

KfK 2550
Januar 1978

Entwicklung einer Meßeinrichtung zur Bestimmung der Einzelkomponenten in einer instationären Luft/H₂O-Zweiphasenströmung nach dem Infrarot-Absorptionsprinzip

D. Barschdorff*, E. Erb, M. Neumann*,
P. Philipp, W. Rabold*, R. Weishaupt*, E. Wolf

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Nukleare Sicherheit

* Institut für Thermische Strömungsmaschinen
der Universität Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Nukleare Sicherheit

KFK 2550

Entwicklung einer Meßeinrichtung zur Bestimmung
der Einzelkomponenten in einer instationären Luft/
H₂O-Zweiphasenströmung nach dem Infrarot-Absorp-
tionsprinzip

D. Barschdorff *

E. Erb

M. Neumann *

P. Philipp

W. Rabold *

R. Weishaupt *

E. Wolf

* Institut für Thermische Strömungsmaschinen
der Universität Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe G.m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung:

Es wird eine Infrarot-Absorptionsmeßeinrichtung zur Bestimmung der Einzelkomponenten einer instationären Luft/H₂O-Zweiphasenströmung beschrieben, mit der die Anwendbarkeit des Infrarotprinzips für den Einsatz bei Blow-down-Versuchen - insbesondere den Marviken II-Experimenten - untersucht werden sollte. Die Arbeiten wurden im Rahmen des PNS-Projektes 4211: "Dynamische Beanspruchungen von LWR-Druckabbausystemen" gemeinsam vom Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) der Universität Karlsruhe und dem Institut für Reaktorentwicklung (IRE) der Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe durchgeführt.

Mit dem Infrarot-Meßverfahren werden bei angepaßter optischer Meßlänge unmittelbar die Wasserdampfdichte und die Wasserkonzentration mit hoher zeitlicher Auflösung und ohne größere Störung der Strömung durch Fühler oder Probeentnahme gemessen. Der Luftanteil wird durch zusätzliche Messung des Gesamtdrucks und der Temperatur des Fluids aus dem Luftpartialdruck bestimmt.

Bei Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit der Einzelkomponenten über die Korrelationstechnik, können die Luft-, Dampf- und Wassermassenströme errechnet werden.

Die Versuche haben gezeigt, daß sich das Infrarot-Meßprinzip für die Bestimmung der Gemischzusammensetzung einer Luft/Wasser-Nebelströmung eignet. Der Wassermassenanteil darf dabei höchstens 30 % betragen, die größte erreichbare optische Meßlänge beträgt ca. 300 mm. Mit Hilfe der Korrelationstechnik kann in einer Nebelströmung jedoch nur die Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase bestimmt werden, da die Lichtstreuung an Wassertröpfchen dominiert und somit auch den Charakter der gemessenen Signalschwankungen der Dampfphase wesentlich bestimmt.

Die Verfasser danken Herrn em. Professor R. Friedrich, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, und Herrn Professor D. Smidt, Institut für Reaktorentwicklung, für Ihr Interesse und die Unterstützung bei dieser Untersuchung.

Development of a Measuring Device for Determination of Single
Components in a Non-steady-state Air/H₂O Two-phase Flow based
on the Infrared Absorption Principle

Abstract

An infrared absorption measuring device is described to determine the single components of a non-steady-state air/H₂O two-phase flow. It was used to examine the applicability of the infrared principle in blowdown experiments in particular the Marviken II tests. The activities were jointly performed by the Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) of the University of Karlsruhe and the Institut für Reaktorentwicklung (IRE) of Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, under the PNS Task 4211 "Dynamic Load of LWR Pressure Suppression Systems".

The infrared method allows a direct measurement of the vapor density and water concentration, after adaption of the optical measured length. This method offers a high time resolution and only minor disturbances of the flow. The fraction of air can be derived from the partial air pressure after additional measurement of the total pressure and temperature of the fluid.

When the flow velocity of the single components is evaluated by use of the correlation method, the mass flows of air, vapor and water can be calculated.

The tests have shown that the infrared measuring principle is suitable for the determination of the mixture composition of an air/water-mist flow. The mass percentage of water must not exceed 30 %, whilst the maximum optical measured length achievable is about 300 mm. However, the correlation method allows to determine only the flow velocity of the liquid phase in a mist flow since scattering of light through water droplets dominates and so essentially determines the character of the signal oscillations measured in the vapor phase.

<u>Inhalt:</u>	<u>Seite:</u>
1. Einleitung	1
2. Theoretisches Modell, Meßprinzip	1
2.1 Strahlungsabsorption in Wasserdampf	3
2.2 Lichtstreuung und Absorption an kugelförmigen Teilchen	3
3. Bestimmung von Dampfdichte, flächenbezogener Wassermasse, Luftpartialdruck, Dampf-, Luft- und Wassermassenstrom	4
4. Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase	7
5. Versuchsstrecke und Meßeinrichtung	8
5.1 Versuchsstrecke	8
5.2 Infrarotsende- und Empfangsgerät	10
5.3 Meßwerterfassung	10
6. Messungen und Meßergebnisse	10
6.1 Messungen	10
6.2 Meßergebnisse	11
7. Fehlerbetrachtung	12
8. Formelzeichen, Indizes	14
9. Literatur	15
10. Anhang (Abbildungen)	

1. Einleitung

Bei dem Bruch einer Dampf- oder Speisewasserleitung im Primärsystem eines Siedewasserreaktors strömt das in die Druckkammer austretende Wasser-Wasserdampfgemisch über Kondensationsrohre in die mit Wasser gefüllte Kondensationskammer, um dort zu kondensieren. In dem Druckabbausystem und speziell in den Kondensationsrohren entsteht in einem solchen Fall eine instationäre zweiphasige Mehrkomponentenströmung Luft - Wasserdampf - Wassertropfen. Als Strömungsform ist bei hoher Strömungsgeschwindigkeit und wegen der Stabilitätsbedingungen für Wassertropfen eine Nebelströmung (mist flow) oder ein Übergang zu einer Ringströmung (annular flow) zu erwarten.

Bei diesen instationären Strömungsvorgängen wirken auf die Strukturen des Druckabbausystems Impulskräfte, die Schwingungen anregen und dynamische Beanspruchungen bewirken können [1].

Wesentliche Bedeutung kommt dabei dem Kondensationsvorgang in der Wasservorlage des Druckabbausystems zu, der durch den Dampfmassenstrom und die thermodynamischen Zustandsgrößen, aber auch durch den Luftanteil stark beeinflusst wird. Um Einblick in die ablaufenden Vorgänge zu gewinnen ist es erforderlich, die Einflußparameter des zuströmenden Gemisches zu messen.

Die kontinuierliche Bestimmung der Einzelkomponenten und Massenströme einer derartigen instationären Mehrkomponentenströmung stellt ein bisher nicht gelöstes Problem dar. Als mögliche Meßverfahren bieten sich thermodynamische, strömungstechnische, optische oder kerntechnische Verfahren an. Optische Meßverfahren zeichnen sich außer durch hohe Empfindlichkeit und schnelles Ansprechen dadurch aus, daß die Strömung nicht durch Fühler gestört wird. Die Infrarotmethode, die ein fester Bestandteil physikalischer Analysemethoden ist, wurde als schnellansprechendes Hygrometer zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes feuchter Luft angewandt [2,3]. Die breitbandige Infrarotabsorption zur Messung des Flüssigwasseranteiles in einer Dampfströmung wurde ebenfalls untersucht [4]. Das hier angegebene Infrarotverfahren ist durch eine neuartige Strahlführung gekennzeichnet und ermöglicht die gleichzeitige Messung der Dampfdichte und Wasserkonzentration durch Differenzbildung der Intensitäten dreier Wellenlängen.

2. Theoretisches Modell, Meßprinzip

Elektromagnetische Strahlung kann auf verschiedene Weise mit Gasmolekülen, festen Teilchen oder Körpern in Wechselwirkung treten:

1. Absorption Dabei wird Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt.
2. Streuung Die Wechselwirkung wird durch den relativen Brechungsindex zwischen Teilchen und umgebendem Medium und durch das Verhältnis der Wellenlänge der Strahlung zur Teilchengröße bestimmt.
3. Reflexion Hierbei wird ein Teil der einfallenden Energie an der Teilchen- oder Körperoberfläche reflektiert.

Wir betrachten im folgenden Wechselwirkungen durch Absorption und Streuung in einer Mehrkomponenten-Zweiphasenströmung Luft-Wasserdampf-Tröpfchen

Die folgenden Voraussetzungen sollen gelten:

- Luft und Wasserdampf verhalten sich wie perfekte Gase;
- Dampf und Wasser befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht, Dampf- und Lufttemperatur stimmen überein;
- Die flüssige Phase sei gleichmäßig über den Strömungsquerschnitt verteilt;
- Das Wasservolumen sei sehr viel kleiner als das Gasvolumen;
- Die Flüssigkeitstropfen werden in ihrem Lichtstreuverhalten nicht von benachbarten Teilchen beeinflusst, es tritt keine Vielfachstreuung auf;
- Die Tropfengrößenverteilung sei monodispers.

Wasserdampf und flüssiges Wasser zeigen im nahen und mittleren Infrarotbereich einige stark ausgeprägte Rotationsschwingungsbanden, wobei das H_2O -Molekül zu Valenz- und Deformationsschwingungen angeregt wird.

Die Hauptmaxima der Absorptionsbanden von Dampf und flüssigem Wasser liegen bei unterschiedlichen Wellenlängen, die Maxima der Dampfabsorptionslinien sind wegen der geringeren Bindungskräfte zu höheren Frequenzen hin verschoben. Entsprechende Wellenlängen lassen sich durch Interferenzfilter trennen. Tritt ein paralleles, monochromatisches Strahlenbündel der Anfangsintensität I_0 und der Wellenlänge λ durch eine homogene Wasserdampfschicht oder - in unserem Fall - ein Mehrkomponenten-Zweiphasengemisch, dann nimmt die Anfangsintensität durch Wechselwirkung der Strahlung mit absorbierenden und streuenden Teilchen ab. Diese Intensitätsabnahme (Extinktion) ist proportional zur Zahl der Wasserdampfmoleküle bzw. der Wassertröpfchen im Strahlen-gang. Sie wird formal durch einen komplexen Berechnungsindex berücksichtigt.

Wir betrachten drei Wellenlängen:

- λ_1 : Referenzwellenlänge, bei der die Strahlung weder durch Luft noch Wasserdampf beeinflusst wird.
- λ_2 : Entspricht dem Hauptmaximum einer Dampfabsorptionslinie.
- λ_3 : Liegt auf der Flanke einer Wasserabsorptionslinie nahe dem Hauptmaximum.

Aus dem Quotient der Intensitäten bei λ_1 und λ_2 wird eine Meßgröße für die Wasserdampfdichte abgeleitet. Der Quotient der Intensitäten von λ_1 und λ_3 stellt ein Maß für den Wassermassenanteil dar.

2.1 Strahlungsabsorption in Wasserdampf

Die Schwächung elektromagnetischer Strahlung der Wellenlänge λ in einer homogenen Wasserdampfschicht der Dicke ℓ wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben. Speziell im Bereich einer Absorptionsbande der mittleren Wellenlänge λ_2 erfolgt die Strahlungsextinktion fast ausschließlich durch Absorption - die Streuung ist demgegenüber vernachlässigbar klein - und es gilt:

$$I_{\lambda_2} = I_{0\lambda_2} \exp(-\epsilon(\lambda_2) \cdot \rho_D \cdot \ell) \quad (1)$$

I_0 ist die Anfangsintensität, I die Intensität der aus der Schicht austretenden Strahlung, $\epsilon(\lambda)$ der Extinktionskoeffizient und ρ_D die (thermodynamische) Dichte des Wasserdampfes.

