  CALL IDIR(1,0)
          C      WARTEN AUF DATA READY
0020      110  CALL WARTF
          C      16 WERTE AUSLESEN
0021      DO 120 I=1,16
0022      120  CALL IDIR(0,IA(I))
0023          I=1
0024          C      WERTE DEKODIEREN
0025          IF(K.GT.0) GOTO 150
          C      MESSSTELLE 0 AUFSUCHEN
0026      DO 130 I=1,16
0027      130  J=IA(I)/1000
0028          IF(J.NE.0) GOTO 130
0029      140  J=IA(I+2)/1000
0030          IF(J.NE.0)GOTO 130
0031          GOTO 140
0032      130  CONTINUE
0033          GOTO 110
0034      140  N=N+1
          C      ENTSCHLUESSELN
0035      DO 200 IC=1,16
0036      200  J=MESSSTELLEN-NR. UND DEKADEN-INDEX
          C      J=IA(IC)/1000
0037          IF(LR.EQ.0) GOTO 160
          C      UNTERE ZAEHLERDEKADEN
0038      160  J1=J
0039          JK=MOD((K-1),4)
0040          IF(J.NE.JK) GOTO 200
0041          A(K,L)=IA(IC)-1000*J
```

CORE=10K, UIC=C135,10J

,TI:=DK0:ZAEHL3,FTM

```
0047      LB=0
0048      GOTO 200
0049      C      OBERE ZAEHLERDEKADEN
0049      160    J1=J-8
0050      IF(J1,NE,JK) GOTO 700
0052      A(K,L)=A(K,L)+FLOAT(1000)*FLOAT(IA(IC)-1000*J)
0053      LB=1
0053      C      FALLS MESSSTELLE1,2-MAL ABFRAGEN
0054      IF(ID,EQ,0) GOTO 190
0056      K=K+1
0057      IF(K,LT,25) GOTO 200
0059      L=L+1
0060      IF(L,GT,N) GOTO 2000
0062      K=1
0063      ID=0
0064      GOTO 200
0065      190    IP=1
0066      GOTO 200
0066      C      ZWEITER ZAEHLER ?
0067      700    IF(J1,LT,6) GOTO 777
0069      200    CONTINUE
0070      GOTO 110
0071      777    WRITE(5,1000)
0072      1000   FORMAT('/' WERTE NICHT ZUZUEORDNEN',/)
0073      IS=-1
0074      1001   FORMAT(2I10)
0075      2000   CALL CLREF(41)
0076      RETURN
0077      END
```

Unterprogramm "Warte"

```
pi> ti:=dk0: warte.mac<

; WARTE SYNCHRONISIERT DIG. DATENUEBERNAHME DER GAMMAMESSUNG
; BELEGT EVENT FLAG 10
      .TITLE  WARTE
      .MCALL  MRKT$S,WTSE$S
      STATUS  =170410          ;DI=0 STATUS REGISTER
WARTE:: BIC   #200,@#STATUS    ;CLEAR EVTL. VORHANDENES DATA READY
L1:    MRKT$S #12,#24,#1,     ;WARTE 20 CLOCK-TICKS *EVENT FLAG 10
      WTSE$S #12             ;WARTE
      TSTB   @#STATUS        ;PRUEFE DATA READY
      BPL    L1              ;FALLS NICHT DATA READY, ZURUECK
      RTS    PC
      .END
>
```

Hauptprogramm "Mittel"

Das Hauptprogramm "Mittel" bildet die arithmetischen Mittelwerte der von "Zähl 3" erfaßten Meßwerte.

```
CORE=10K, UIC=[135,10] ,TI:=DK0:MITTEL.FTN

      C      MITTEL
0001      DIMENSION IDA(5),ITM(4),ITXT(40),A(24),B(24)
0002      CALL ASSIGN(1,'DK0:[200,200]ROH.DAT')
0003      CALL FDBSET(1,'OLD')
0004      CALL ASSIGN(5,'TI:')
0005      READ(1,150)IDA,ITM,ITXT,N
0006      150  FORMAT(1X,5A2,2X,4A2,2X,40A2,2X,I10)
0007      DO 1000 L=1,N
0008      READ(1,110)I
0009      110  FORMAT(I10)
0010      READ(1,200)(A(K),K=1,24)
0011      200  FORMAT(2X,6F8,0)
0012      DO 900 M=1,24
0013      900  B(M)=B(M)+A(M)
0014      1000 CONTINUE
0015      DO 1100 M=1,24
0016      1100 B(M)=B(M)/FLOAT(N)
0017      CALL CLOSE(1)
0018      CALL ASSIGN(1,'DK0:[200,200]MITTEL.DAT')
0019      CALL FDBSET(1,'NEW')
0020      WRITE(1,150)IDA,ITM,ITXT,N
0021      WRITE(1,200)(B(K),K=1,24)
0022      CALL CLOSE(1)
0023      WRITE(5,200)(B(K),K=1,24)
0024      STOP
0025      END
```


Programm "Alph B5"

Das Programm "Alph B5" berechnet den Dampfanteil α aus den in verschiedenen Dateien vorhandenen Meßwerten.

```
CORE=10K, UIC=[135,10] ,TI:=DK0:ALPHB5,FTN

C      ALPHB5 ZUR DICHTEMESSUNG MIT 5 STRAHLEN (MIT 0-MITTELUNG)
0001  DIMENSION W(24),D(24),A(24),AT(20),AM(20),AK(5),ITXT(40),A0(4),
      1IDA(5),ITM(4)
0002  CALL ASSIGN(5,'TI:')
0003  CALL ASSIGN(1,'DK0:[200,200]ROH,DAT')
0004  CALL FDBSET(1,'OLD')
0005  CALL ASSIGN(2,'DK0:[200,200]ALPHA5,DAT')
0006  CALL FDBSET(2,'NEW')
0007  CALL ASSIGN(3,'DK0:[200,200]WMITTL,DAT')
0008  CALL FDBSET(3,'OLD')
0009  READ(3,150)
0010  READ(3,200)(W(K),K=1,24)
0011  CALL CLOSE(3)
0012  CALL ASSIGN(3,'DK0:[200,200]DMITTL,DAT')
0013  CALL FDBSET(3,'OLD')
0014  READ(3,150)
0015  READ(3,200)(D(K),K=1,24)
0016  CALL CLOSE(3)
0017  READ (1,150)IDA,ITM,ITXT,N
0018  DO 100 LL=1,N
0019  READ (1,110)I
0020  READ (1,200)(A(K),K=1,24)
0021  A0(1)=A0(1)+A(1)
0022  A0(2)=A0(2)+A(7)
0023  A0(3)=A0(3)+A(13)
0024  100  A0(4)=A0(4)+A(19)
0025  DO 101 I=1,4
0026  101  A0(I)=A0(I)/FLOAT(N)
0027  CALL CLOSE(1)
0028  CALL ASSIGN(1,'DK0:[200,200]ROH,DAT')
0029  CALL FDBSET(1,'OLD')
0030  READ(1,150)IDA,ITM,ITXT,N
0031  150  FORMAT(1X,5A2,2X,4A2,2X,40A2,2X,I10)
0032  WRITE(2,150)IDA,ITM,ITXT,N
0033  DO 1000 LL=1,N
0034  READ(1,110)I
0035  110  FORMAT(I10)
0036  READ(1,200)(A(K),K=1,24)
0037  200  FORMAT(2X,6F8.0)
0038  L=0
0039  DO 900 I=1,4
0040  K0=(I-1)*6+1
0041  DO 800 J=1,5
0042  L=L+1
0043  K=K0+J
0044  800  AT(L)=ALOG(A(K)/W(K)*W(K0)/A0(I))/ALOG(D(K)/W(K)*W(K0)/D(K0))
0045  900  CONTINUE
0046  DO 950 I=1,20
0047  950  AM(I)=AM(I)+AT(I)
0048  WRITE(2,110)LL
0049  WRITE(2,210)(AT(K),K=1,20)
0050  210  FORMAT(2X,5F8.4)
0051  WRITE(5,110)LL
0052  WRITE(5,210)(AT(K),K=1,20)
0053  1000 CONTINUE
0054  CALL CLOSE(1)
```

CORE=10K, UIC=[135,10]

,TI:=DK0:ALPHB5.FTN

```
0055      DO 1100 I=1,20
0056 1100  AM(I)=AM(I)/FLOAT(N)
0057      DO 1300 I=1,5
0058      DO 1200 J=1,4
0059 1200  AK(I)=AK(I)+AM(I+5*(J-1))
0060 1300  CONTINUE
0061      DO 1400 I=1,5
0062 1400  AK(I)=AK(I)/FLOAT(4)
0063      WRITE(5,300)(AK(I),I=1,5)
0064 300   FORMAT(/, ' KANALMITTELWERTE', /, 2X, 5F8.4)
0065      WRITE(2,300)(AK(I),I=1,5)
0066      C      INTEGRALES MITTEL
0066      AQ=AK(1)*.1355+AK(2)*.2356+AK(3)*.2577+AK(4)*.2356+AK(5)*.1355
0067      WRITE(5,400)AQ
0068 400   FORMAT(' QUERSCHNITTMITTEL=', F8.4)
0069      WRITE(2,400)AQ
0070      CALL CLOSE(2)
0071      STOP
0072      END
```

Literaturverzeichnis:

- /1/ H. John, J. Reimann:
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener
Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren; KfK 2731 B, 1978.

- /2/ KfK 2375 PNS Halbjahresbericht 1976/1 (S. 221 - 230)

- /3/ KfK 2435 PNS Halbjahresbericht 1976/2 (S. 202 - 208)

- /4/ KfK 2500 PNS Halbjahresbericht 1977/1 (S. 206 - 223)

- /5/ KfK 2600 PNS Halbjahresbericht 1977/2 (S. 240 - 247)

- /6/ A. Megerle:
(1978) unveröffentlicht

- /7/ W. Heep, U. Padligur:
Multiplexer zur Übertragung von Meßwerten an ein PDP 11-Rechensystem;
Handbuch Nr. 11 vom 15.6.1978.

- /8/ G.D. Lassahn, EG & G Idaho Inc.:
THREE-NURE G 1111, Okt. 1977, Loft Three-Beam Densitometer Data
Interpretation.

- /9/ J. Reimann, H. John:
Phasenverteilung in horizontaler Luft-Wasser- sowie Dampf-Wasser-
Strömung; Reaktortagung 1978, Hannover, Germany, Apr. 4-7, 1978,
pp. 170 - 173.

- /10/ W. Riebold, D. Barschdorf, G. Class, H. 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.

- /11/ 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.

- /12/ KfK 2700 PNS Halbjahresbericht 1978/1, S. 4100-43-55
- /13/ V.E. Schrock:
Radiation Attenuation Techniques in Two-Phase Flow Measurement;
ASME Symposium Volume, Two-Phase-Flow Instrumentation 1969.
- /14/ T.T. Honan, R.T. Lahey, jr.:
The Measurement of Phase Separation in Wyes and Tees; RPI Research
Proj. 5-24510.
- /15/ J. Mandhane, G. Gregory, K. Aziz:
A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes;
Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 1 (1974), S. 537 - 555.
- /16/ J. Reimann, H. John, R. Löffel, C.W. Solbrig, A.G. Stephens, L.D. Goodrich:
EG & G Mass Flow Rate Instrumentation Tests at Kernforschungszentrum
Karlsruhe; Data Report Volume 2. (KfK-Bericht in Vorbereitung)
- /17/ J. Reimann, H. John, R. Löffel, C.W. Solbrig, A.G. Stephens, L.D. Goodrich:
EG & G Mass Flow Rate Instrumentation Tests at Kernforschungszentrum
Karlsruhe; Analysis Report Volume 1, KfK 2812 (in Vorbereitung)
- /18/ A.G. Stephens:
Determination of the Flow Regime Characteristics by Proton Attenuation;
A Thesis in Nuclear Engineering 1975, The Pennsylvania State University/
Department of Nuclear Engineering.
