

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

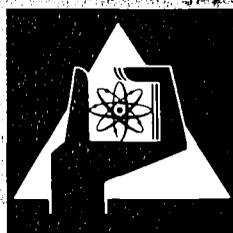
Oktober 1977

KFK 2534

Projekt Nukleare Sicherheit

**Auswertung von Infrarotabsorptionsmessungen
bei Blowdownversuchen am Druckabbausystem
des Reaktors Marviken**

D. Barschdorff, M. Neumann, S. Wiogo
Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2534

Projekt Nukleare Sicherheit

Auswertung von Infrarotabsorptionsmessungen bei
Blowdownversuchen am Druckabbausystem
des Reaktors Marviken

von

D. Barschdorff, M. Neumann, S. Wiogo

Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Übersicht

Das Institut für Thermische Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe (ITS) und das Institut für Reaktorentwicklung der Gesellschaft für Kernforschung (IRE) entwickelten nach einer gemeinsamen Voruntersuchung im Rahmen des Projekts Nukleare Sicherheit eine Infrarotmeßeinrichtung zur Parameterbestimmung an instationären Mehrkomponenten/Zweiphasenströmungen. Sie wurde erstmals bei der Marviken MX II-Blowdownversuchsserie bei Großexperimenten eingesetzt.

In diesem Bericht werden nach einer kurzen Beschreibung der Meßeinrichtung die früher vorgestellte Modellvorstellung weiterentwickelt und die Auswertung der Meßdaten im einzelnen angegeben. Insbesondere werden

- eine neue Absorptionsquotientenmethode zur Bestimmung der mittleren Tropfengröße in einem erweiterten Radienbereich,
- die Meßdatenverarbeitung auf Prozeßrechner und Großrechenanlage sowie
- die Berechnung der instationären Tropfengeschwindigkeit nach der Korrelationsmethode

beschrieben.

Sonderauswertungen -exemplarisch für Blowdown 18 und 20- behandeln

- die Startphase eines Blowdowns;
- den Verlauf der mittleren Tropfengröße in der Zweiphasenströmung;
- zeitweilig auftretende periodische Massenstromschwankungen.

Die Meßdatenauswertung erfolgte zunächst vom Institut für Thermische Strömungsmaschinen, später -nach Übergabe der Auswertelgorithmen- auch durch das Marvikenprojekt.

Die hier beschriebene Meßeinrichtung wurde in der Zwischenzeit an die Bedingungen bei Blowdownversuchen am Heißdampfreaktor (HDR) Großwelzheim angepaßt und weiterentwickelt.

Data Evaluation of Infrared Absorption Measurements at Blowdown Experiments within the Depressurisation System of the Marviken Reactor.

Summary

The Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) of the Universität Karlsruhe and the Institut für Reaktorentwicklung (IRE) of the Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, developed after a joint investigation, sponsored by the Projekt Nukleare Sicherheit an infrared measuring instrumentation for the determination of the parameters of transient two phase/multicomponent flow. It was operated for the first time in large scale experiments at the Marviken MX II-Blowdown series.

After a short description of the instrumentation, in this report the earlier published underlying theoretical model is further developed and the data evaluation is treated in detail.

In particular

- a new absorption quotient method for droplet size determination in an extended radius scope
 - the data evaluation on mini computer and at the computer center of the University
 - the computation of the transient droplet velocity using correlation techniques
- are treated.

As an example, shown for Blowdowns 18 and 20 respectively,

- the starting phase of a Blowdown
 - the mean droplet radius in the two phase flow
 - periodical mass flow fluctuations during certain phases of the Blowdown
- are analysed.

The evaluation of the measured data first was provided by the Institut für Thermische Strömungsmaschinen and later - after passing over the evaluation algorithms - also by the Marviken Project.

In the meantime, the infrared instrumentation has been modified to meet the requirements for Blowdown experiments at the Heißdampfreaktor (HDR), Großwelzheim.

Evaluation des Dates de Mesure d'Absorption a l'Infrarouge lors des Experiences des Blowdown au Systeme de Dépression du Reacteur Marviken.

Résumé

L'Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) de l'Université de Karlsruhe et l'Institut für Reaktorentwicklung (IRE) de la Gesellschaft für Kernforschung de Karlsruhe ont développé après une recherche préparatoire commune dans le cadre du Projekt Nukleare Sicherheit - un appareil de mesure à l'infrarouge pour la détermination des paramètres des fluides non-stationnaires biphasés à plusieurs composantes. Il a été employé premièrement lors d'une série expérimentale des Blowdowns MX II à Marviken à des expériences étendus.

Après une courte explication des appareils de mesure l'idée de maquette qui a déjà été publiée, sera perfectionnée dans ce rapport et le traitement des dates de mesure sera expliquée en détail.

Spécialement seront expliqués

- une nouvelle méthode utilisant le quotient d'absorption pour déterminer le diamètre moyen des gouttes dans un intervalle de rayons plus étendu
- le traitement des dates de mesure sur un mini calculateur et sur le centre de calcul de l'Université
- le calcul de la vitesse non-stationnaire des gouttes selon la méthode de corrélation.

Des calculs spéciaux -exemplaires pour les Blowdowns 18 et 20- traitent

- la phase de départ d'un Blowdown
- le cours du diamètre moyen des gouttes dans la fluide biphasée
- les variations temporaires du débit de la masse.