2.2 Lichtstreuung und Absorption an kugelförmigen Teilchen

Wird ein kugelförmiges Teilchen (Tröpfchen) von einem parallelen linear polarisierten Lichtstrahl beleuchtet, so verhält es sich wie ein oszillierender elektrischer Dipol und sendet seinerseits Streustrahlung in alle Richtungen aus. Je nach Lichtwellenlänge und Teilchengröße unterscheidet man den Bereich der Rayleigh-Streuung und den der Mie-Streuung. Kennzeichnend für die Rayleigh-Streuung ist, daß die Intensität der Streustrahlung umgekehrt proportional der vierten Potenz der Wellenlänge ist. Enthält ein Medium pro Volumeneinheit N streuende Teilchen, so ergibt sich die pro Volumeneinheit gestreute Intensität aus der Summe der Streuintensität jedes einzelnen Teilchens. Eine ausführliche Schilderung dieser Sachverhalte gibt Kerker [5].

Integriert man den Gesamtbetrag der gestreuten Intensität eines Teilchens über alle Richtungen der Kugeloberfläche, so erhält man den Streuquerschnitt C_{sca} (scattering cross section). Die Division durch den geometrischen Querschnitt einer Kugel $\pi \cdot r^2$ ergibt den Wirkungsquerschnitt Q_{sca} (efficiency factor for scattering). Dieser wird als Funktion des dimensionslosen Parameters $\alpha = 2\pi r/\lambda$ angegeben und tabelliert.

$$Q_{sca} = \frac{C_{sca}}{\pi \cdot r^2} = f(\alpha) \quad (2)$$

Der Gültigkeitsbereich der Rayleigh-Theorie reicht bis etwa $\alpha \leq 0,3$. Für größere Teilchenradien gilt die Theorie der Mie-Streuung als exakte Lösung des Streuproblems an einer isotropen Kugel beliebiger Größe. Auch die Werte für Streu- und Wirkungsquerschnitt bei Mie-Streuung sind tabelliert. Für Wasser mit einem reellen Brechungsindex von 1.33 (ohne Absorptionsanteil) geht der Wirkungsquerschnitt Q_{sca} für $\alpha = 2\pi r/\lambda > 30$ in den konstanten Wert 2 über [5].

Bei entsprechender Wahl der Lichtwellenlänge tritt an Wasserteilchen Streuung und Absorption von Strahlung auf. Hierbei werden wieder Rotationsschwingungen der H_2O -Moleküle angeregt. Der komplexe Brechungsindex beinhaltet dann einen Wirkungsquerschnitt für Extinktion, der sich additiv aus dem Wirkungsquerschnitt für Streuung und Absorption zusammensetzt [5]:

$$Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs} \quad (3)$$

Trifft eine ebene monochromatische Lichtwelle in einer Zweiphasenströmung auf örtlich begrenzte Inhomogenitäten, so bewirken diese eine Schwächung der Strahlungsintensität durch Streuung bzw. Absorption, die ebenfalls einem Exponentialgesetz folgt:

$$I = I_0 \cdot \exp(-N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot Q_{ext} \cdot l) \quad (4)$$

3. Bestimmung von Dampfdichte, flächenbezogener Wassermasse, Luftpartialdruck, Dampf-, Luft- und Wassermassenstrom

Bei der Dampfdichtebestimmung ist dem Meßsignal der Wellenlänge λ_2 ein Streuanteil durch Wassertröpfchen überlagert. Den reinen Absorptionsanteil erhalten wir durch Differenzbildung mit dem Referenzsignal, dessen Wellenlänge λ_1 so gewählt ist, daß sich die den Wellenlängen λ_2 und λ_1 zugeordneten Streuwirkungsquerschnitte nur wenig unterscheiden. Bei konstantem Extink-

tionskoeffizient $\epsilon(\lambda_2)$ und fester Meßlänge ℓ ergibt sich die Dampfdichte nach (1) zu:

$$\rho_D = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (5)$$

mit der Apparatekonstanten $K = \epsilon(\lambda_2) \cdot \ell$.

Zur Bestimmung der Wasserkonzentration betrachten wir zwei Wellenlängen λ_1 und λ_3 , für die sowohl der Realteil des Brechungsindex als auch die Streuwirkungsquerschnitte nahezu gleich groß sein sollen. Die Wellenlänge λ_3 fällt mit einer Absorptionsbande des flüssigen Wassers zusammen, es gilt:

$$Q_{\text{ext}}(\lambda_3, r) = Q_{\text{sca}}(\lambda_3, r) + Q_{\text{abs}}(\lambda_3, r) \quad (6)$$

Die Wellenlänge λ_1 liegt außerhalb der Bande, es gilt:

$$Q_{\text{ext}}(\lambda_1, r) = Q_{\text{sca}}(\lambda_1, r) \quad (7)$$

Bei den hier betrachteten Wellenlängen sind die Wirkungsquerschnitte für Streuung für Tropfenradien $> 25 \mu\text{m}$ gleich. Bei kleineren Radien gilt dies nur näherungsweise.

Durchlaufen die beiden Strahlengänge dasselbe Meßvolumen, so stimmen die Streuintensitäten überein, da die Teilchenzahl N , der Teilchenradius r und die Schichtdicke ℓ gleich sind. Es gilt:

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right)_{\lambda_1} = N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot Q_{\text{sca}}(\lambda_1, r) \cdot \ell \quad (8)$$

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right)_{\lambda_3} = N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot [Q_{\text{sca}}(\lambda_1, r) + Q_{\text{abs}}(\lambda_3, r)] \cdot \ell \quad (9)$$

Den reinen Absorptionsanteil erhalten wir durch Differenzbildung:

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right)_{\lambda_3} - \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)_{\lambda_1} = \ln \frac{I_1}{I_3} = N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot Q_{\text{abs}}(\lambda_3, r) \cdot \ell \quad (10)$$

Er ist proportional der Gesamtfläche $N \pi r^2$ der absorbierenden Teilchen bzw. der flächenbezogenen Wassermasse \bar{w} mit der Dimension kg/m^2 . Die flächenbezogene Wassermasse \bar{w} berechnet sich aus:

$$\bar{w} = \text{Konst.} \cdot \rho_w \cdot \ln \frac{I_1}{I_3} \quad (11)^x$$

Die Konstante der Gl. (11) ist eine Funktion $F(r, Q_{\text{abs}}(\lambda, r))$. Sie kann aus den Versuchsbedingungen nach (11) und (26) berechnet werden.

Die Bestimmung des Luftanteils erfolgt über den Luftpartialdruck. Für den Gesamtdruck p gilt:

$$p = p_L + p_D \quad (12)$$

wobei p_L und p_D die Partialdrücke von Luft und Wasserdampf sind. Dabei wird angenommen, daß nur Luft und Wasserdampf im Strömungskanal strömen und der Wasservolumenanteil vernachlässigbar ist.

Für den Wasserdampfpartialdruck gilt direkt:

$$p_D = \rho_D \cdot R_D \cdot T = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{K} \cdot R_D \cdot T \quad (13)$$

Für den Luftpartialdruck p_L folgt dann:

$$p_L = p - \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{K} \cdot R_D \cdot T \quad (14)$$

R_D ist die Gaskonstante für Dampf. Als Meßwerte sind der Gesamtdruck p , die statische Temperatur T und das logarithmische Absorptionsverhältnis I_1/I_2 zu bestimmen.

Die Konstante K folgt aus einer Messung in reinem Dampf ($p_L = 0$):

$$K = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{p} \cdot R_D \cdot T \quad (15)$$

Zur Bestimmung des Dampf- und Luftmassenstromes ist die Kenntnis der Strömungsgeschwindigkeit c der beiden Komponenten notwendig. Mit dem Strömungsquerschnitt A folgt:

$$\dot{m}_D = \rho_D \cdot c_D \cdot A \quad (16)$$

x Diese Art der Wasserkonzentrationsmessung wird in dem PNS-Bericht: "Auswertung von Infrarotabsorptionsmessungen am Druckabbausystem des Reaktors Marviken" / 97 mit einer Tropfenrößenbestimmung nach der Absorptionsquotientenmethode verglichen.

und

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot c_L \cdot A \quad (17)$$

Die Luftdichte ergibt sich mit der speziellen Gaskonstante R_L für Luft zu:

$$\rho_L = \frac{p_L}{R_L \cdot T} \quad (18)$$

Mit Gl.(14) folgt daraus für den Luftmassenstrom:

$$\dot{m}_L = \left[\frac{p}{R_L \cdot T} - \frac{R_D}{R_L} \cdot \frac{\lambda_n \frac{I_1}{I_2}}{K} \right] \cdot c_L \cdot A \quad (19)$$

Den Wassermassenstrom erhalten wir mit der flächenbezogenen Wassermasse \bar{w} und der optischen Meßlänge ℓ zu:

$$\dot{m}_w = \rho_w \cdot c_w \cdot A \cdot \frac{\bar{w}}{\rho_w \cdot \ell} \quad (20)$$

$$\dot{m}_w = c_w \cdot \frac{\bar{w}}{\ell} \cdot A \quad (21)$$

Dabei sind folgende Größen zu messen:

die Intensitätsverhältnisse bei $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$;

die Temperatur T und der Druck p am Meßort;

die Strömungsgeschwindigkeit der gasförmigen und flüssigen Phase, wobei bei einer Nebelströmung mit feinverteilten Tröpfchen

$c_w = c_D = c_L = c$ angenommen wird (s.hierzu Kap. 5.3).

4. Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase

Ordnet man in Strömungsrichtung versetzt zwei optische Meßebenen an, dann läßt sich die Geschwindigkeit der flüssigen Phase über eine Laufzeitmessung [6,7] bestimmen. Die stochastisch schwankenden Zeitfunktionen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ entstehen durch turbulente Schwankungen der Strömungsparameter. Falls sich die Turbulenzstruktur des Fluids zwischen den Meßebenen mit einem Abstand a nicht wesentlich ändert, dann erhalten wir die Geschwindigkeit über die Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion:

$$\phi_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) \cdot u_2(t-\tau) dt \quad (22)$$

zu

$$c_w = \frac{a}{\tau}$$

Bei zeitlich veränderlicher Geschwindigkeit (transiente Strömung) des Fluids kann die Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion digital in Zeitintervallen erfolgen, in denen die Geschwindigkeit jeweils als konstant angenommen wird. Bei einphasiger Strömungsform erhalten wir die Geschwindigkeit der gas- oder der flüssigen Phase allein. Bei einer Zweiphasen-Nebelströmung tritt als hauptsächlichster Streuanteil die Strahlbeeinflussung durch die flüssige Phase auf, deren Geschwindigkeit damit gemessen wird.

5. Versuchsstrecke und Meßeinrichtung

Die vorstehenden Beziehungen und Modellvorstellungen wurden mit einer Infrarot-Meßeinrichtung an einer Versuchsstrecke im Institut für Thermische Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe überprüft. Diese Versuchsstrecke wurde zusammen mit dem IRE so konzipiert, daß sie an einem vorhandenen Dampfversuchskreislauf angeschlossen werden kann.

5.1 Versuchsstrecke

Auf Abb. 1 und 2 ist die Gesamtanordnung einschließlich der Instrumentierung dargestellt. Die Versuchsstrecke besteht aus einer haarnadelförmigen Rohrschleife von ca. 7 m Länge und 150 mm lichte Rohrdurchmesser. Sie wird in der Anströmung mit Heißdampf beschickt, dem dann Luft und Wasser zugemischt werden kann.

Die zu erprobende Meßapparatur ist an dem abwärts durchströmten Rohrstrang in 2 Meßebenen angeordnet, die jeweils durch eine Sender- und Empfängereinheit gebildet werden. Zur Untersuchung des Laufzeiteinflusses auf die Korrelationsmessung können die Meßebenen in 3 verschiedenen Abständen (150, 300 und 450 mm) zueinander angebracht werden. Um das Nachjustieren der Optik bei den versuchsbedingten Umbauten auf ein Minimum zu beschränken, sind die Sender- und Empfängereinheiten über eine zentrierte Konsole an den Flanschen der Kanalfenster befestigt. Sämtliche Rohrflanschverbindungen sind

mit Zentrierhülsen ausgestattet, um etwaige Stolperkanten zu vermeiden.