- /19/ G.D. Lassahn, EG & G Idaho Inc.:
Persönliche Mitteilung
- /20/ KfK 2700, PNS Halbjahresbericht 1978/1, S. 4100-54

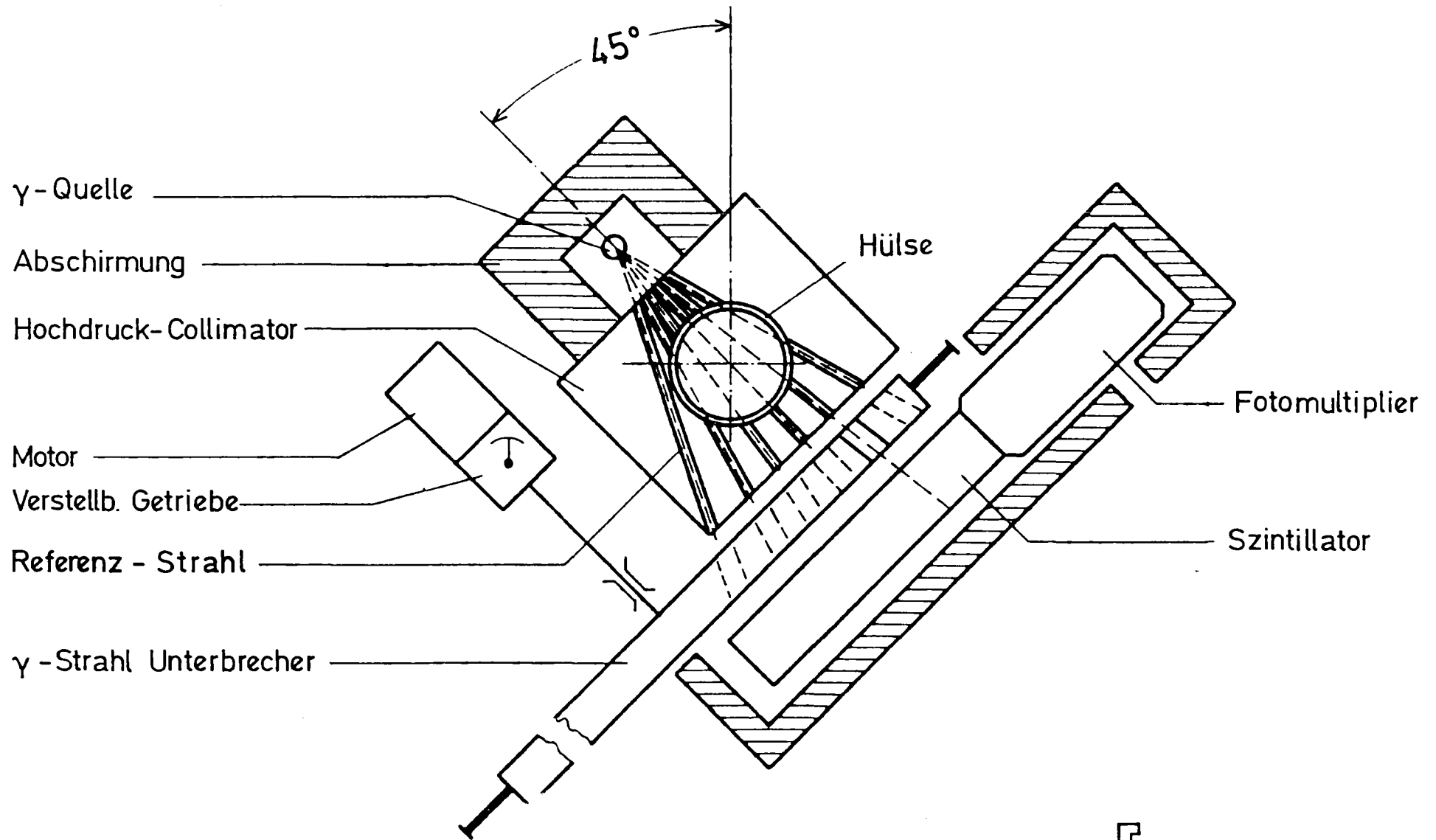
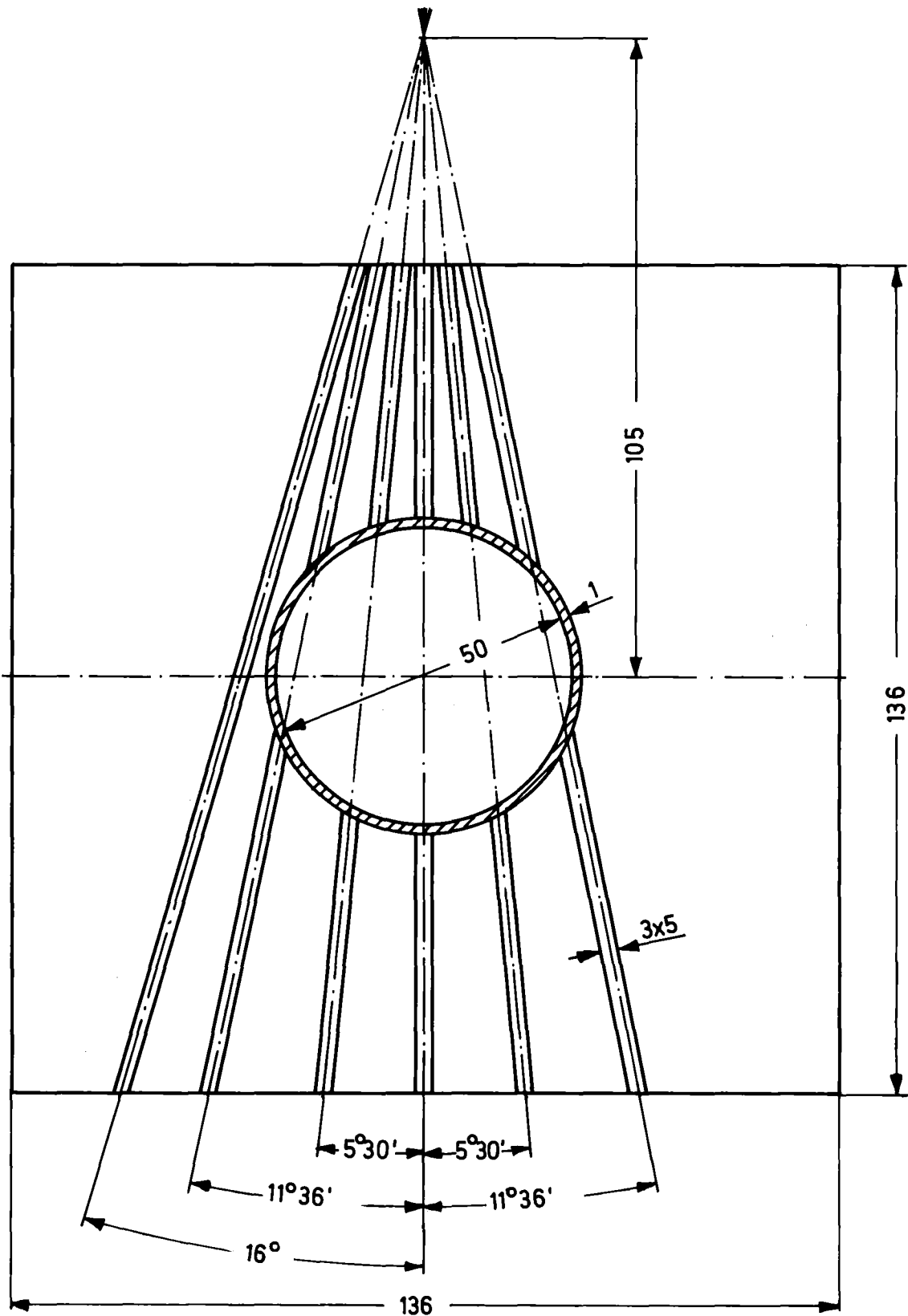


Abb.1 Serielles 5 Strahl γ - Densitometer (Schema)



KFK

Abb.2 Geometrie der γ -Strahlen im Kollimator

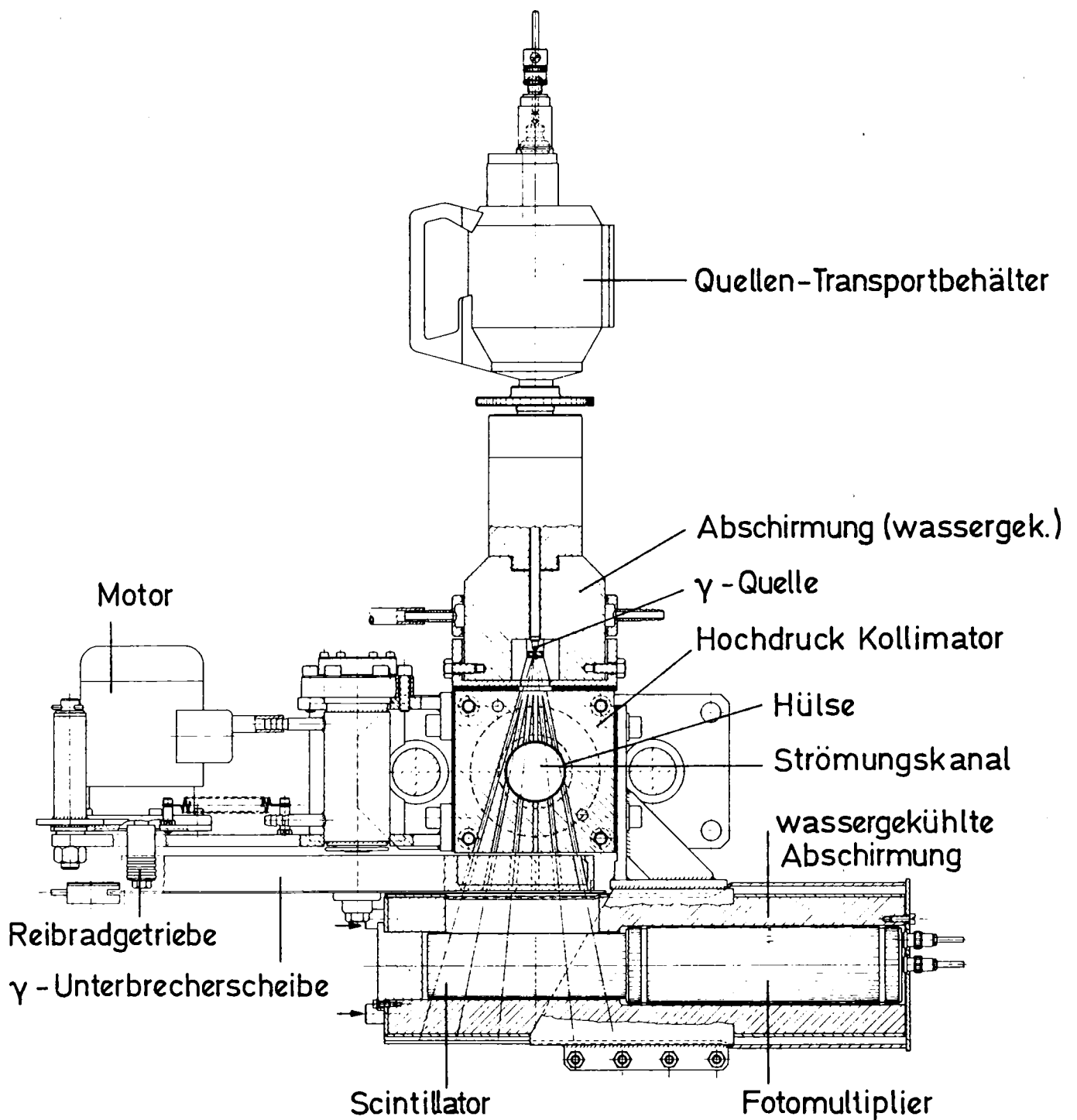
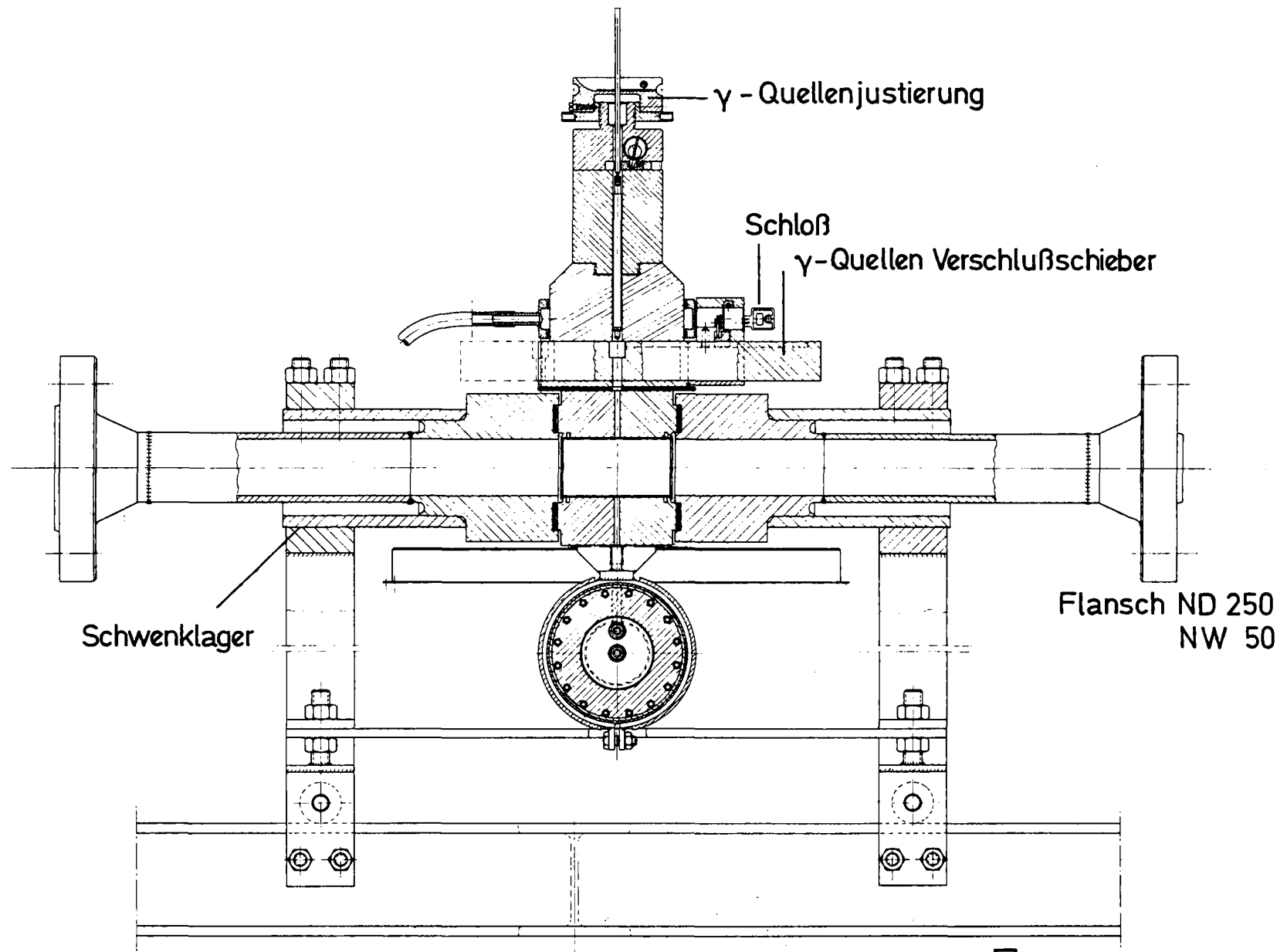
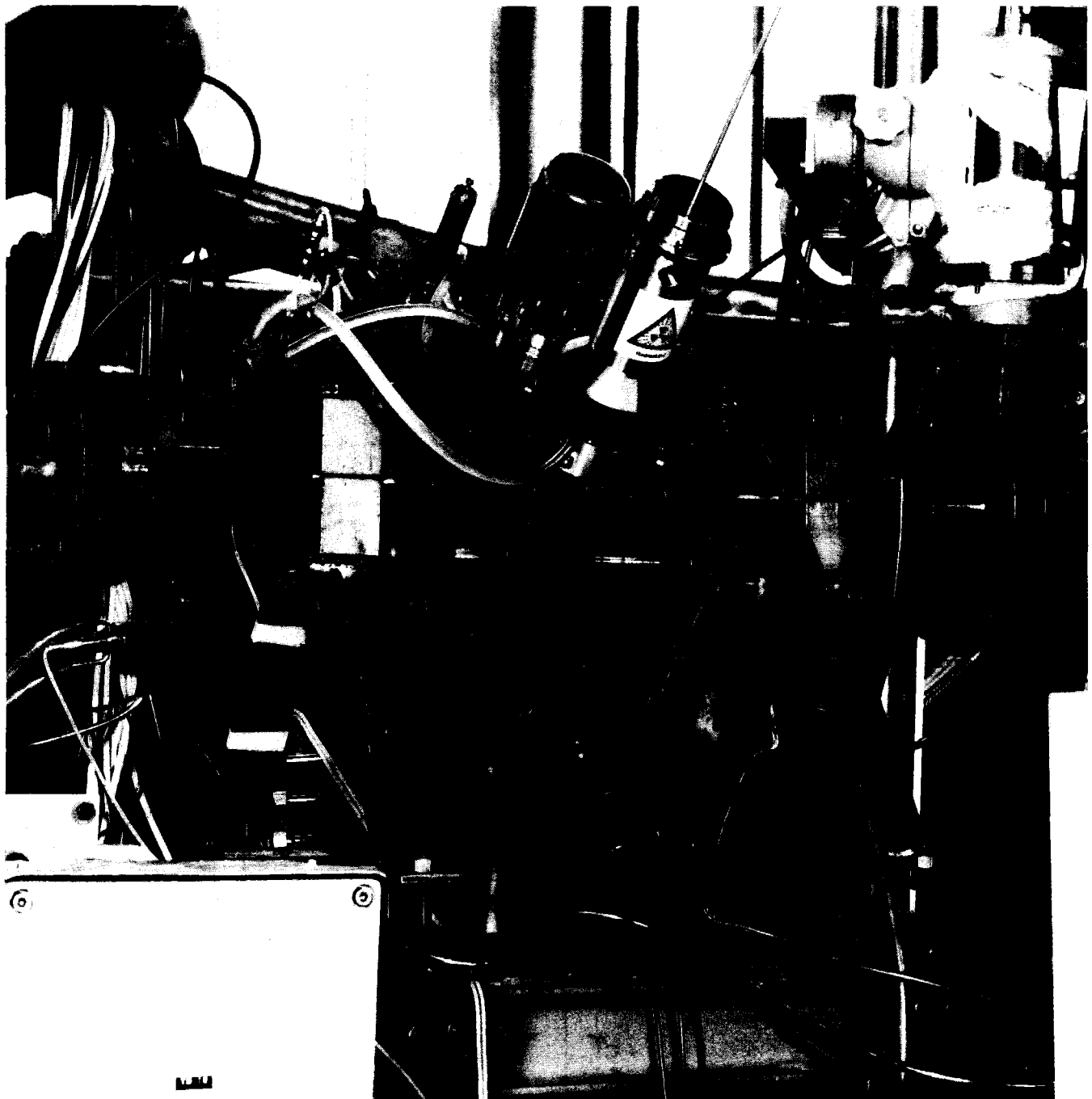