Als Kanalfenster (Abb. 3) dienen jeweils 2 Sicherheitsglasscheiben von 8 mm Dicke, die nach Art einer Doppelverglasung einen evakuierbaren Zwischenspalt aufweisen, um dem Beschlagen durch kondensierenden Dampf entgegen zu wirken. Die Abdichtung erfolgt durch O-Ringe (Werkstoff Viton), in einseitig schwimmender Ausführung. Im Laufe der Versuche wurde zusätzlich eine elektrische Scheibenheizung eingebaut.

Zum Schutz gegen Benetzen durch Wassertröpfchen sind den Kanalfenstern zum Strömungsmedium hin Rohrstutzen vorgesetzt, die sich jedoch als nicht wirksam genug erwiesen und andere Konstruktionen nach Abb. 9 und 10 (Kap. 6.1) erforderlich machten. Die Glasfenster wurden hier durch Einblasen vorgewärmter Luft von Wassertröpfchen freigehalten.

Unmittelbar über der obersten Meßebene weist die Versuchsstrecke eine trichterförmige Verengung (Abb. 3) mit einer relativ scharfen Abrißkante auf, die die Aufgabe hat, den Wasserfilm von der Rohrwand abzulösen, so daß er durch die Infrarotmessung miterfaßt werden kann.

Durch eine darüber angeordnete Absaugeinrichtung kann außerdem der Wasserfilm weitgehend abgesaugt werden. Die Einrichtung besteht im wesentlichen aus einem Gehäuse mit 2 eingesetzten Hülsen, wovon die obere etwas zurückgelegt ist und die untere eine scharfe Lippe trägt. Dadurch wird der Wasserfilm praktisch abgeschält und durch den bestehenden Ringspalt in einen Ringsammelraum transportiert, von wo das Wasser dann abgeleitet wird.

Die Wassereinspritzung erfolgt am oberen Rohrkrümmer unmittelbar am Anfang des abwärts durchströmten Rohrstranges. Dazu dienen 4 Einstoffdüsen (Abb. 4), die unter 55° zur Strömungsrichtung gleichmäßig verteilt am Umfang eines Gehäuseteils angeordnet sind. Das den Düsen zuströmende Wasser wird über Rotameter gemessen. Es wird in Rohrleitungen außen an der Wand des nach oben durchströmten Rohrstranges entlang geführt und dabei durch Wärmeleitung gleichzeitig aufgeheizt. Die eigentliche Meßstrecke ist im Bereich der Zweiphasenströmung mit einer Wärmeisolation und einer elektrischen Zusatzheizung versehen, um den durch die eingespritzten Wassertröpfchen verursachten Wandwasserfilm nicht noch durch Kondensation zusätzlich zu vergrößern.

Die Luft wird nach dem Einlaufkrümmer dem Dampfstrom zugemischt. Dabei hat die Mischeinrichtung (Abb. 5) eine Doppelfunktion zu erfüllen. Sie ist genau so aufgebaut wie die bereits beschriebene Wasserfilm-Absaugeinrichtung und

dient zunächst beim Anfahren der kalten Versuchsstrecke dem Zweck, ein Zurückfließen des Wasserfilms in das Dampfzuströmsystem zu verhindern. Anschließend werden dann die Zuleitungsanschlüsse gewechselt und über einen Rotameter Luft eingeblasen.

Mit dieser Versuchsstrecke werden folgende Parameter erreicht:

Druck p bis 1,5 bar

Temperatur T bis 160 °C

Dampfmassenstrom \dot{m}_D bis 1800 kg/h

eingespritzter Wassermassenstrom $\dot{m}_{W,E}$ bis 380 kg/h

Strömungsgeschwindigkeit bis 51 m/s.

5.2 Infrarotsende- und Empfangsgerät

Den optischen Strahlengang eines Infrarot-Sende- und Empfangsteils zeigt Abb. 6. Die Strahlung der Lampe La wird in der Ebene einer Unterbrecherscheibe U fokussiert und mit 750 Hz moduliert. Auf der Empfängerseite werden über halbdurchlässige Spiegel und Interferenzfilter die Intensitäten der drei Wellenlängen λ_1 , λ_2 und λ_3 ausgeblendet und über Bleisulfidphotowiderstände in elektrische Signale gewandelt. Die weitere Signalverstärkung geschieht über rauscharme selektive Verstärker. Die Abb. 7 zeigt das Infrarot-Empfangsgerät.

5.3 Meßwerterfassung

Die Meßwerte werden mit einem Prozeßrechner und zwei Zweikanal-Linienschreibern registriert. Abb. 8 zeigt schematisch die Anordnung. Mit Hilfe des Prozeßrechners wurden Temperaturen und Drücke on line in physikalischen Größen ausgegeben.

Zusätzlich wurden der Dampfmassenstrom (Kondensatmenge) und die Einspritzwassermenge über Rotameter gemessen.

6. Messungen und Meßergebnisse

6.1 Messungen

Bei den ersten Versuchen gelang es zunächst nicht, die Fenster der optischen Meßeinrichtung frei von Wassertröpfchen zu halten. Dabei wurde ein Zurücksetzen der Glasfenster sowie Beheizen untersucht. Letztlich erwies sich ein

Wasserabscheider nach dem Zyklonprinzip nach Abb. 9 ^{x)} sowie eine abgewandelte Konstruktion, Abb. 10 als geeignet. Es werden hierbei etwa 5 g/s auf 60-120 °C vorgewärmter Luft eingeblasen, die sich nicht auf das Meßergebnis auswirken und die Fenster frei von Wassertröpfchen halten.

6.2 Meßergebnisse

Die erste Versuchsserie umfaßte Versuche bei konstantem Dampfmassenstrom und unterschiedlicher Wassereinspritzmenge, die über Rotameter gemessen wurde.

Der Feuchte- oder Wassergehalt y einer Zweiphasenströmung ist definiert als das Verhältnis von Wassermassenstrom zu Gesamtmassenstrom:

$$y = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_w + \dot{m}_D} \quad (24)$$

Entsprechend läßt sich der Dampfgehalt ausdrücken als $x = 1-y$. Der nach Kondensation oder Verdampfen der eingespritzten Wassermenge $\dot{m}_{w,1}$ vorhandene Wassergehalt y wurde über bekannte thermodynamische Beziehungen errechnet.

Der nach Einspritzung vorhandene Wassermassenstrom \dot{m}_w läßt sich darstellen als:

$$\dot{m}_w = y \cdot (\dot{m}_{w,1} + \dot{m}_{D,1}) \quad (25)$$

Index "1" bezieht sich auf den Ort der Wassereinspritzung.

Ersetzt man in Gl.(21) den Ausdruck \dot{m}_w , so ergibt sich der Zusammenhang zwischen Wassermassenstrom $\dot{m}_{w,1}$ und der flächenbezogenen Wasserkonzentration zu:

$$\bar{w} = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{c_w} \cdot y \cdot (\dot{m}_{w,1} + \dot{m}_{D,1}) \quad (26)$$

Abb. 11 zeigt eine Schreiberregistrierung mit Wassereinspritzung bei konstantem Dampf.

In Abb. 12 ist die gemessene Differenzabsorption als Funktion der flächenbe-

x) Die Verfasser danken Herrn Dr.-Ing. D. Wurz, ITS, für diesen Vorschlag.

zogenen Wassermasse \bar{w} nach Gl.(11) aufgetragen. Die Werte stammen von verschiedenen Versuchen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen. Die Meßpunkte lassen einen exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Quotient der Differenzabsorption und dem bezogenen Wassermassenanteil erkennen.

Die zweite Versuchsserie bestand aus Versuchen mit instationärem Übergang Luft-Dampf in der Meßstrecke. Hierbei strömte zunächst Luft mit $c = 2,5$ m/s durch die Strecke. Durch Umsteuern der entsprechenden Ventile wurde eine Dampfströmung mit einem Massenstrom $\dot{m}_D = 1150$ kg/h und einer Strömungsgeschwindigkeit von 50 m/s eingestellt. Der Übergang erfolgte in etwa 60 sec. Abb. 13 zeigt eine Schreiberregistrierung für den Übergang Luft-Dampf.

Für einen der instationären Übergänge Luft-Dampf in der Meßstrecke wurde mit den Gl.(13) und (14) der zeitliche Verlauf der Partialdrücke, Abb. 14 und mit den Gl.(16) und (17) der Verlauf der Massenströme für Dampf und Luft berechnet, Abb. 15. Dazu werden als zusätzliche Meßgrößen zur Infrarotabsorptionsmessung der Gesamtdruck, die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit benötigt. Sie wurden aus Meßwerten der an der Versuchsstrecke vorhandenen Instrumentierung und Zuhilfenahme thermodynamischer Beziehungen ermittelt.

Zur Messung der Geschwindigkeit der flüssigen Phase wurden die Ausgangssignale zweier Strahlengänge auf Magnetband aufgespielt und mit einem Fourieranalysatorsystem des IRE ausgewertet. Abb. 16 zeigt ein Oszillogramm der Zeitfunktion der beiden Strahlengänge. Die Laufzeit der flüssigen Phase ergibt sich über das erste Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion, Abb. 17.

Der Vergleich der rechnerisch ermittelten Gasgeschwindigkeit mit der gemessenen Tröpfchengeschwindigkeit ergab, daß beide Werte etwa betragsgleich sind, so daß bei den vorliegenden Versuchsbedingungen die Annahme $c_w \cong c_d \cong c_L$ zutrifft.

7. Fehlerbetrachtung

Die Reproduzierbarkeit und die Nullpunkt Konstanz der Infrarotmeßeinrichtung ist besser $\pm 1,0$ %, s. Abb. 12 und 13. Damit ist eine entsprechend genaue Bestimmung der Dampfdichte und des Wasserdampfpartialdrucks möglich, wobei angenommen wird, daß im betrachteten Druck- und Temperaturbereich die Extinktionswerte der betreffenden Wasserdampfabsorptionsbande konstant sind und der Gültigkeitsbereich der Zustandsgleichung sichergestellt ist. In diese

Auswertung gehen noch die Genauigkeiten der Gesamtdruck- und Temperaturmessung ein, die ebenfalls unter Laborbedingungen $\pm 1,0\%$ betragen.

In die Ermittlung des Flüssigwasseranteils gehen folgende zusätzliche Unsicherheiten ein:

- Messung des Dampfmassenstroms über die Kondensatmenge durch Rotameter
- Einspritzwassermenge, ebenfalls über Rotameter
- Temperatur- und Druckmessung in der Zweiphasenströmung.

Die Bestimmung des Dampfmassenstroms wies bei den Auswertungen die größte Unsicherheit auf. Der Wasserstand im Kondensator wird über eine Kondensatpumpe gehalten. Meist traten jedoch gewisse Regelschwingungen auf, wodurch der durch die Pumpe geförderte Kondensatmassenstrom auch bei stationären Strömungszuständen zwischen zwei Extremwerten schwankte.

Nach einer Wassereinspritzung sollten sich Wasserdampf und Tropfen nach einer gewissen Übergangszeit (Kondensation oder Verdampfen) im thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Die Temperatur- und Druckmeßwerte in der Zweiphasenströmung sollten dabei den Sättigungswerten entsprechen. Dies war bei allen Versuchen der Fall [8], so daß mit der hier beschriebenen Meßausrüstung Temperaturen und Gesamtdrucke in der Zweiphasenströmung auf etwa $\pm 1\%$ genau erfaßt werden. Es konnte nicht eingehend untersucht werden, ob sich ein Flüssigkeitsfilm an der Rohrwand ausbildet. Dadurch und durch die oben erwähnten Unsicherheiten bei der Dampfmassenstrombestimmung ist die Meßunsicherheit bei der Bestimmung der flächenbezogenen Wassermasse \bar{w} ca. $\pm 5\%$. In diesem Bereich liegt auch die Meßgenauigkeit der ermittelten Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase, so daß sich für den Wassermassenstrom eine Fehlerabweichung von ca. $\pm 10\%$ ergibt.