Abb. 3 Serielles 5 Strahl γ -Densitometer
 (Querschnitt in senkrechter Position)



KFK

Abb. 4 Serielles 5 Strahl γ -Densitometer (Längsschnitt)



KfK

Abb. 5 Serielles 5 Strahl- γ -Densitometer
45° geneigt

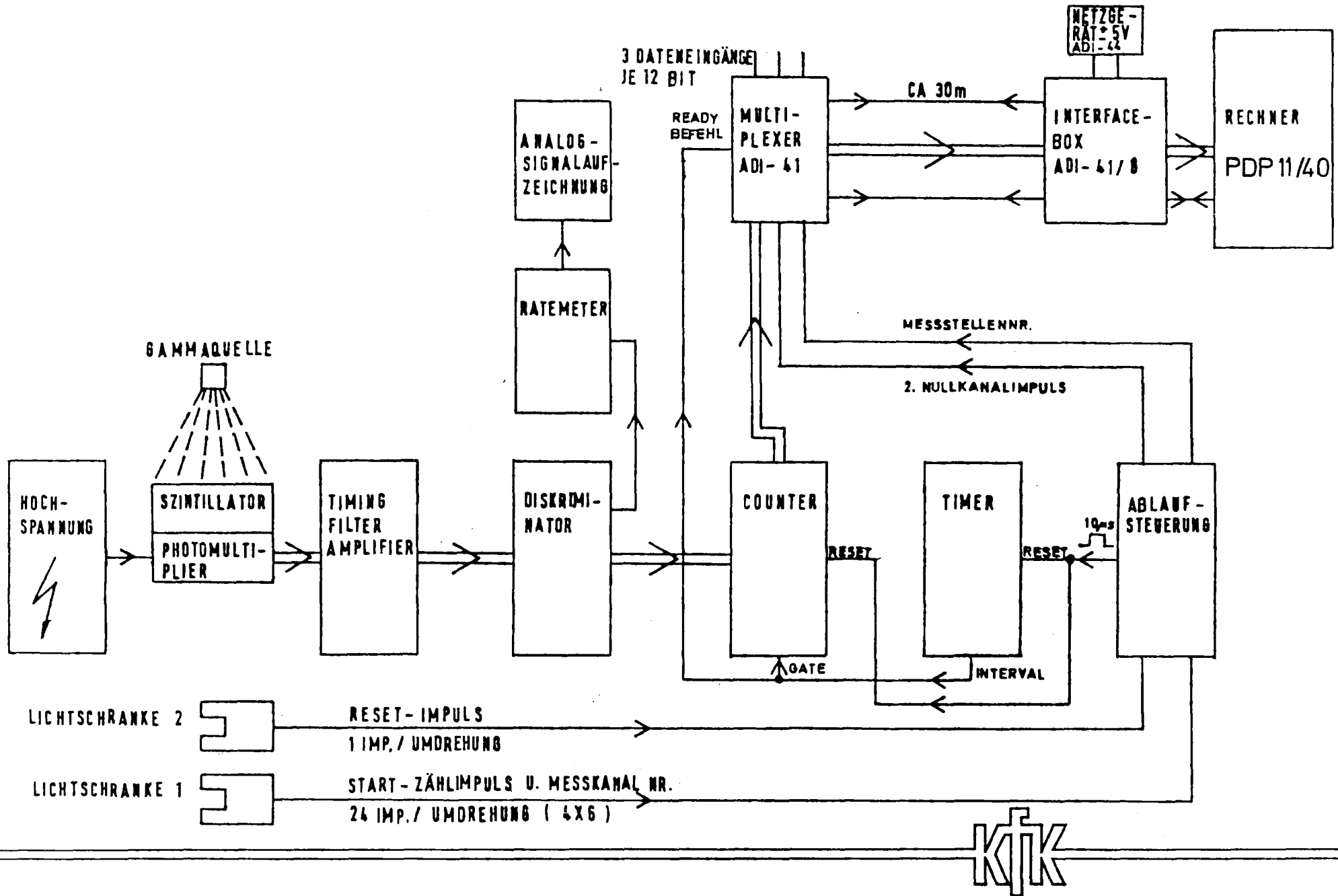
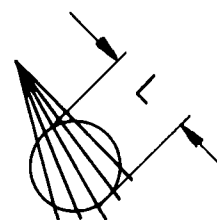
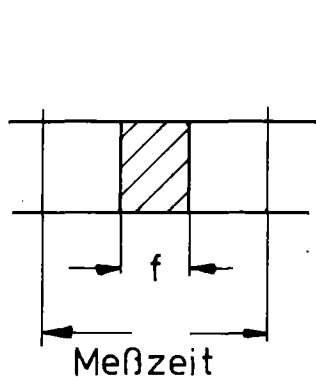
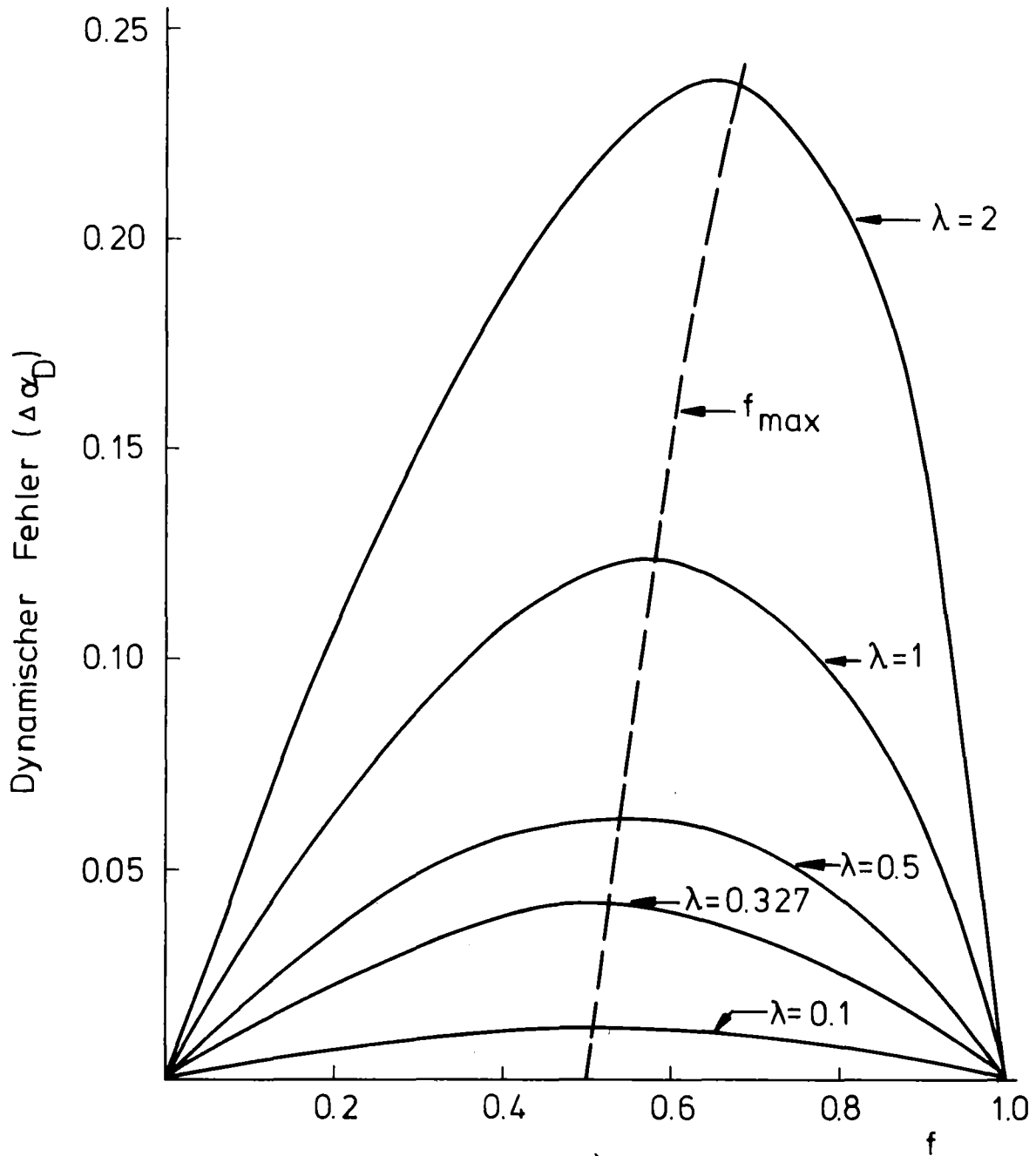


Abb. 6 Elektronik für Serielles 5 Strahl- γ - Densitometer



$\lambda = L \cdot \mu_l$
 $\mu_l =$ linearer Absorptionskoeffizient der Flüssigkeit



Abb. 7

Dynamischer Fehler nach Honan u. Lahey [14]

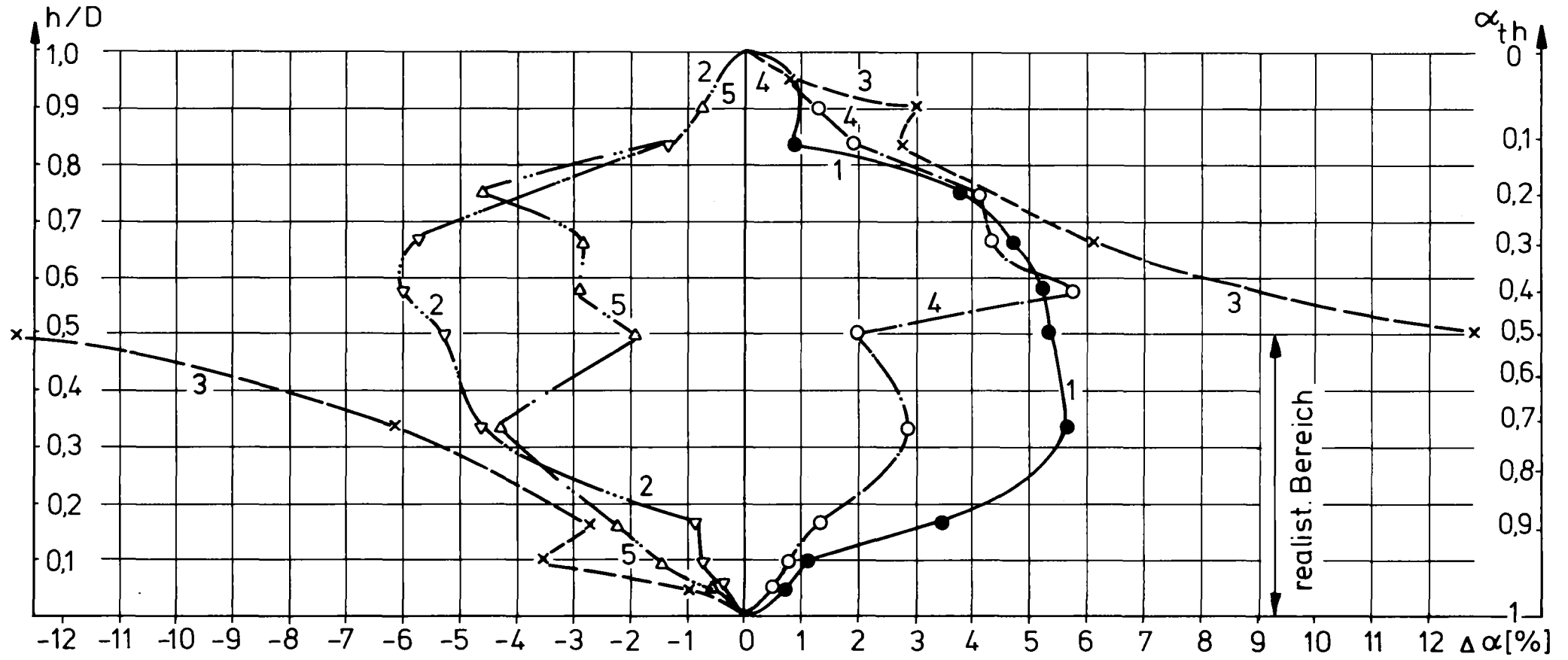
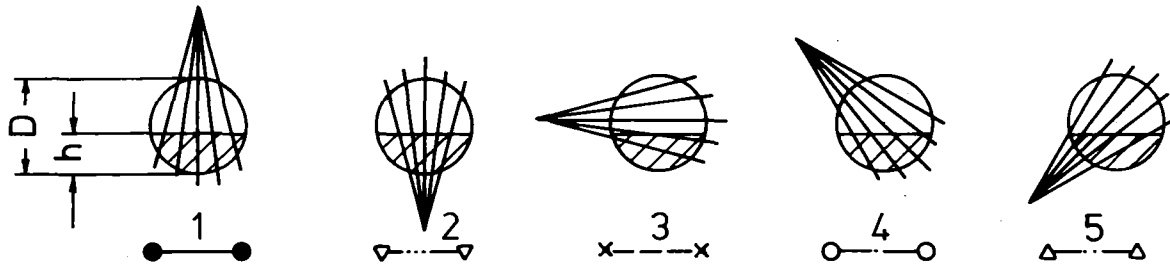
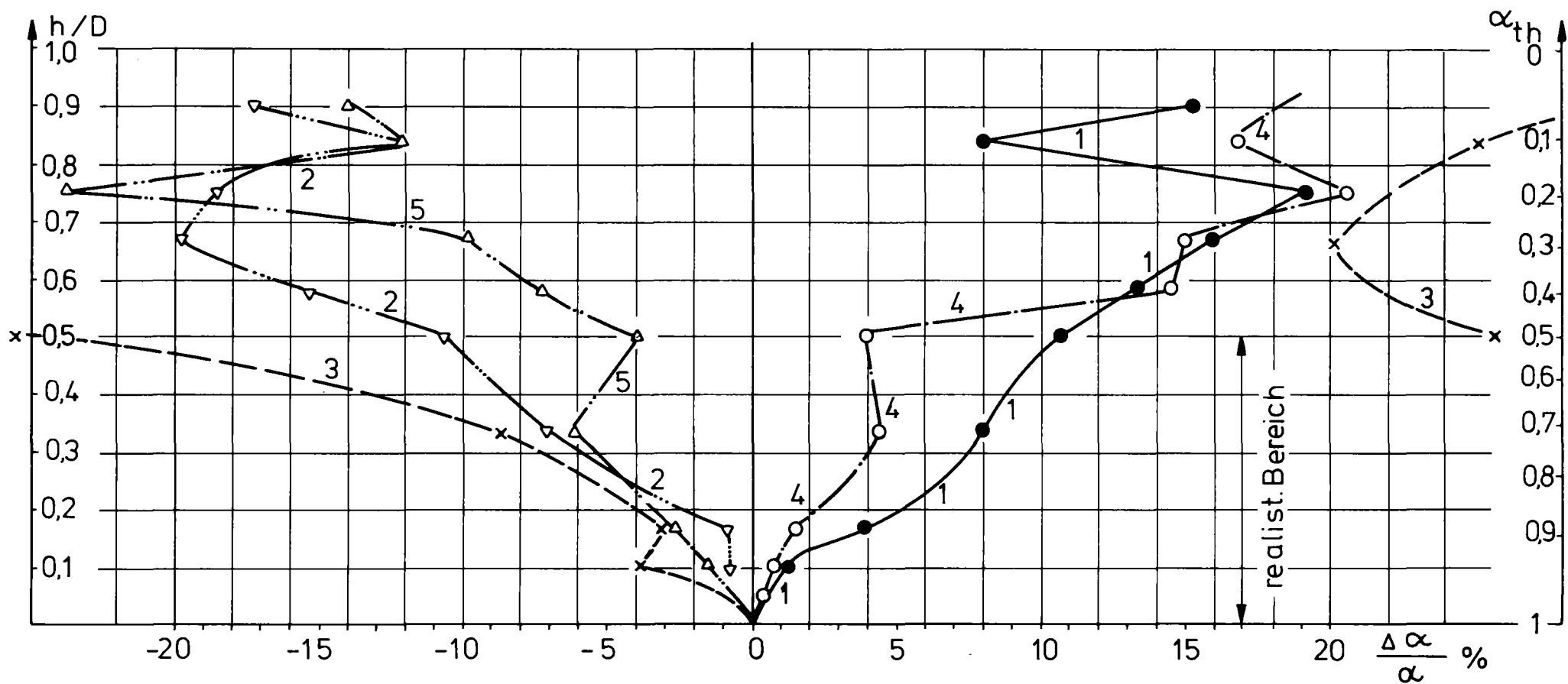
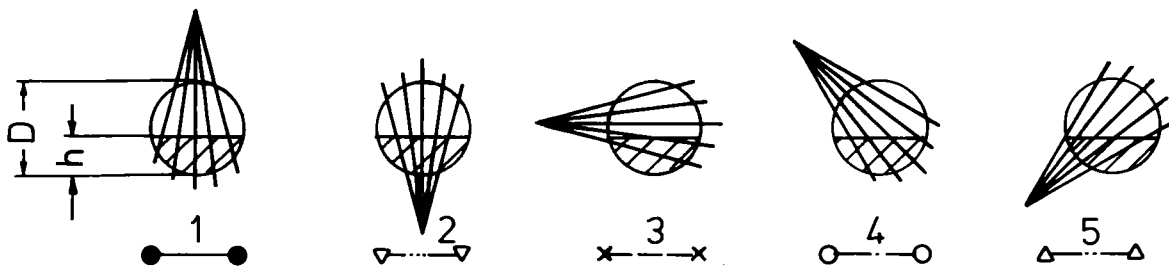


Abb.8 Absoluter Mittlg.-Fehler des 5 Strahl γ -Densitometers bei Schichtenströmung



KfK

Abb.9 Relativer Mittlg.-Fehler des 5-Strahl δ -Densitometers b. Schichtenströmung