8. Formelzeichen

A	Fläche, Querschnitt
a	Abstand der Meßebenen
c	Strömungsgeschwindigkeit
C _{sca}	Streuquerschnitt
I	Intensität
K, \bar{x} Konst.	Eich-, Apparatekonstante
l	Extinktions-, Meßlänge
N	Tropfenzahl / Volumeneinheit
\dot{m}	Massenstrom
p	Druck, Partialdruck
Q _{ext}	Extinktionswirkungsquerschnitt
Q _{sca}	Streuwirkungsquerschnitt
Q _{abs}	Absorptionswirkungsquerschnitt
r	Tropfenradius
R	Gaskonstante
t	Zeit
T	Temperatur
u	Zeitfunktion
\bar{w}	flächenbezogene Wassermasse
x	Dampfgehalt
y	Wassergehalt
α	Streuparameter
ϵ	Extinktionskoeffizient
λ	Lichtwellenlänge
ρ	Dichte
τ	Laufzeit

9. Literatur

- [1] K.D.Appelt, J.Kadlec, E.Wolf:
Untersuchungen am Druckabbausystem des Reaktors Marviken
Energie 26 (1974) Nr. 5, S.179-180
- [2] D.Barschdorff:
Kurzzeitfeuchtemessung und ihre Anwendung bei Kondensations-
erscheinungen in Lavaldüsen
Diss. Universität Karlsruhe (1967)
- [3] D.Barschdorff:
Infrarot-Feuchtemeßgerät zur Messung der Feuchtigkeit in
Gasen msr 12 ap (1969) H. 8, S.119-122
- [4] M.Greenberg:
An Infrared Instrument for the Quality of Steam
in: A. Wexler and R.E. Ruskin: Humidity and Moisture,
Vol. 1 New York (1965) Reinhold Publishing Corp.
- [5] M.Kerker:
The Scattering of Light and other electromagnetic Radiation
Academic Press, New York 1969
- [6] F.Mesch, H.-H.Daucher, R.Fritsche:
Geschwindigkeitsmessung mit Korrelationsverfahren
Meßtechnik 79 (1971) S.152-157 und 163-168
- [7] F.Mesch, H.Kippahn:
Solids flow measurement by correlation methods
Opto-electronics 4 (1972) S.451-462
- [8] D.Barschdorff:
Infrarot-Absorptionsmeßeinrichtung zur Bestimmung der Einzel-
komponenten einer instationären Luft/H₂O-Zweiphasenströmung.
Abschlußbericht:
"Entwicklung und Erprobung einer Dichte-Meßeinrichtung zur Be-
stimmung des Luft-, Dampf- und Flüssigwasseranteils in einer
H₂O-Naßdampf-Luftströmung sowie Montage und Instrumentierung
der zugehörigen Versuchsstrecke in Zusammenwirken mit dem In-
stitut für Reaktorentwicklung (IRE)", Aug. 1975 (nicht ver-
öffentlicht)

[9] D.Barschdorff, M.Neumann, S.Wiogo:
Auswertung von Infrarotabsorptionsmessungen bei Blowdown-
versuchen am Druckabbausystem des Reaktors Marviken.
KFK 2534 (Oktober 1977)

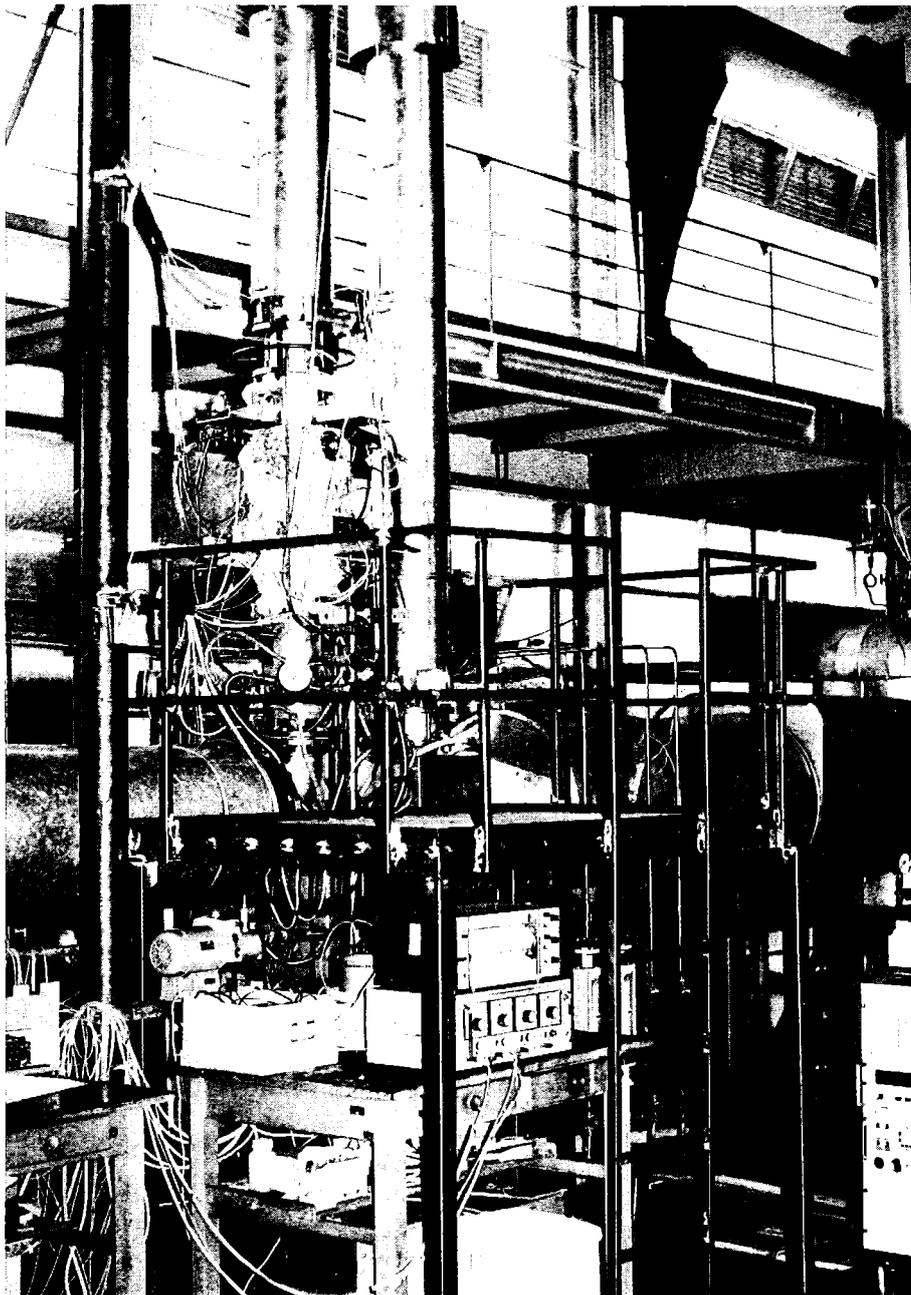


Abb. 1: Versuchsstrecke am Institut für Thermische Strömungsmaschinen.