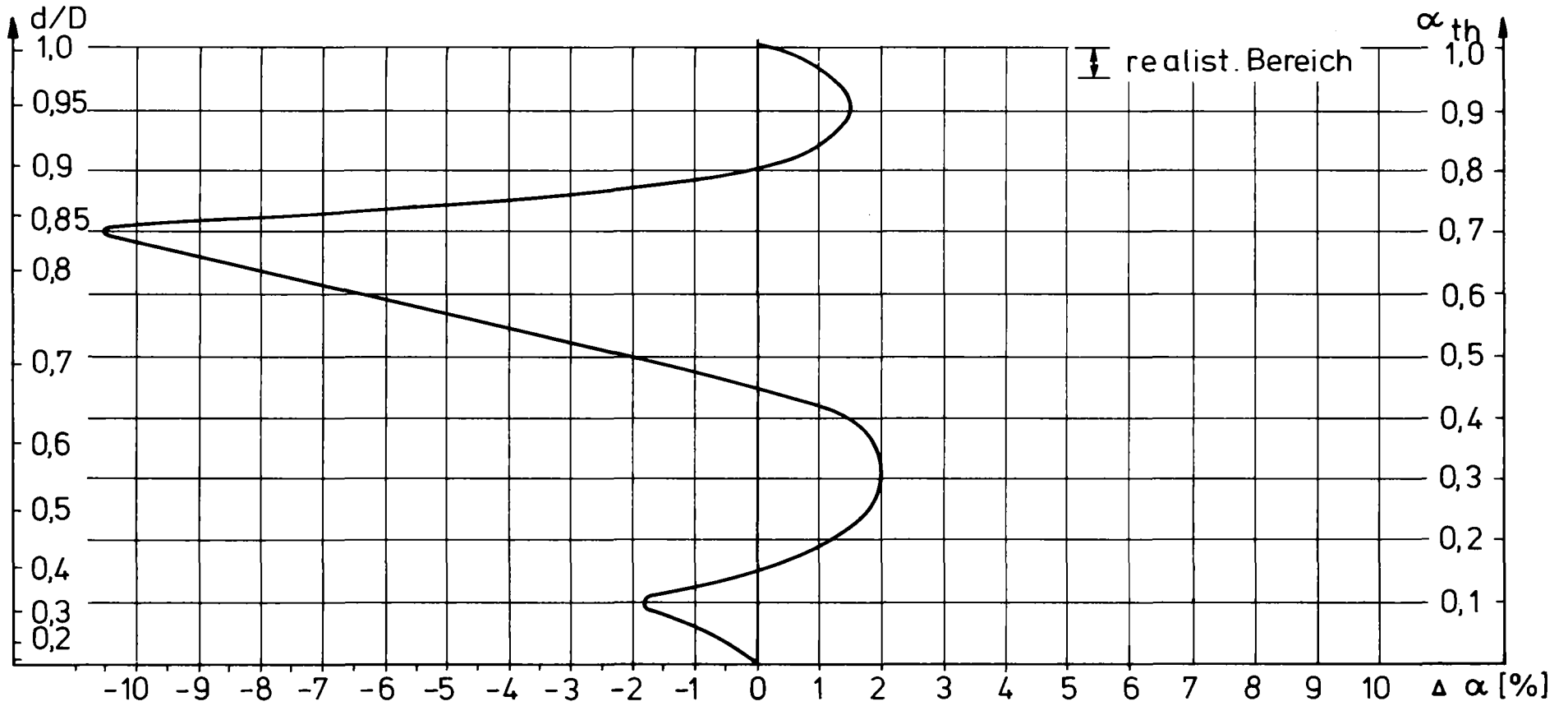
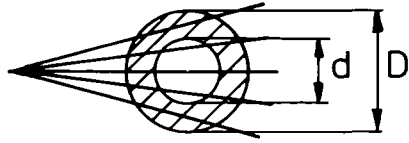
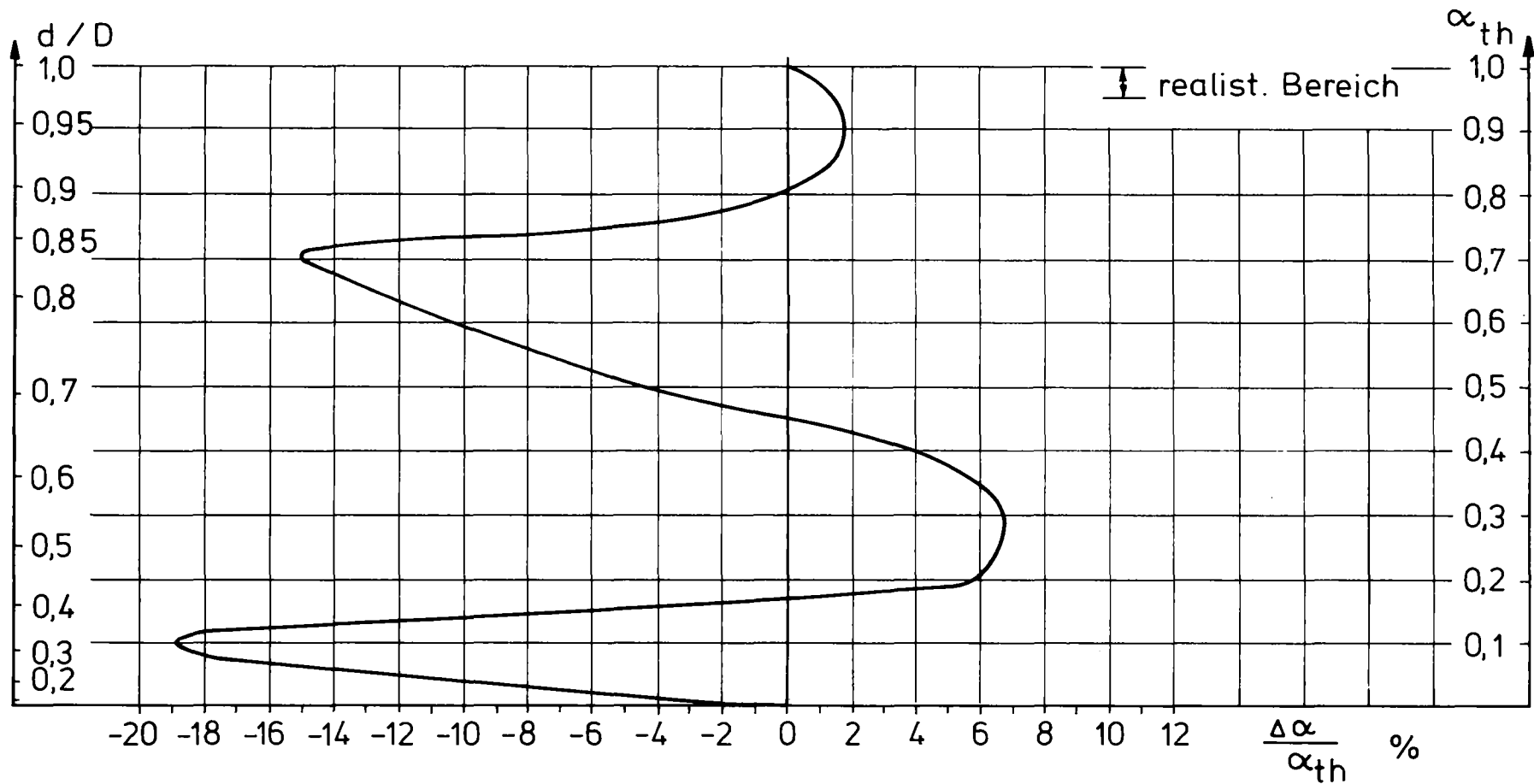
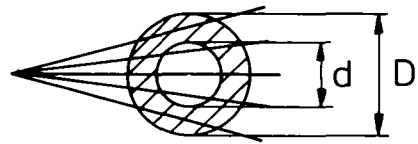


Abb.10 Absoluter Mittlg.-Fehler des 5 Strahl γ -Densitometers b. konz. Ringströmung



KfK

Abb. 11 Relativer Mittlg.-Fehler des 5 Strahl γ -Densitometers b. konz. Ringströmung

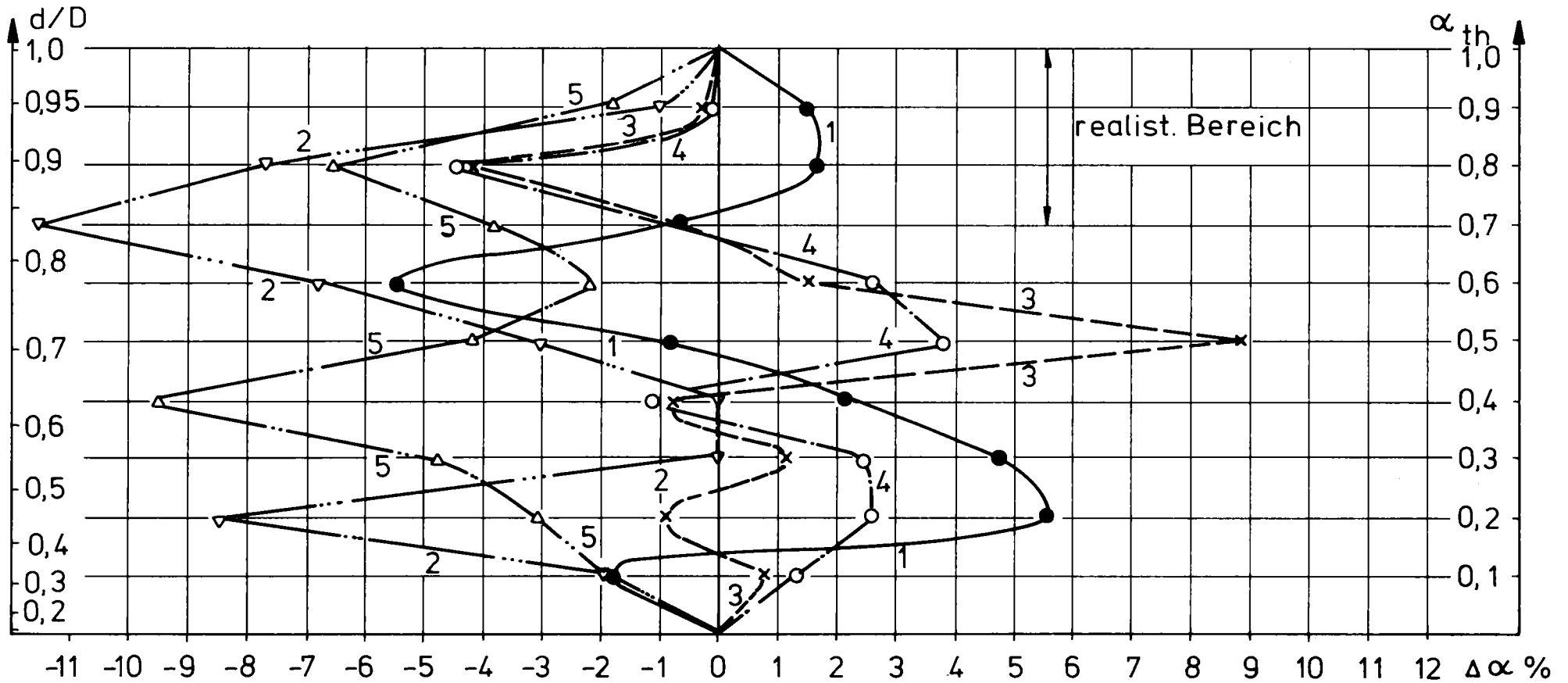
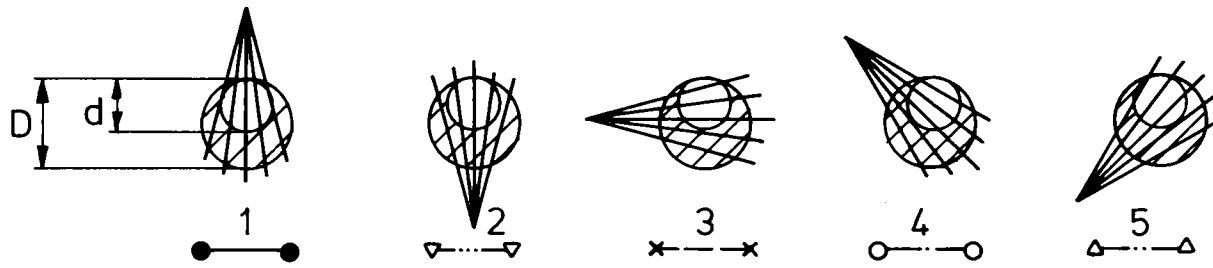
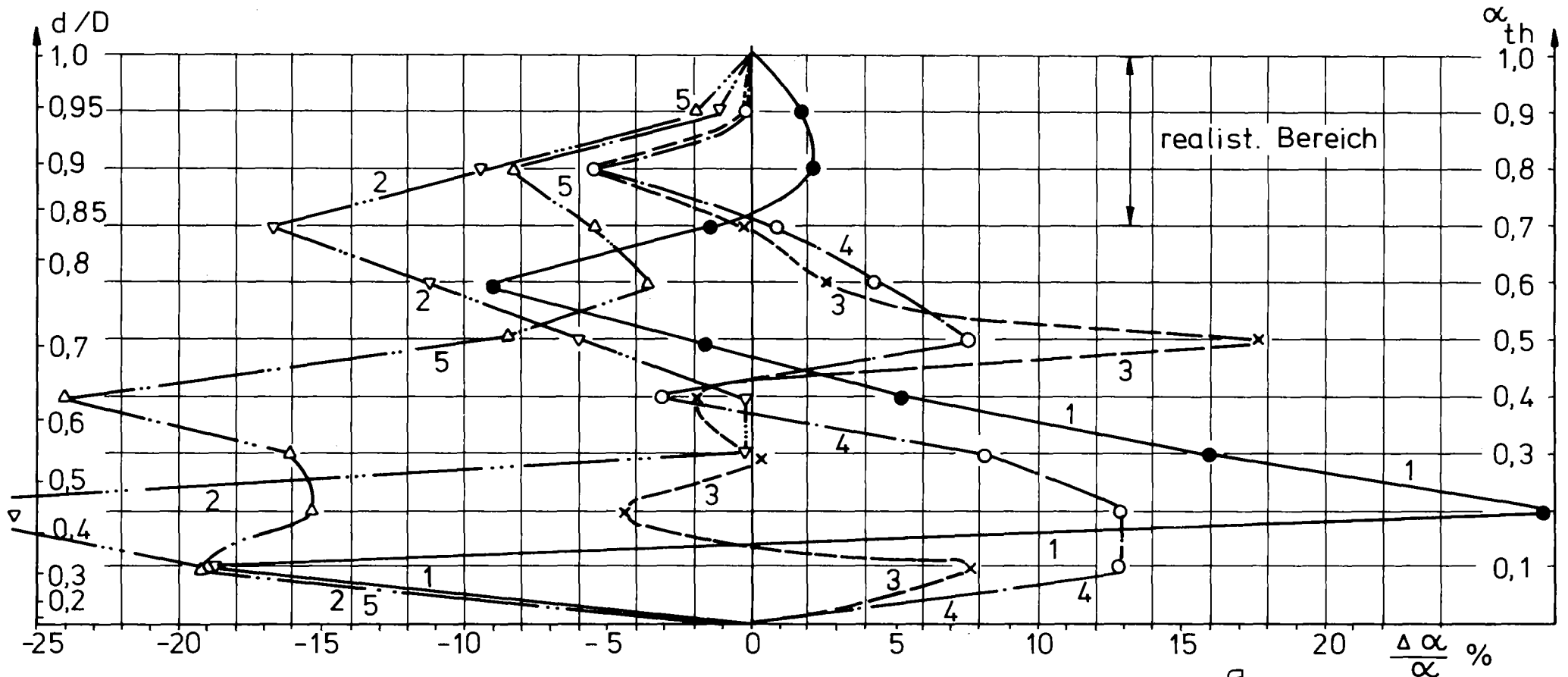
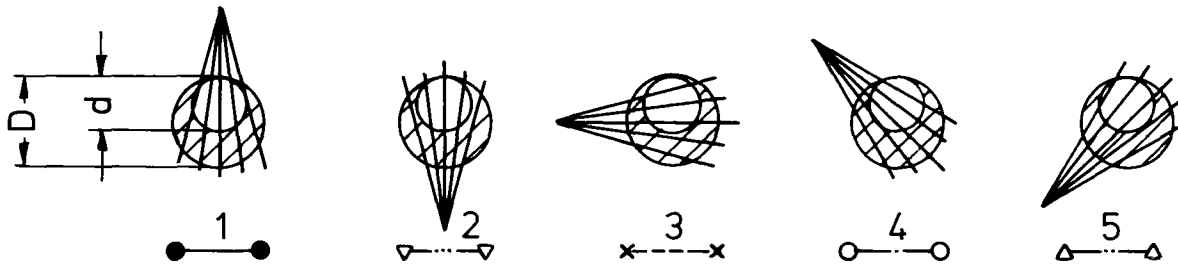


Abb.12 Absoluter Mittlg.-Fehler des 5Strahl δ -Densitometers b. exzent. Ringströmung



KIK

Abb.13 Relativer Mittlg.-Fehler des 5 Strahl α -Densitometers b. exzentr. Ringströmung

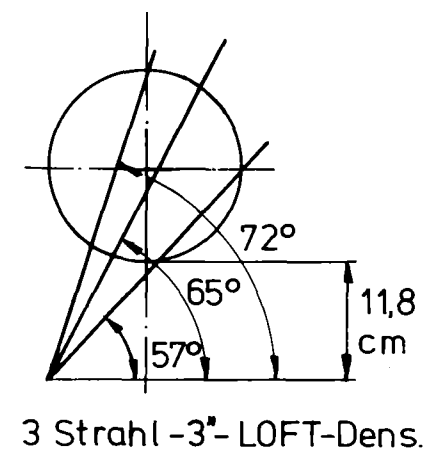
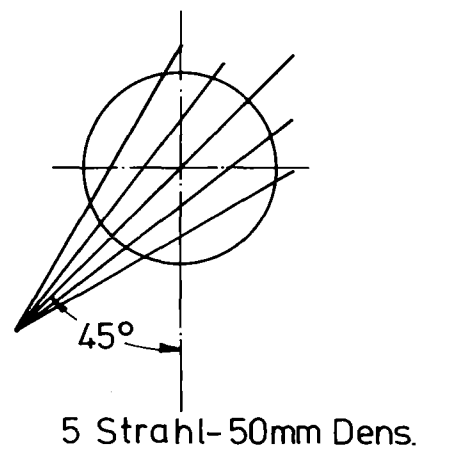
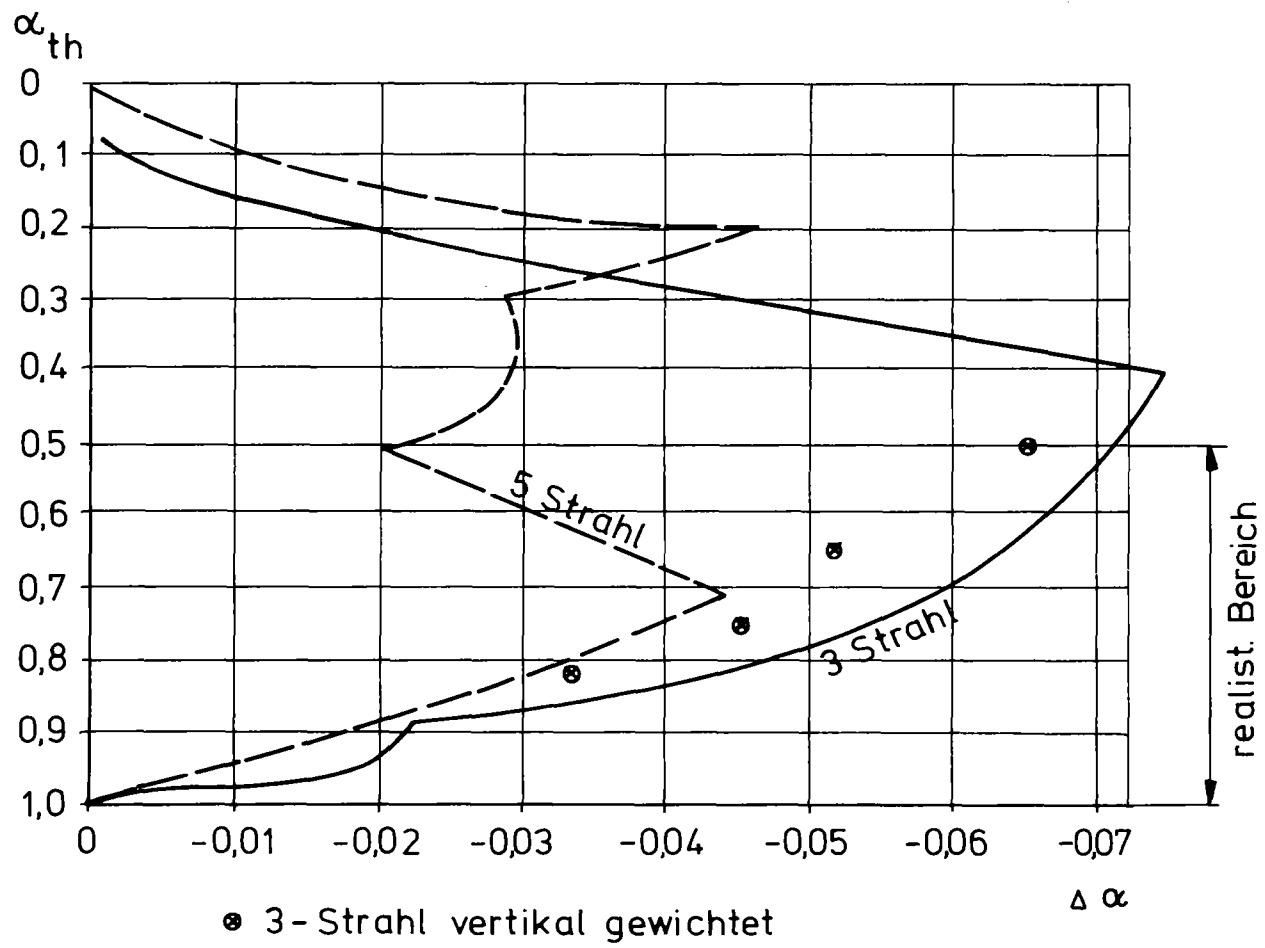


Abb.14 Absol. Mittlg.-Fehler d. 5-Strahl-u.d. LOFT-3-Strahl-Densitom. b. ideal. Schichtenströmng.