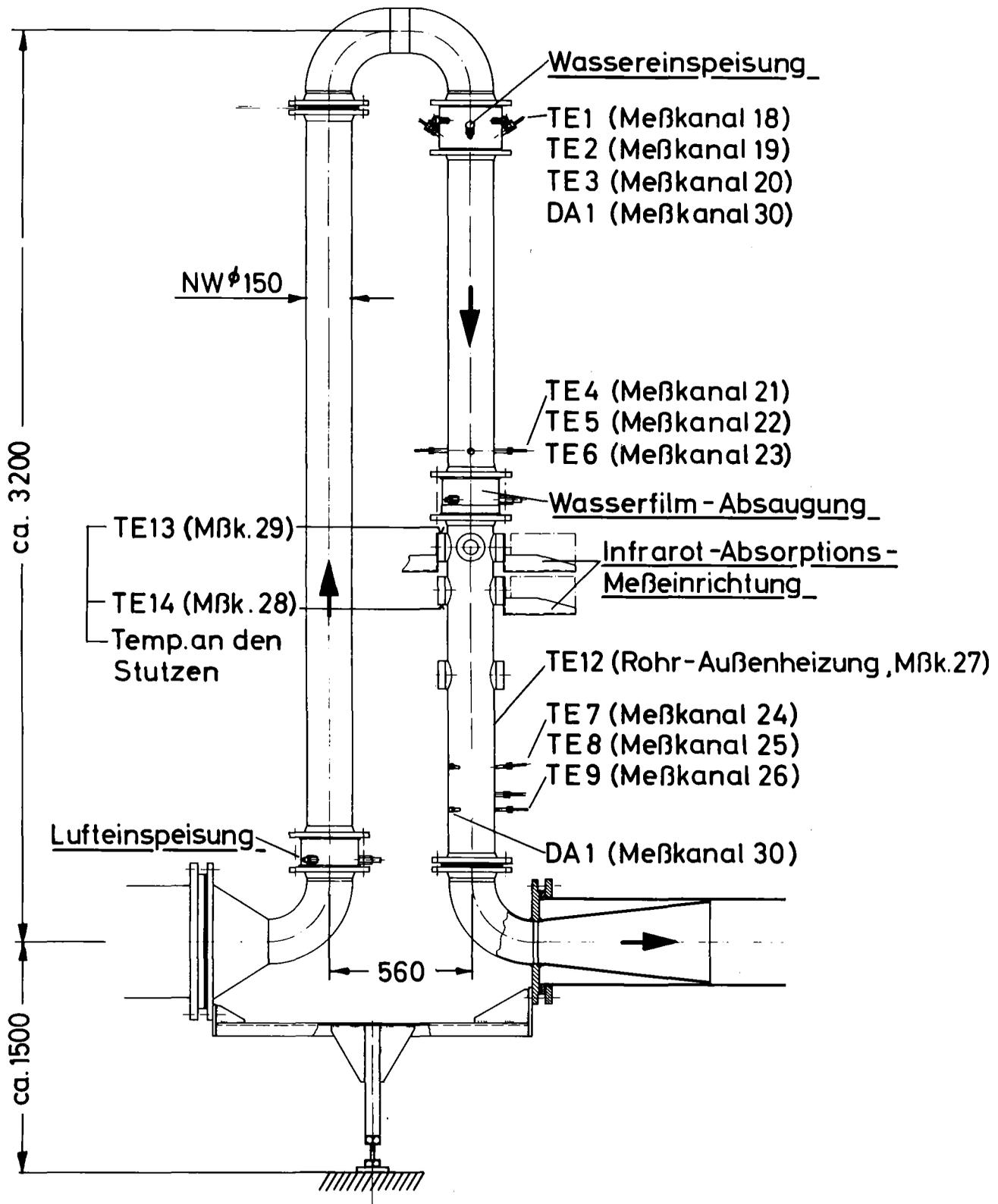


Abb. 2: Schematische Anordnung der Versuchsstrecke mit Instrumentierung

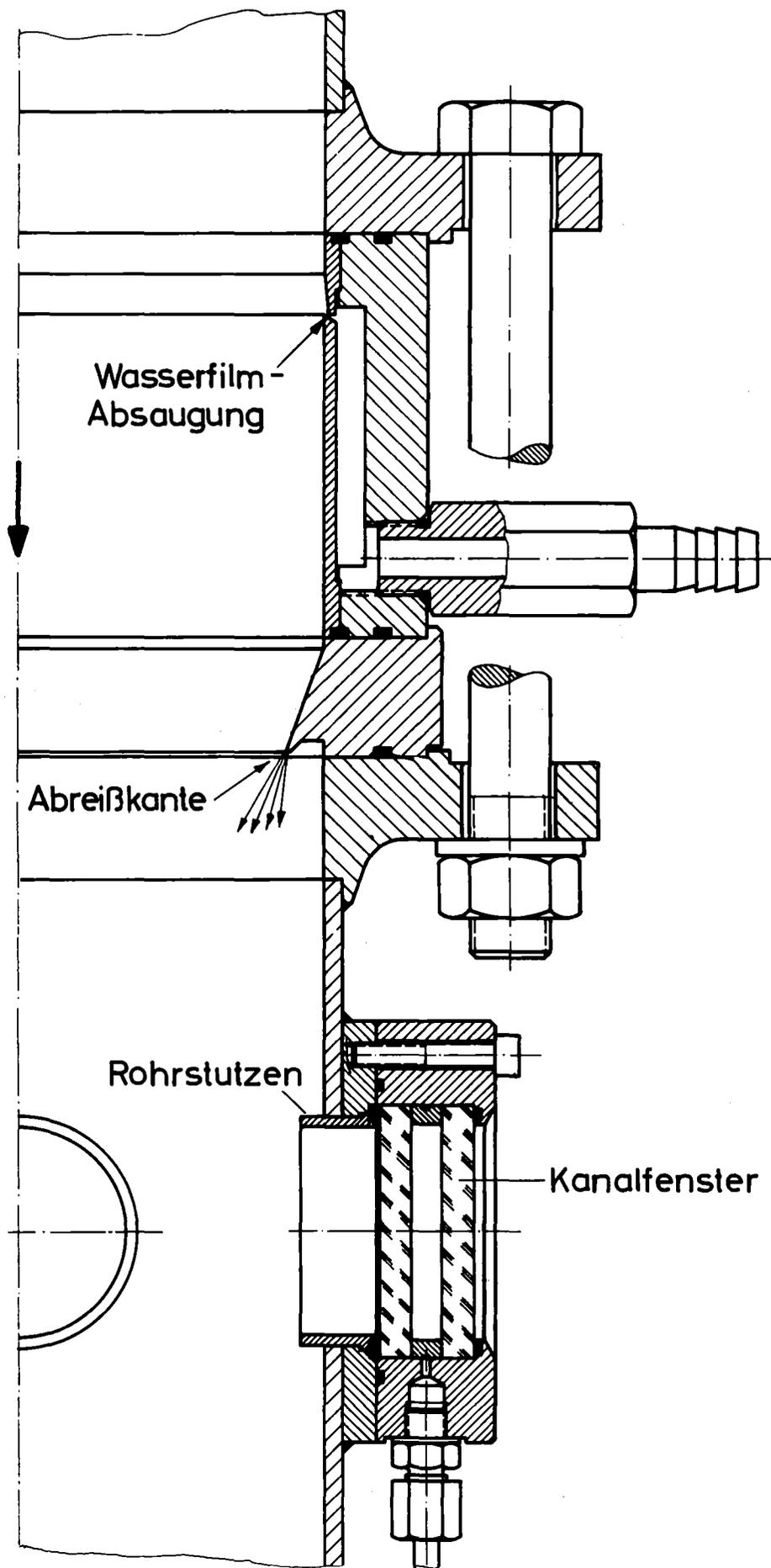


Abb. 3: Wandwasserfilm-Absaugung und Kanalfenster

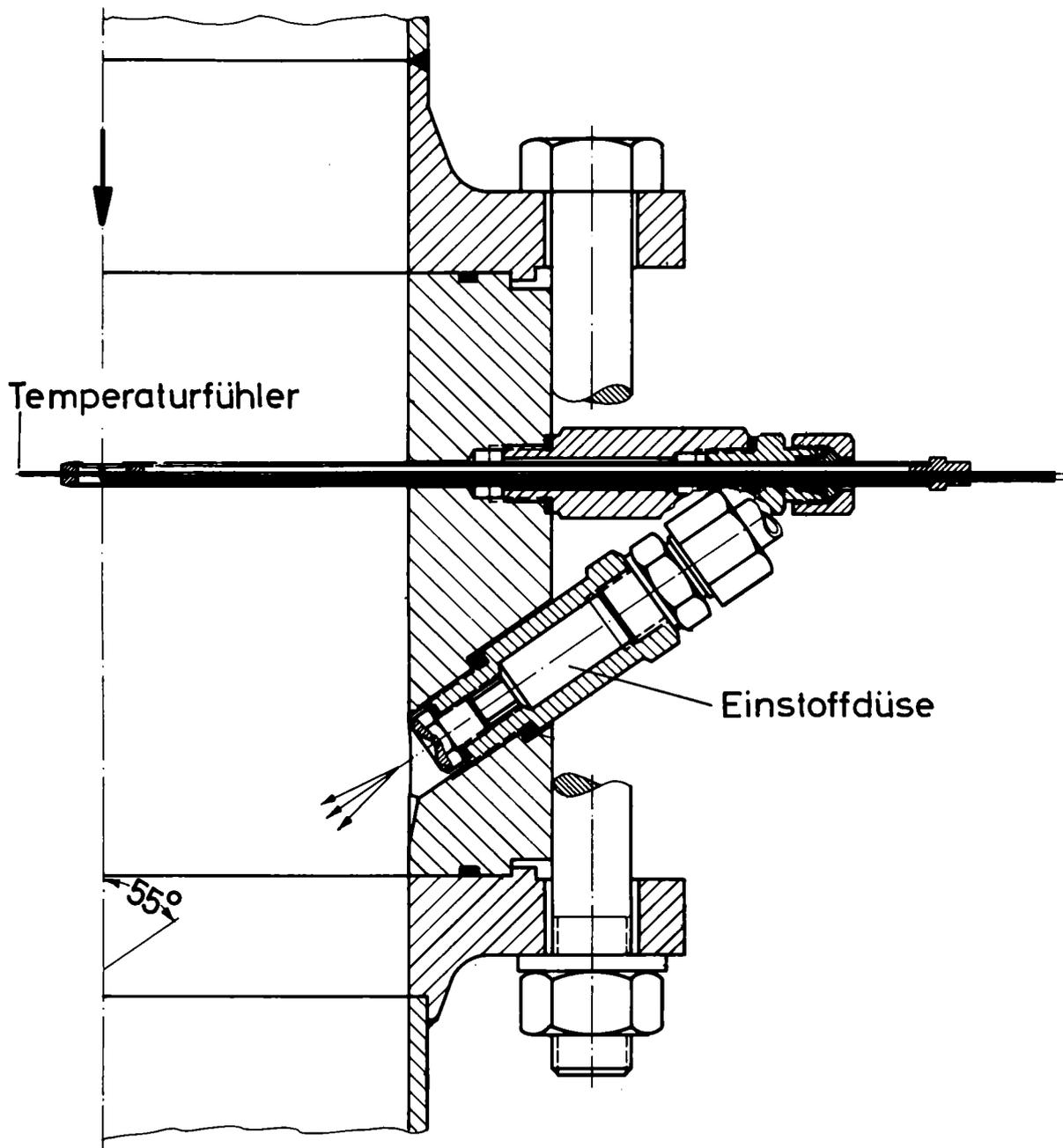


Abb. 4: Wassereinspritzung

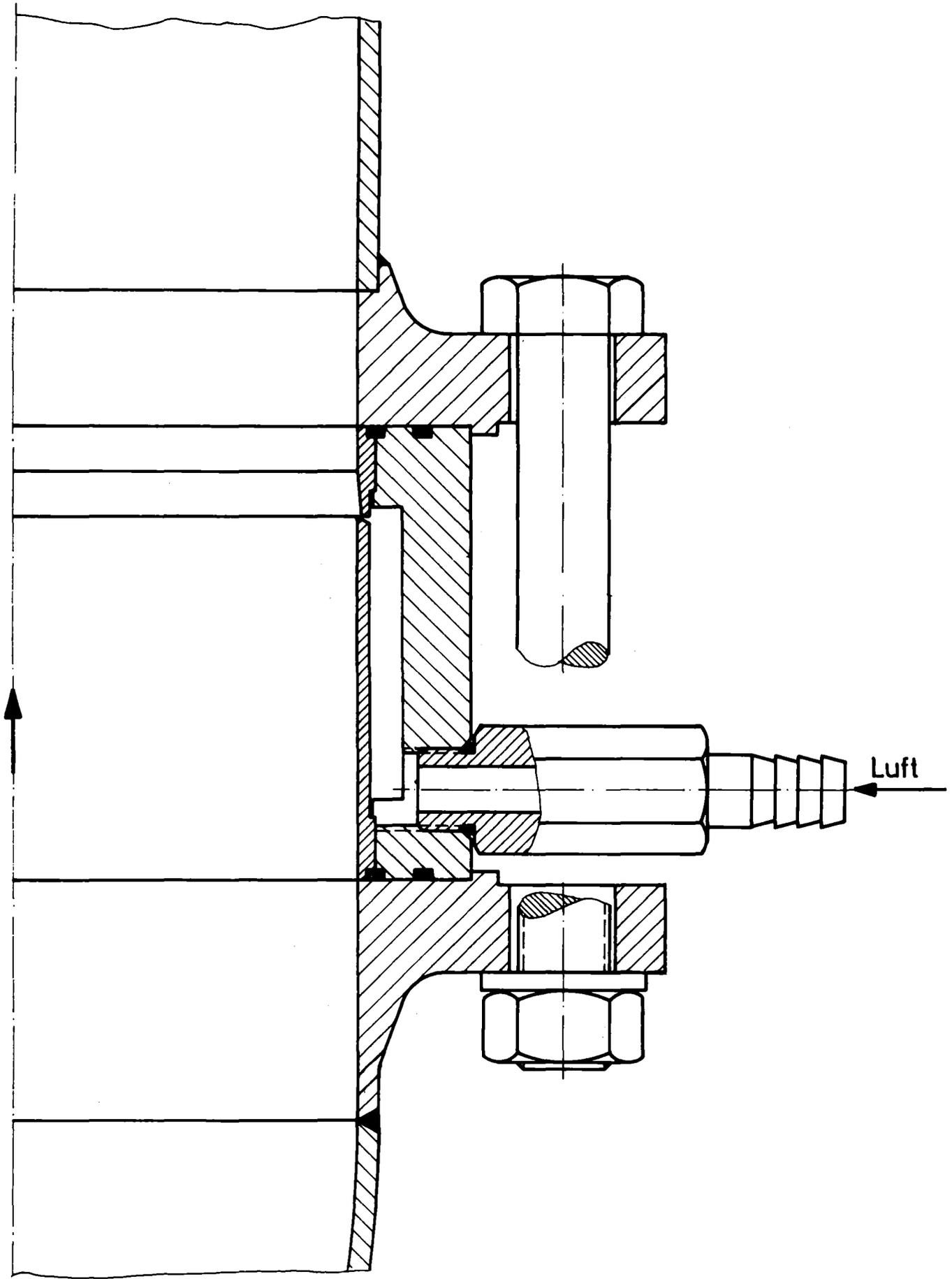
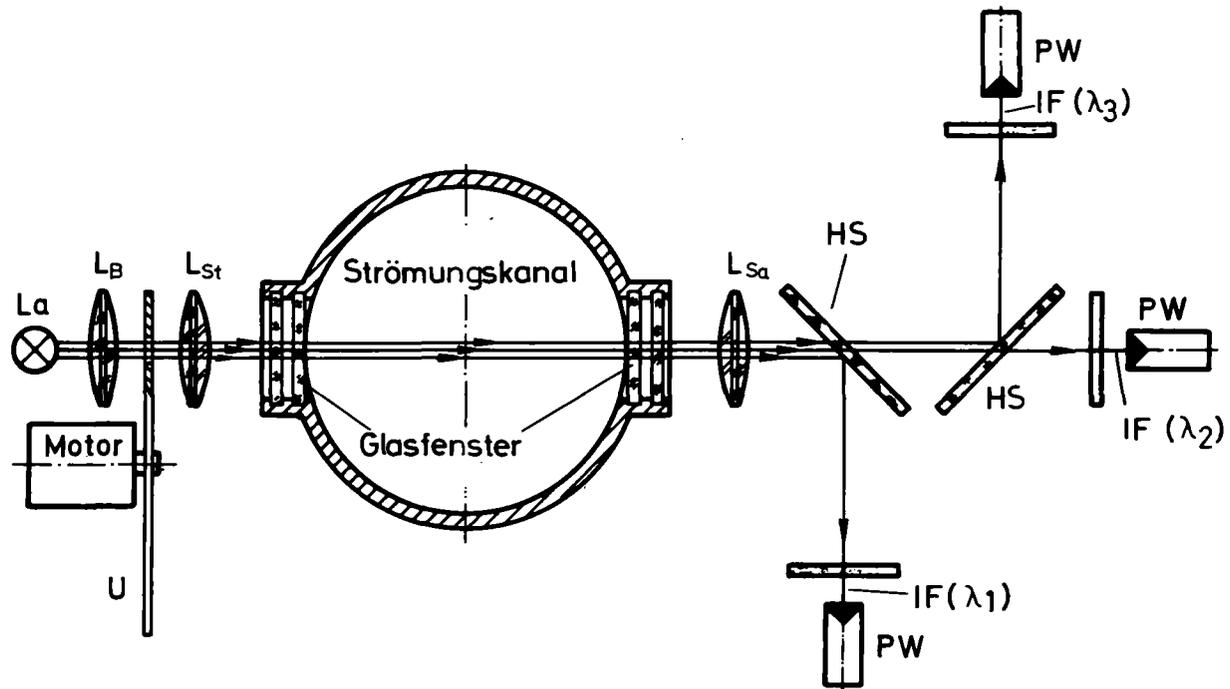