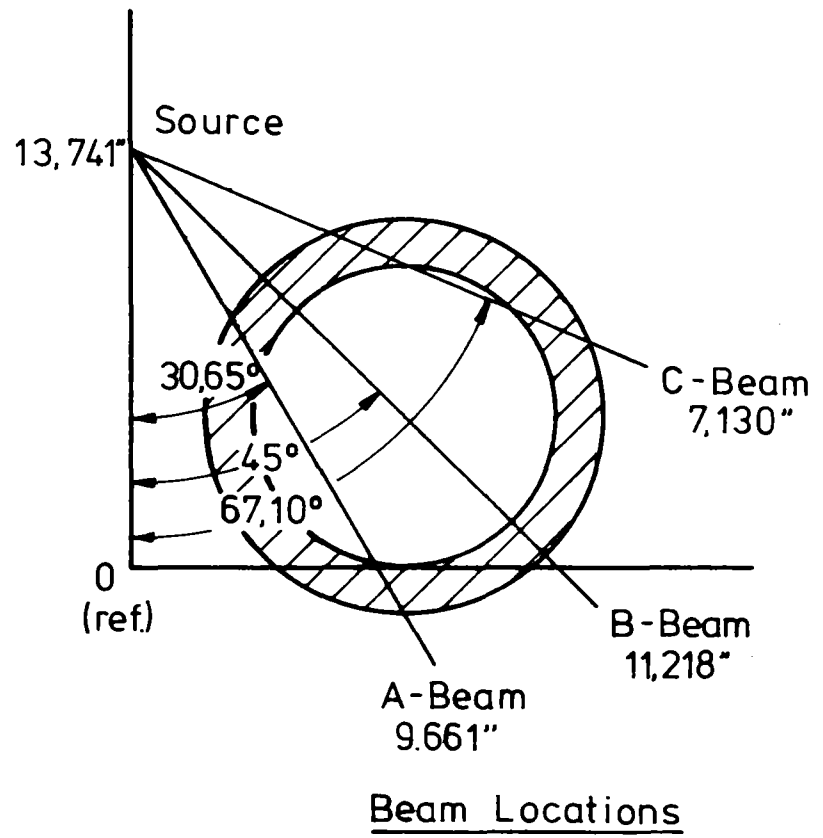
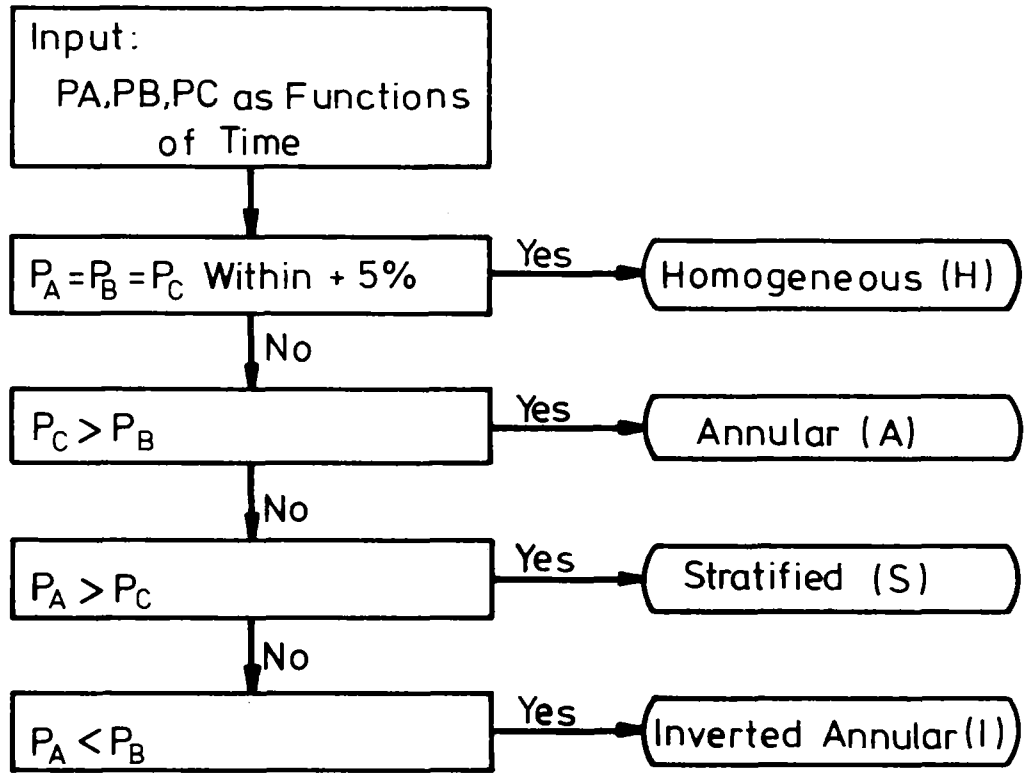
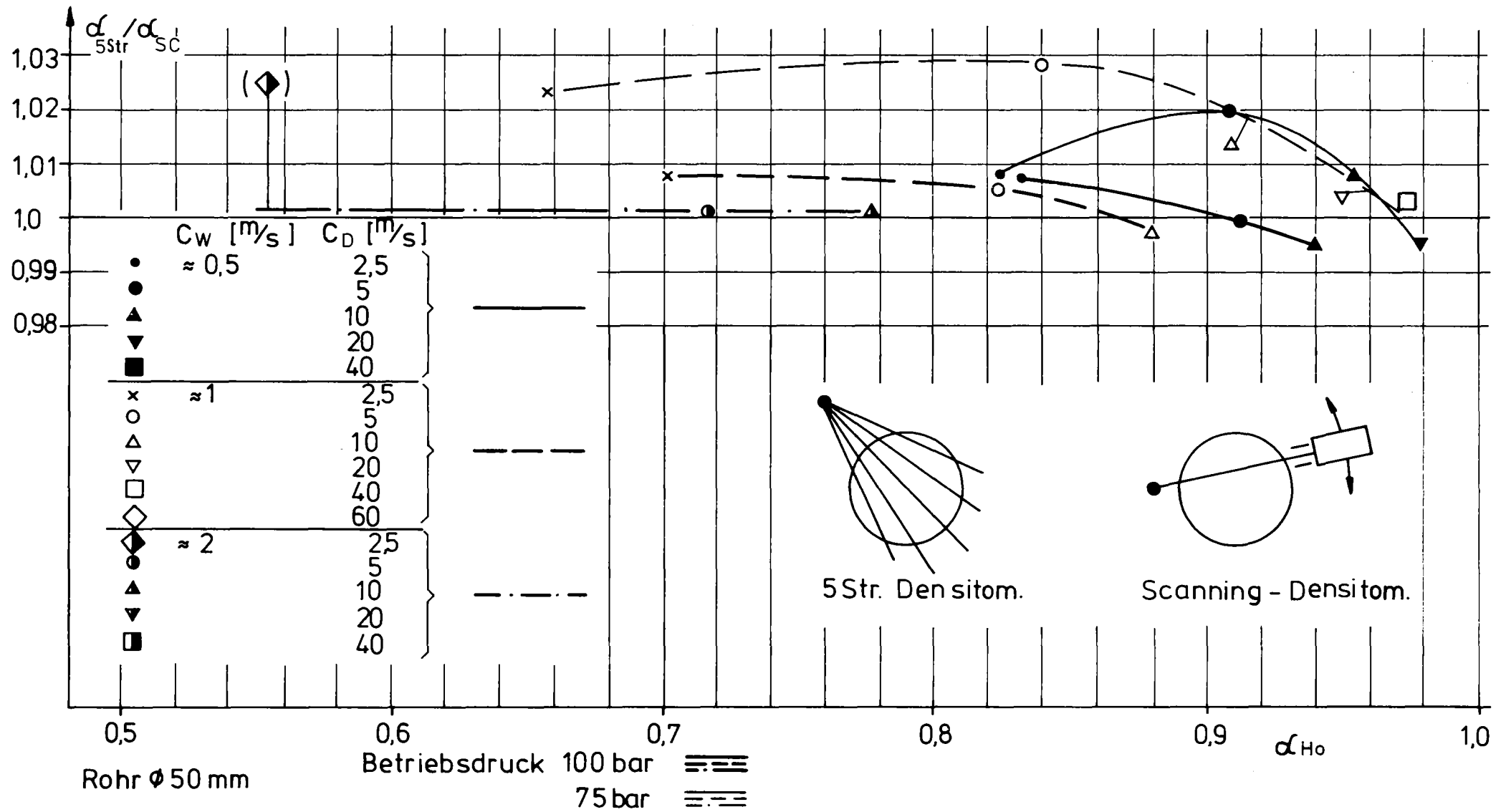
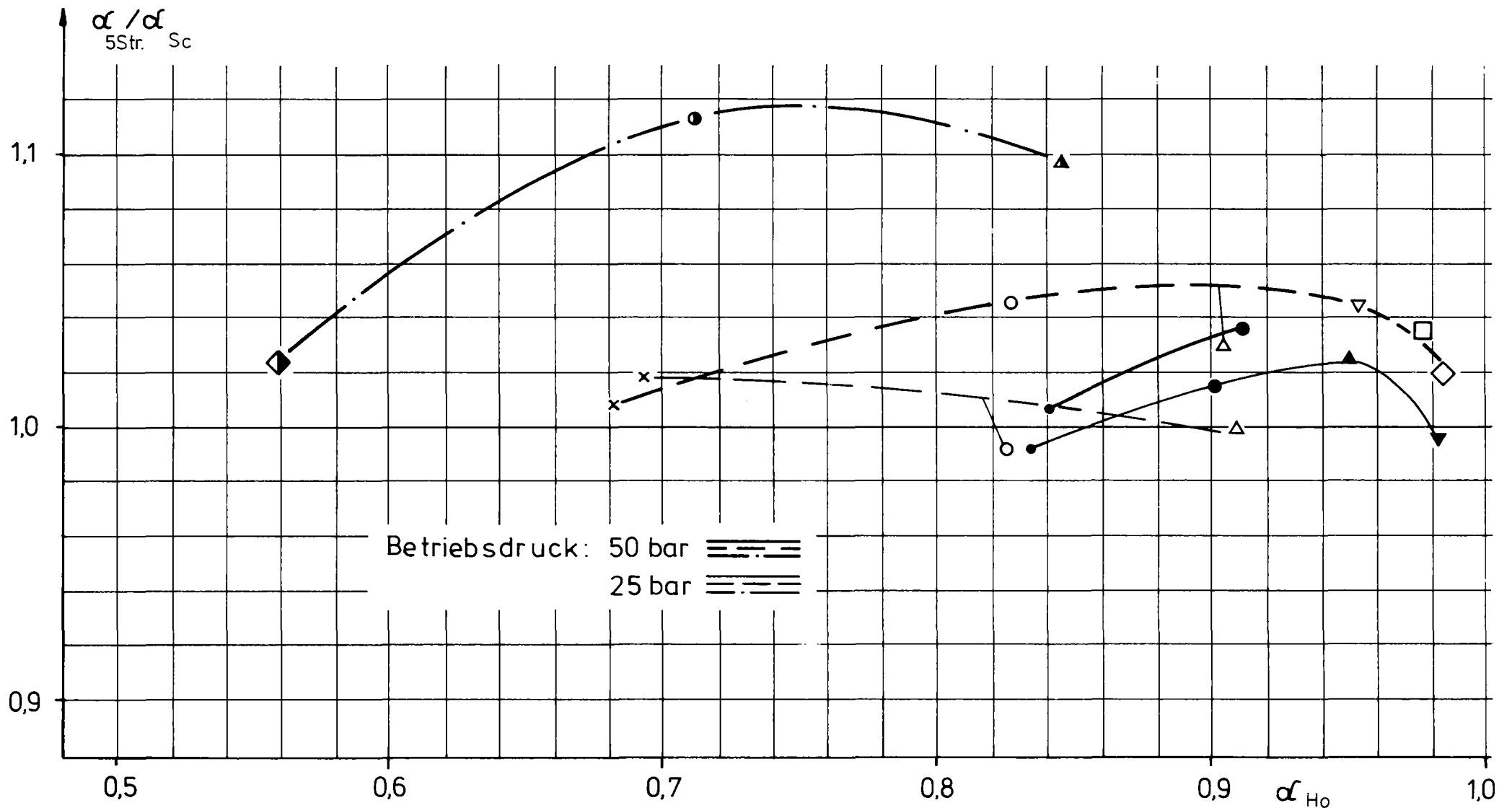


Abb. 15



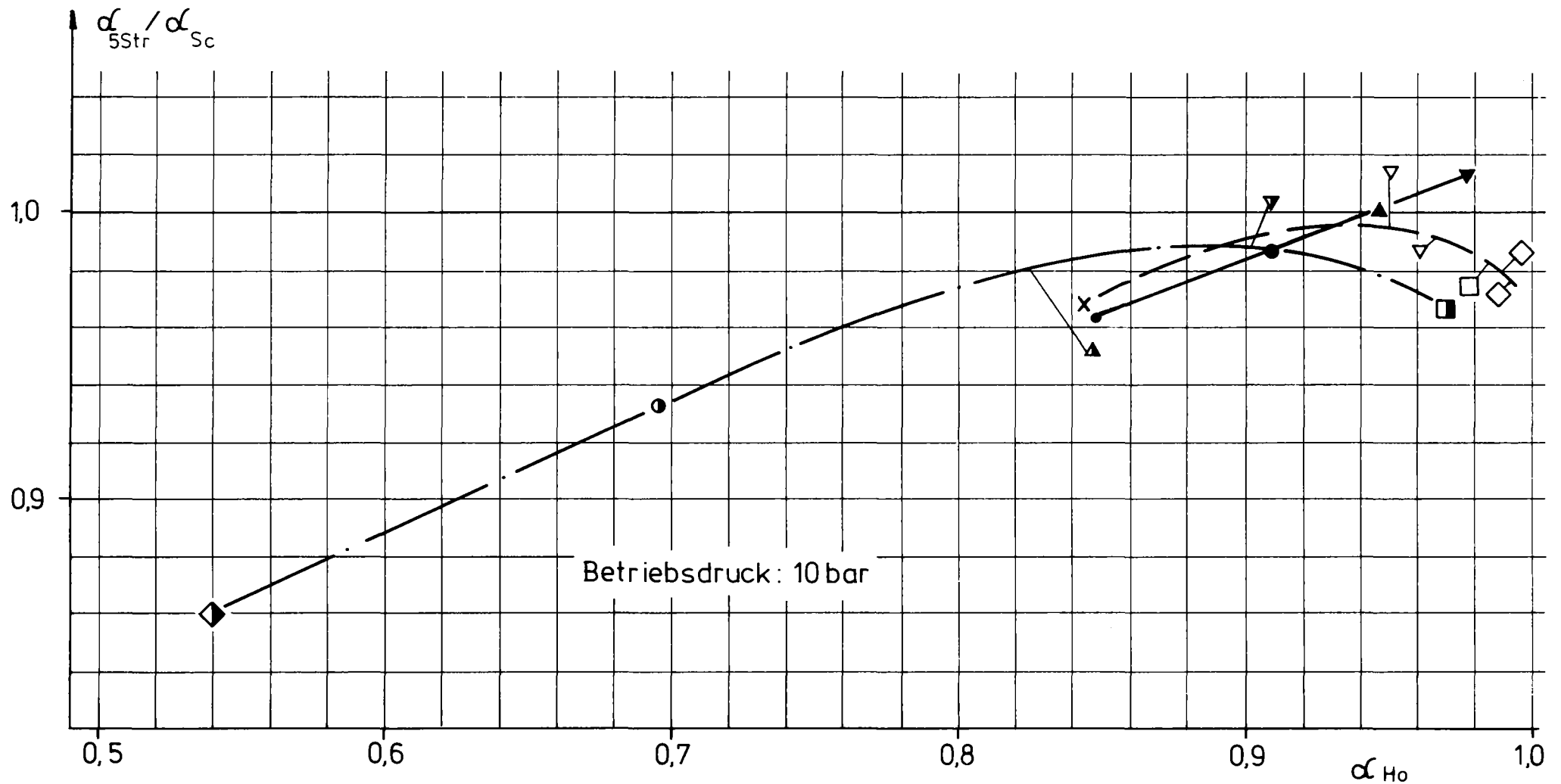
KfK

Abb.16 Vergleichsmessung des Gasvolumenanteils von waager. Dampf-Wasser-Strömung zwischen 5-Strahl und Scanning- γ -Densitometer



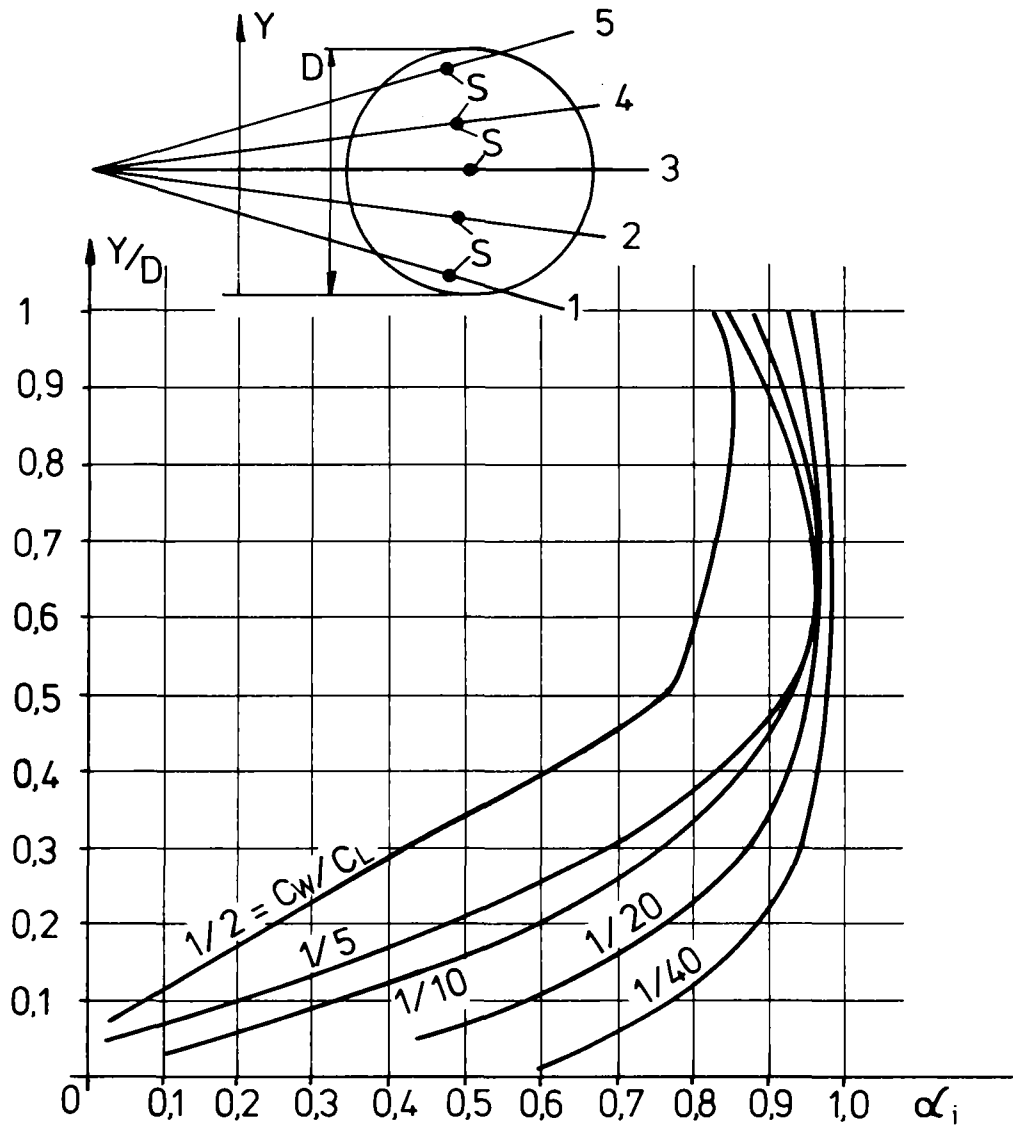
KfK

Abb.17 Vergleichsmessung des Gasvolumenanteils von waager. Dampf-Wasser-Strömung zwischen 5-Strahl und Scanning γ -Densitometer



KfK