Abb. 5 : Luft - Zumischeinrichtung



L_a : Strahlungsgeber
 L_B : Bikonvex-Linse
 L_{St} : Streulinse
 L_{Sa} : Sammellinse

HS : Halbdurchlässiger Spiegel
 IF : Interferenzfilter
 PW : Photowiderstand

Abb.6 : Optischer Strahlengang (schematisch)



Abb. 7: Infrarot - Empfangsgerät

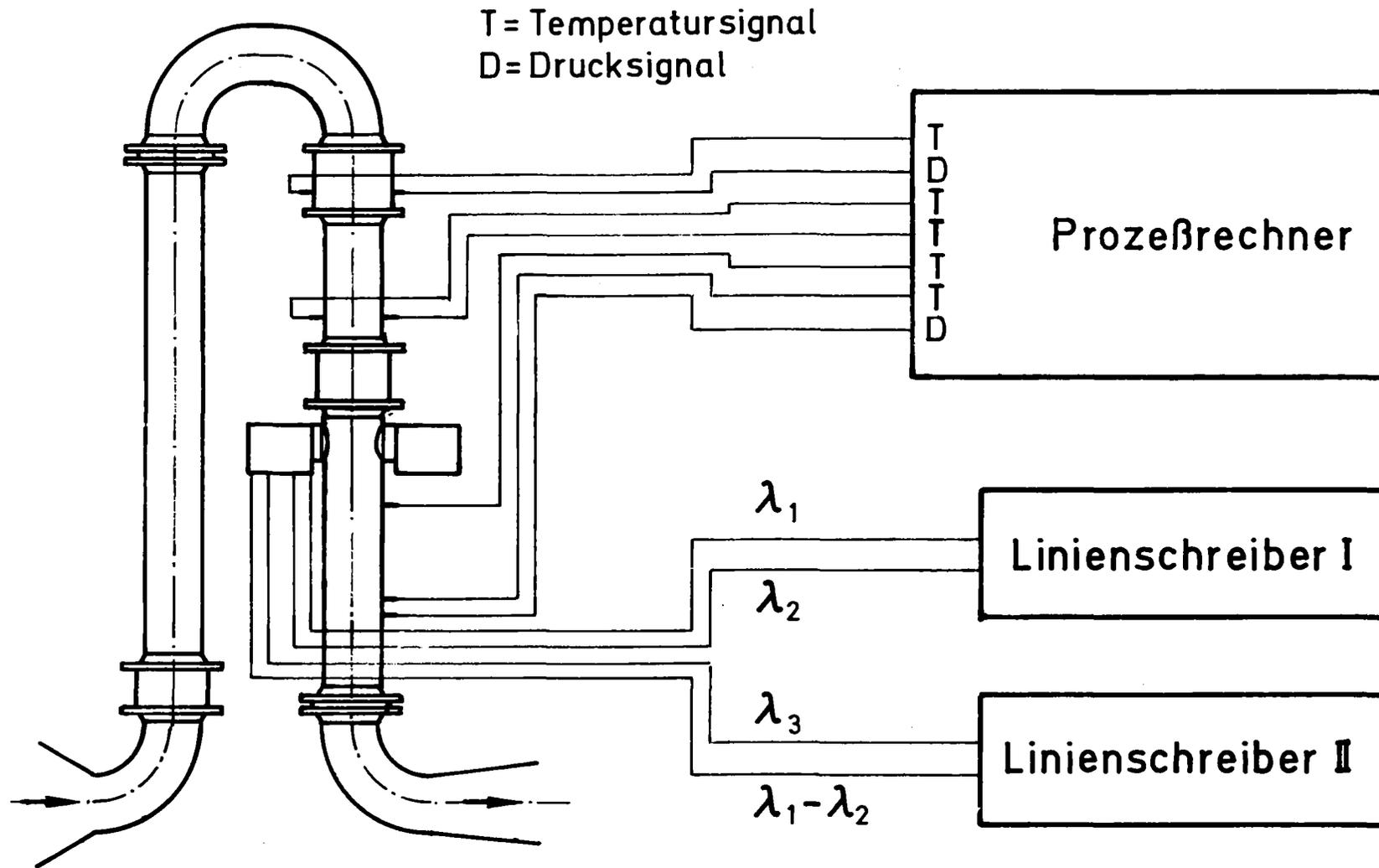
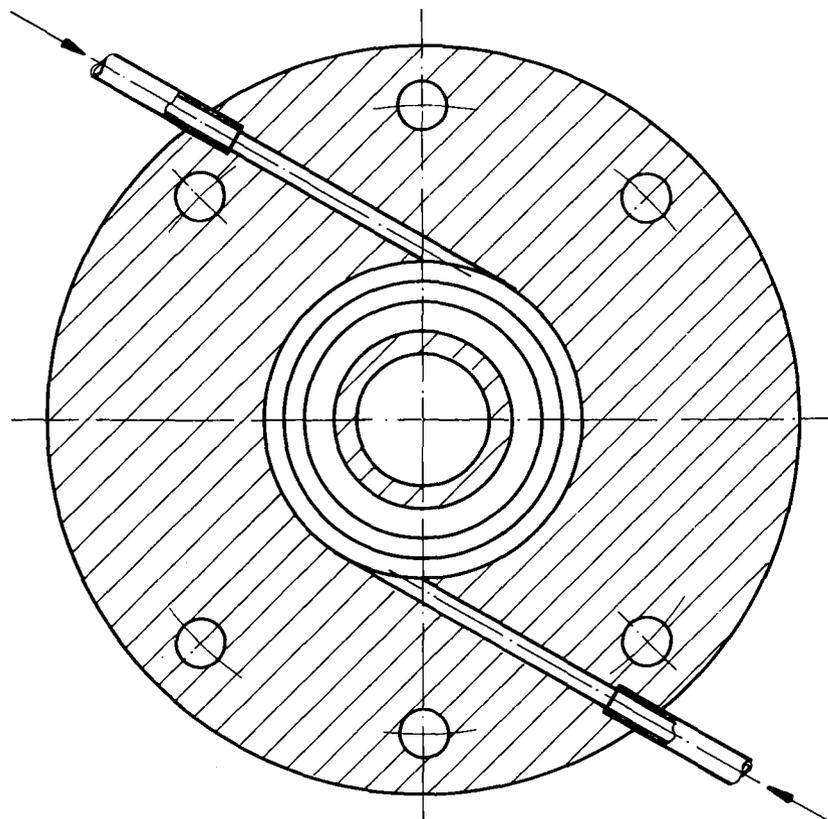


Abb. 8 : Meßwerterfassung an Versuchsstrecke

Warmluft ca. 60° - 120°C



Warmluft ca. 60° - 120°C

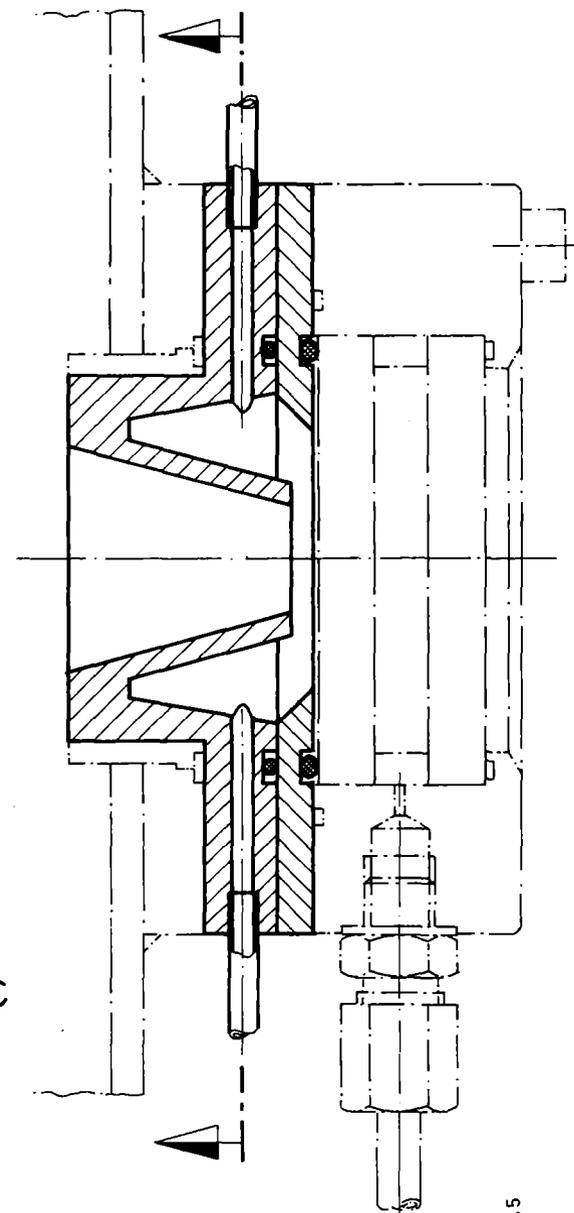


Abb. 9: Wasserabscheider für Kanalfenster (Ausführung I)

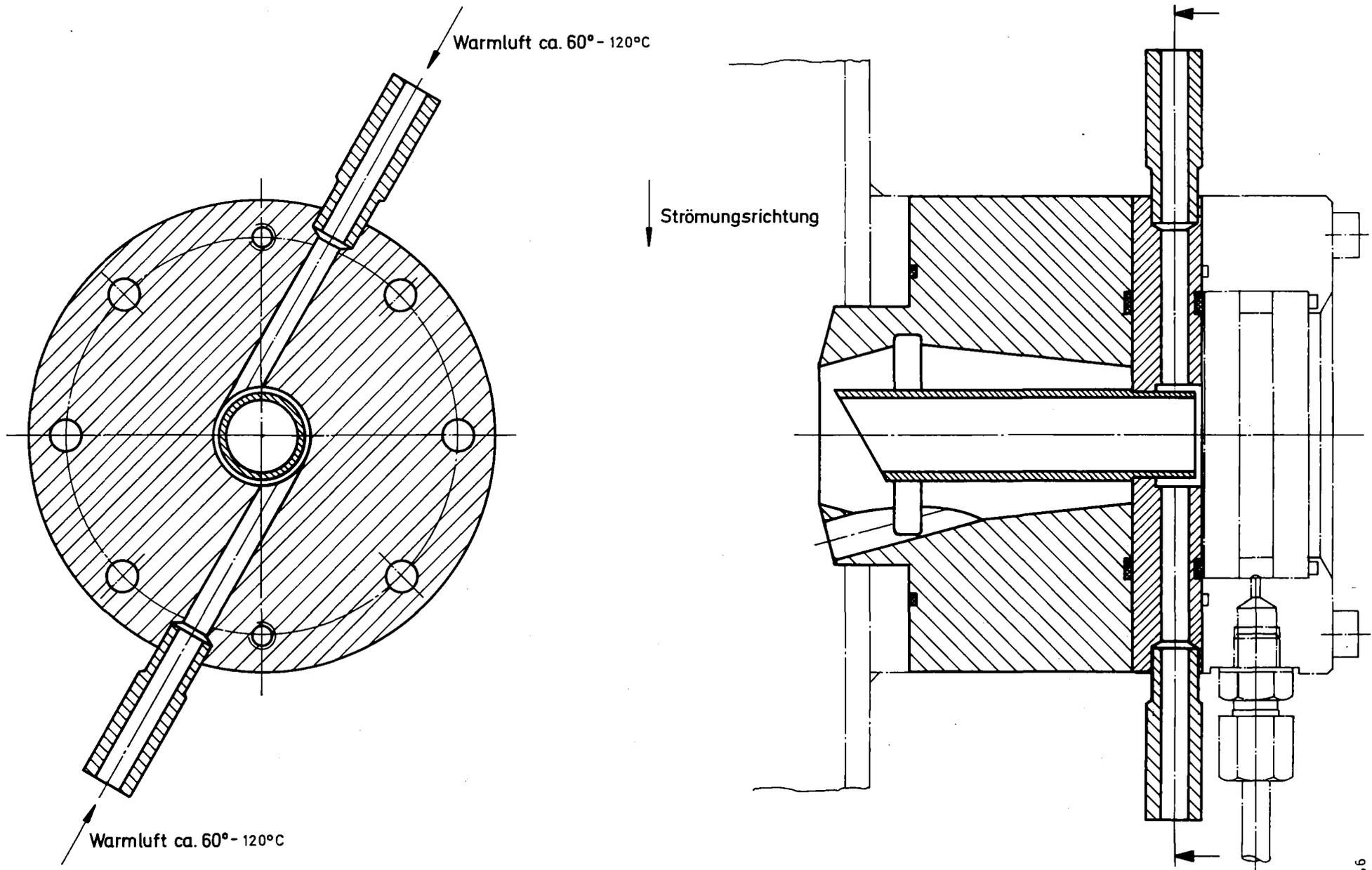


Abb. 10: Wasserabscheider für Kanalfenster (Ausführung II)

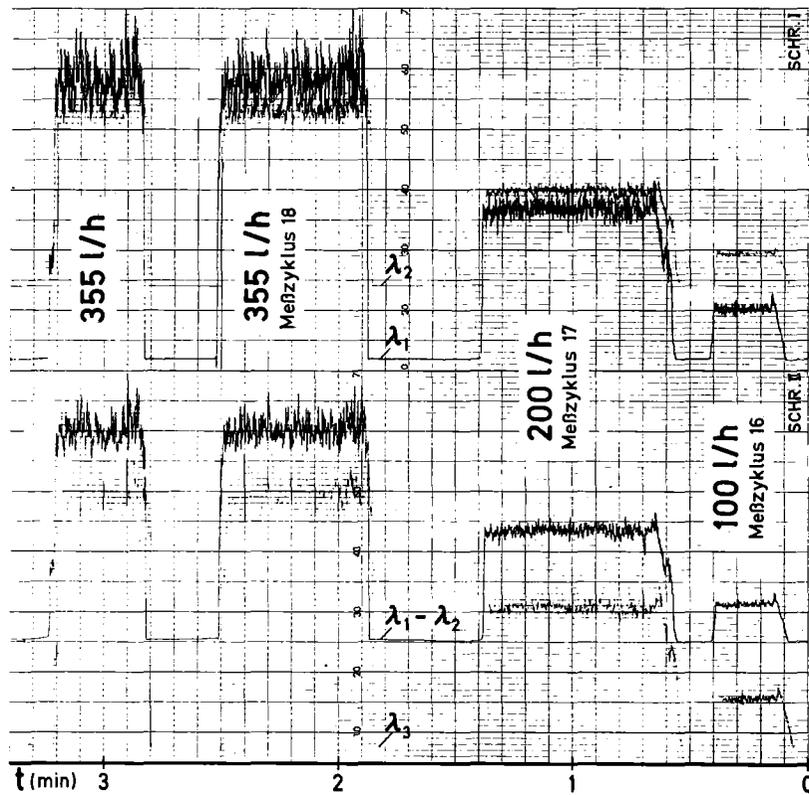


Abb. 11: Infrarotabsorption bei konstantem Dampfmassenstrom und unterschiedlicher Wassereinspritzmenge

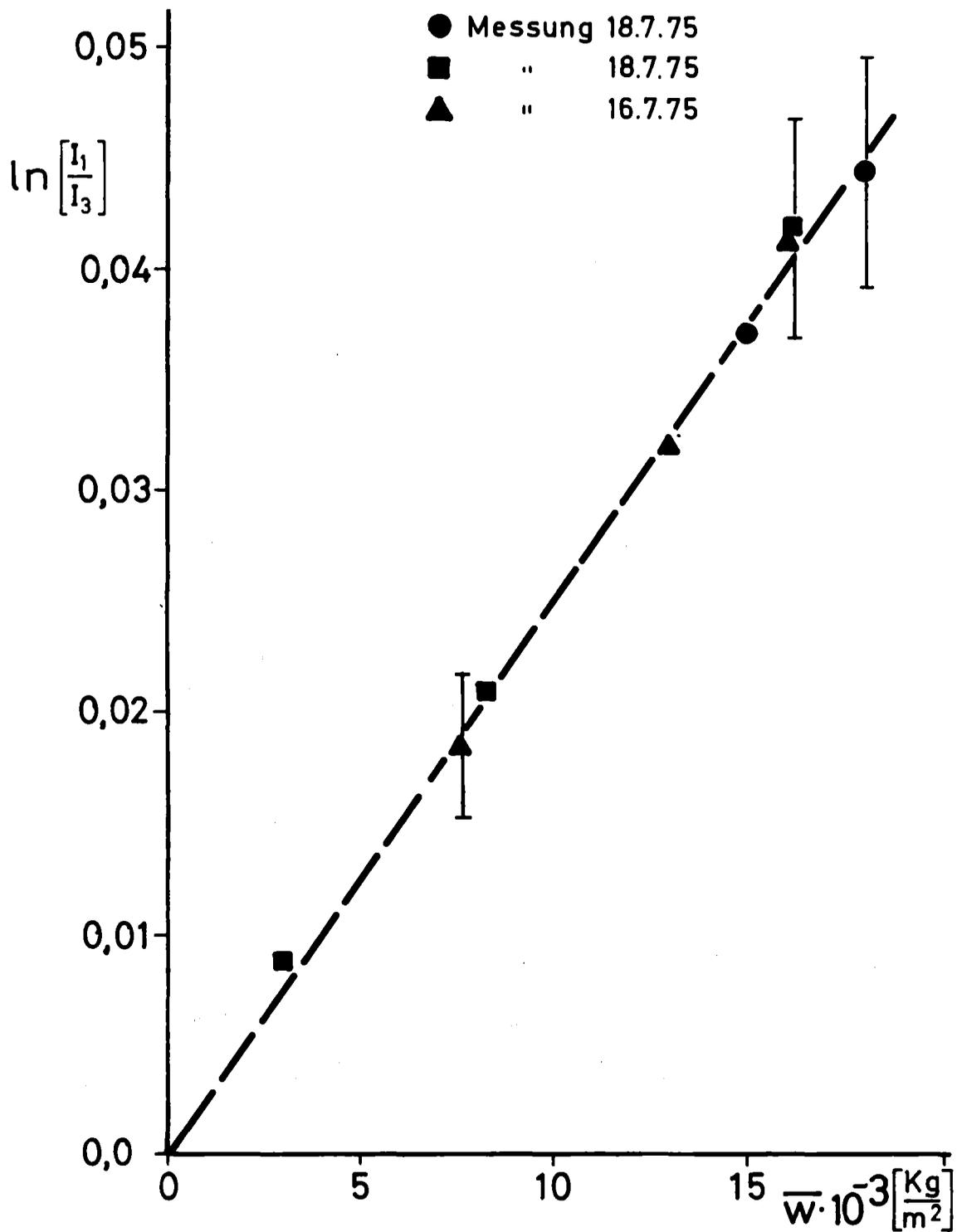


Abb.12: Differenzabsorption als Funktion des Wassermassenstroms $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$