Abb.18 Vergleichsmessung des Gasvolumenanteils von waager. Dampf-Wasser-Strömung zwischen 5-Strahl und Scanning - γ - Densitometer



C_W = Superficial velocity [m/s] Wasser
 C_L = Superficial velocity [m/s] Luft
 $D = 50 \text{ mm}$

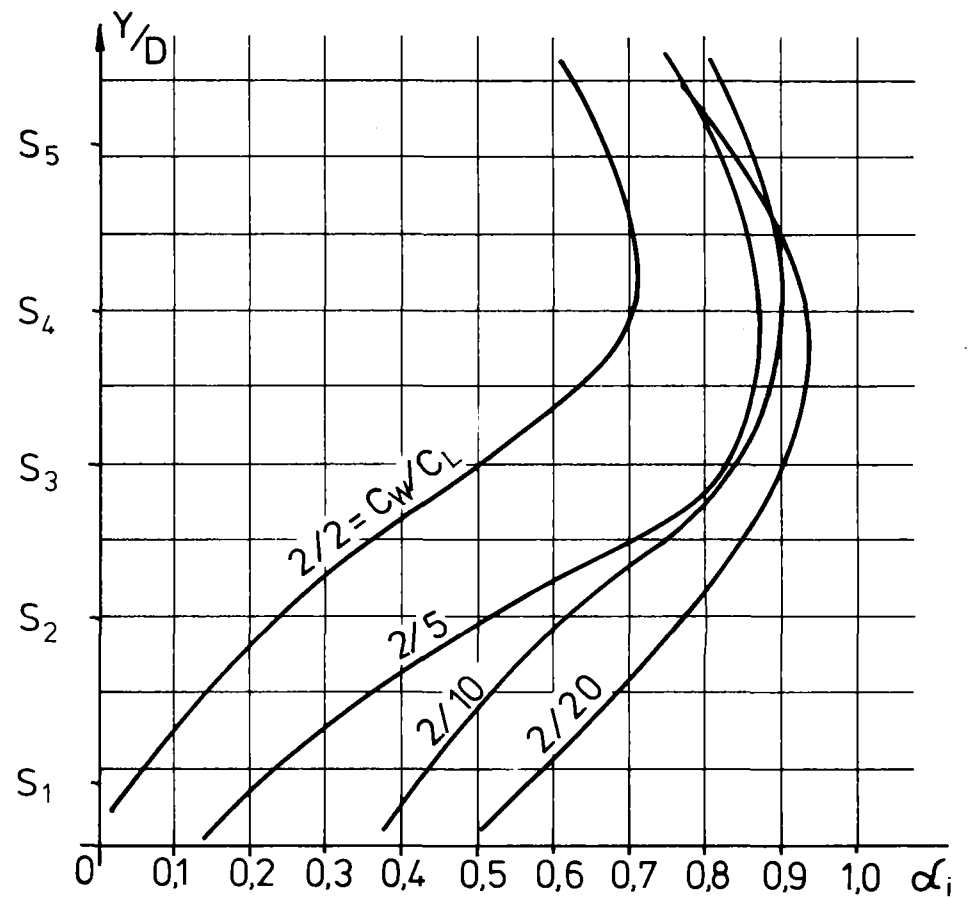
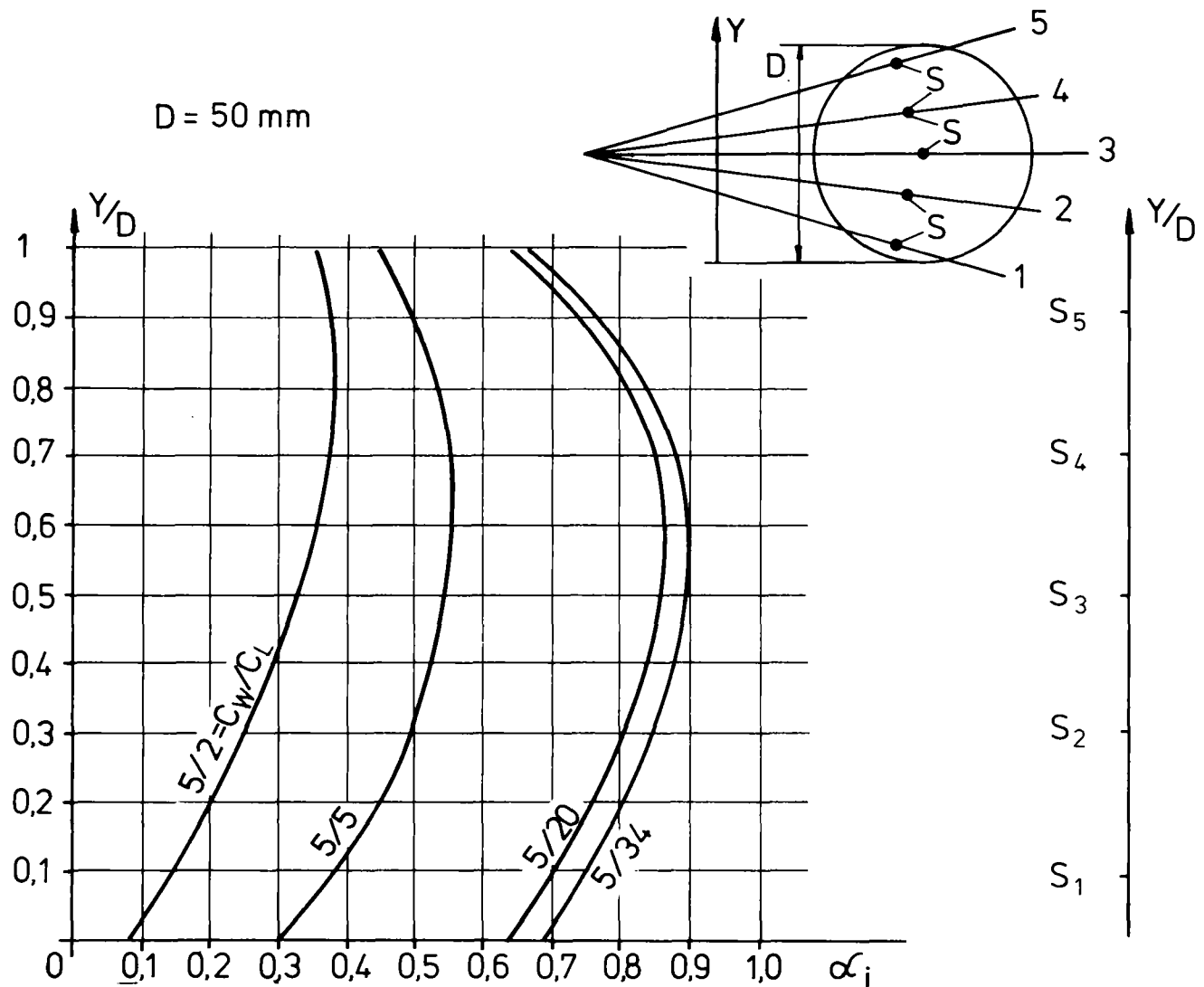


Abb.19 Verteilung des Gasvolumenanteils α über Kanalhöhe (Luft-Wasser 5bar)
 Serielles 5-Strahl γ -Densitometer



KIK

Abb. 20 Verteilung des Gasvolumenanteils α über der Kanalhöhe (Luft - Wasser 5bar)
 Serielles 5-Strahl γ -Densitometer