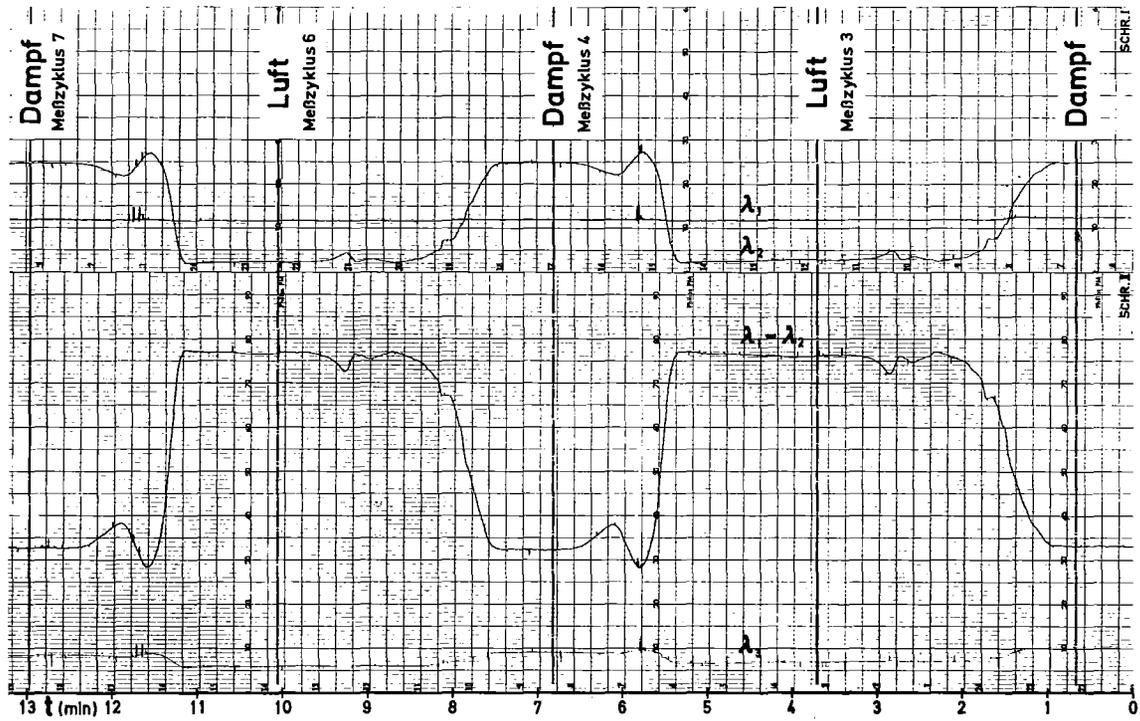


Abb. 13: Instationärer Übergang Luft - Dampf

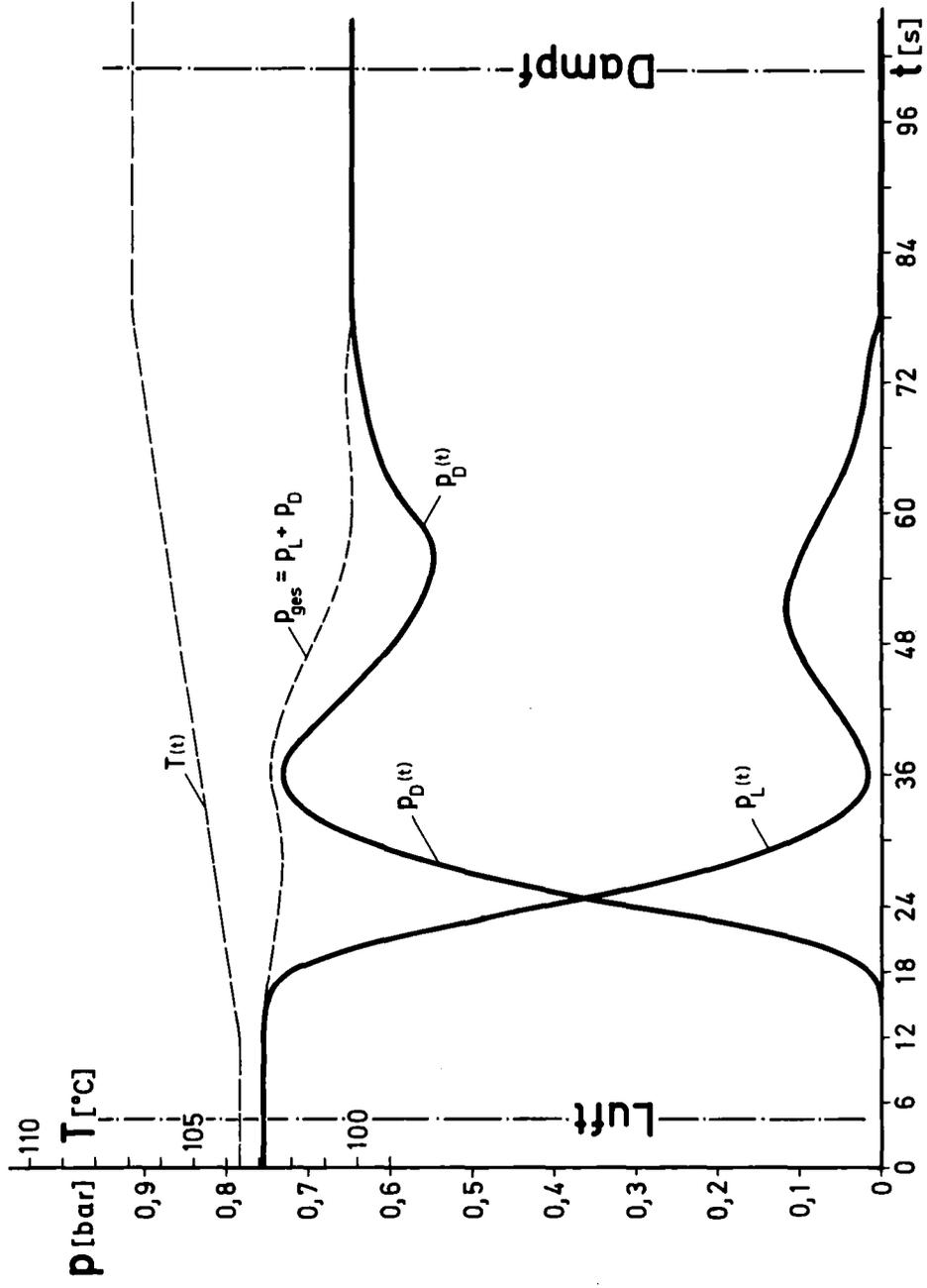


Abb. 14: Partialdrücke bei Übergang Luft - Dampf

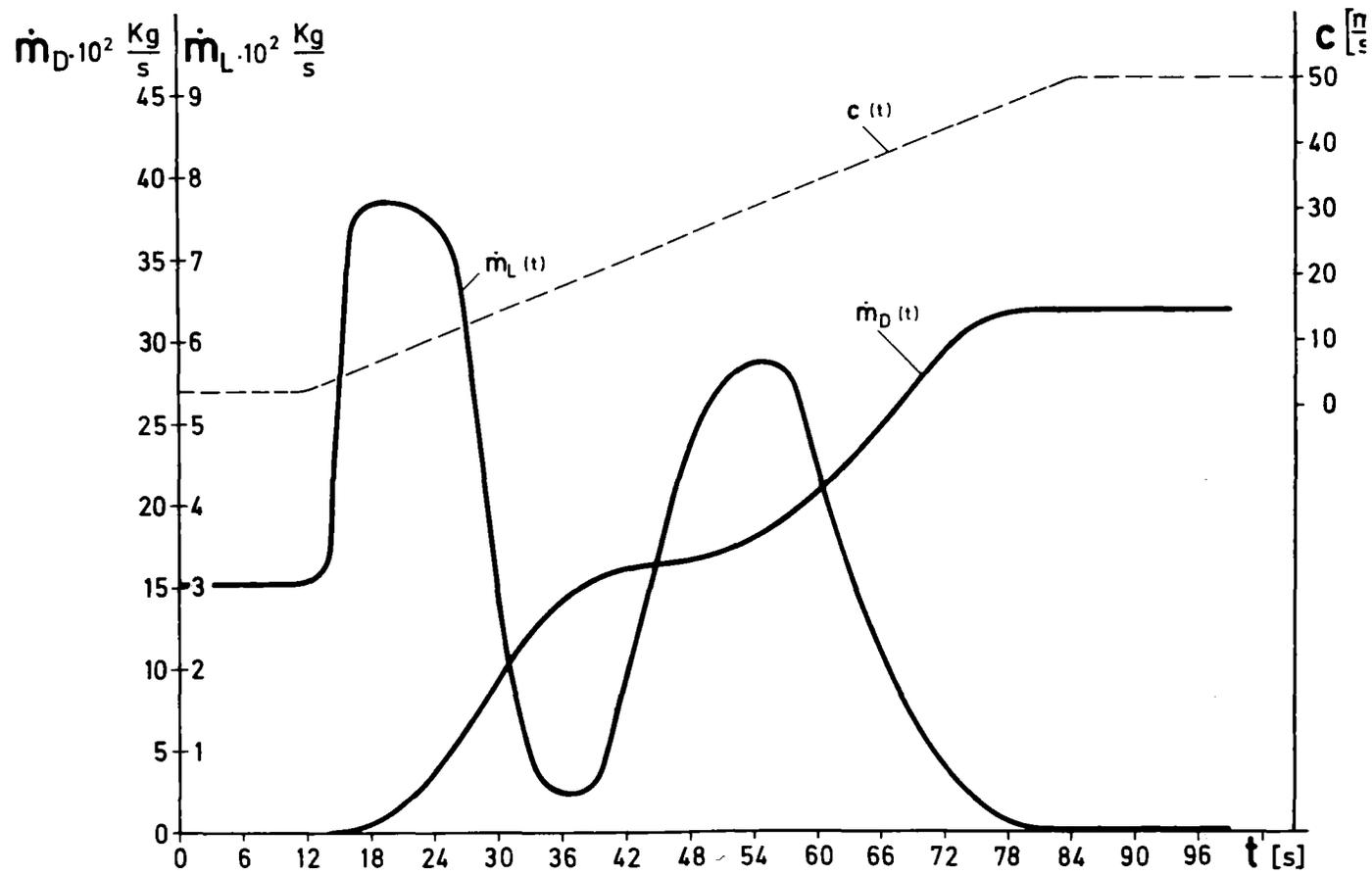


Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der Massenströme \dot{m}_L, \dot{m}_D bei Übergang Luft-Dampf

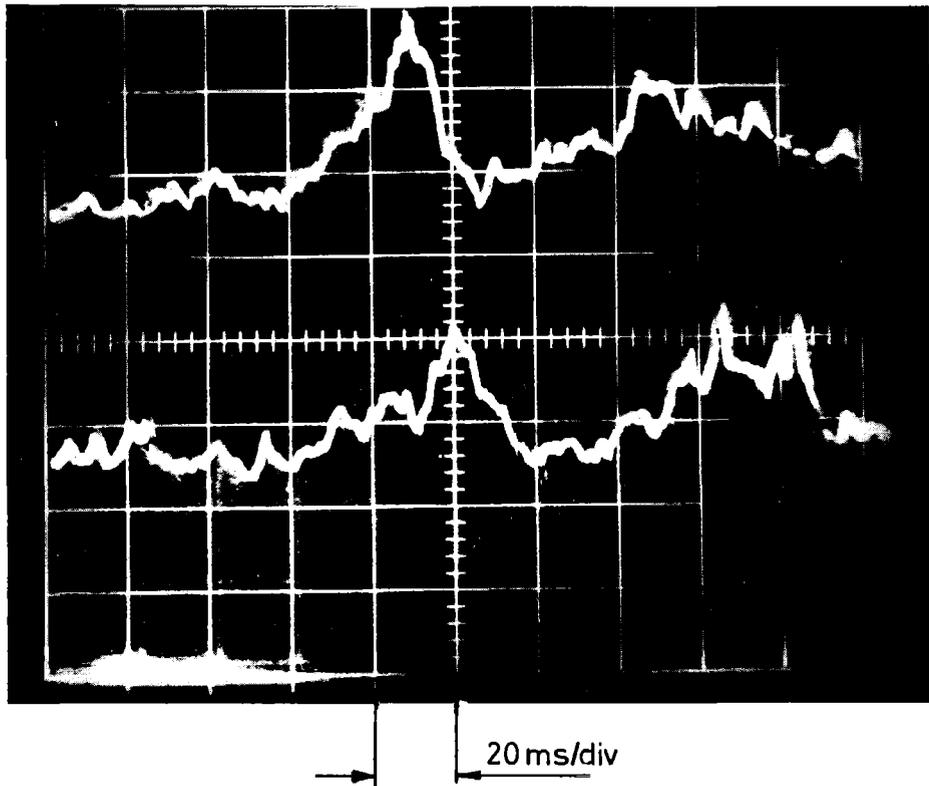


Abb.16: Oszillogramm des Streusignals zweier Strahlengänge

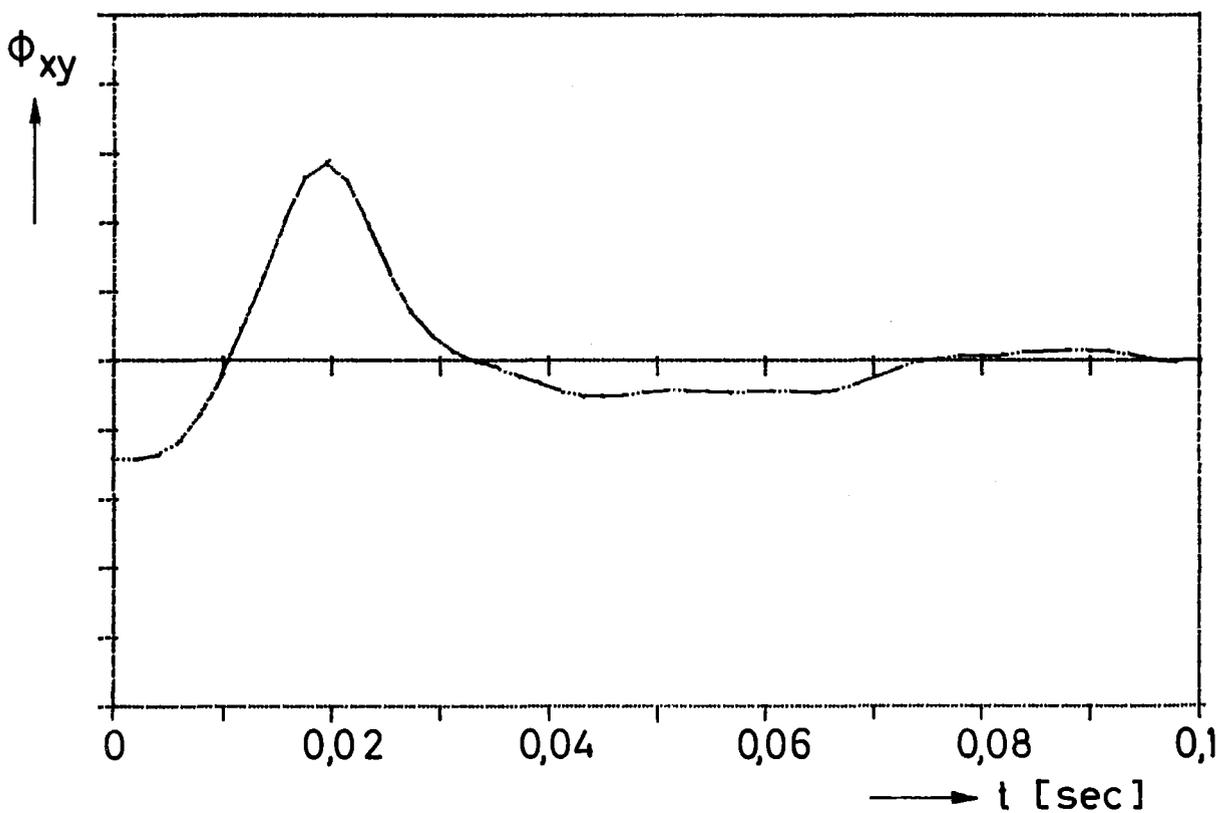


Abb.17: Gerechnete Kreuzkorrelationsfunktion Φ_{xy}