L'utilisation des dates de mesure était effectuée d'abord par l'Institut für Thermische Strömungsmaschinen et plus tard -après avoir remis les algorithmes d'évaluation- par le Project de Marviken.

Entretemps l'appareil de mesure décrit dans ce rapport a été perfectionnée et ajustée aux conditions existents pendant des expériences des Blowdowns au Heißdampfreaktor (HDR) à Großwelzheim.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	5
2. Modellvorstellung	6
2.1 Dampfdichtebestimmung	8
2.2 Wasserkonzentration im Meßvolumen	10
2.3 Absorptionsquotientenmethode zur Tropfengrößenbestimmung	11
2.4 Wasserkonzentrationsbestimmung nach dem Schichtdickenmodell	15
3. Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase	16
4. Abgeleitete Kenngrößen	22
5. Marviken Instrumentierung	24
5.1 Beschreibung der Infrarot (IR)-Meßeinrichtung	24
5.2 Optik	26
5.3 Elektronische Signalverarbeitung	27
5.4 Modifikationen während der Versuchsserie	28
6. Beschreibung der Versuchsauswertung	29
6.1 Datenregistrierung	29
6.2 Auswertung der Blowdownversuche	29
7. Ergänzende Auswertungen	31
7.1 Startphase des Blowdown 18	33
7.2 Mittlere Tropfengröße	37
7.2.1 Bestimmung des mittleren Tropfenradius und der Tropfenzahl nach der Absorptionsquotientenmethode (Tropfenmodell)	38
7.2.2 Bestimmung der Wasserkonzentration nach dem Tropfenmodell und Vergleich mit der Wasserkonzentrationsbestimmung nach dem Schichtdickenmodell	39
7.3 Massenstromoszillationen	43
7.3.1 Geschwindigkeitsschwankungen	43
7.3.2 Dampfdichte, Wasserkonzentration und abgeleitete Größen	43
8. Zusammenfassung	50
9. Formelzeichen	51
10. Literatur	52
11. Anhang	54
11.1 Fehleranalyse	54
11.2 Einfluß der unterschiedlichen Extinktion durch die Wassertröpfchen	57

1. Einleitung

Bei der zweiten Serie der Marviken Blowdownversuche (Marviken MX-II Experimente) wird erstmalig die Infrarotmeßtechnik [1,2] eingesetzt. Sie liefert Informationen über den zeitlichen Verlauf der Luft-, Dampf- und Wasserkonzentrationen, der Geschwindigkeit der flüssigen Phase und der entsprechenden Massenströme in einem der vier Überströmkanäle, die das Containment mit der Verteilerkammer für die Kondensationsrohre (vent header) des Druckabbausystems verbindet, Bild 1. Die speziell hierfür entwickelte Meßapparatur wird an anderer Stelle beschrieben [3].

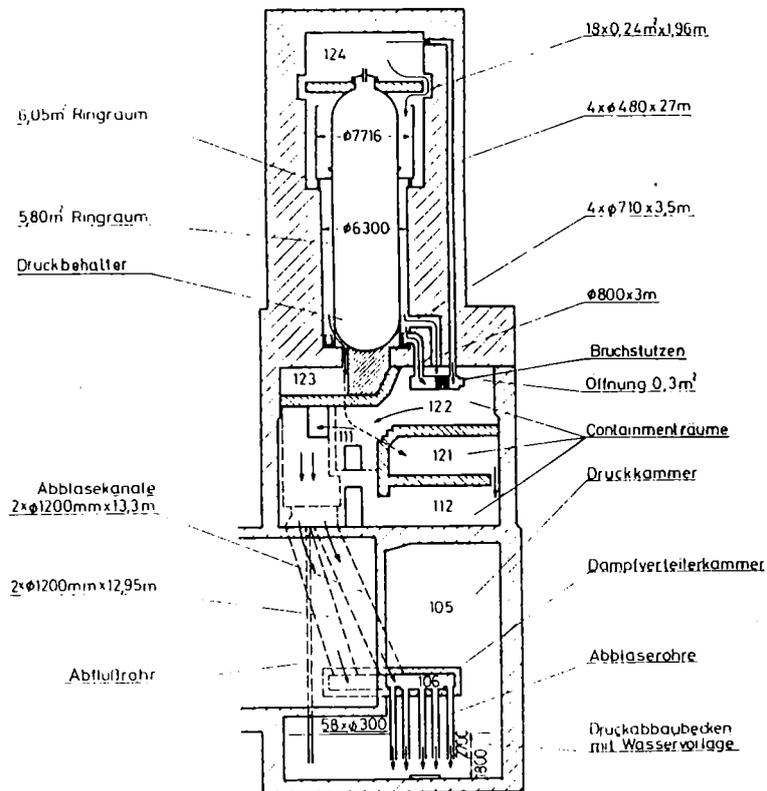


Bild 1: Sicherheitscontainment des Marviken-Reaktors

Das Ziel der Blowdownversuche ist es, die dynamischen Beanspruchungen der verschiedenen Reaktorstrukturen bei einem Kühlmittelverlustunfall in einem Großexperiment zu untersuchen.

Zum Druck eingereicht im Januar 1977

Je nach Lage der simulierten Bruchstelle strömt Dampf oder Wasser, das bei der plötzlichen Druckentlastung ebenfalls zunächst verdampft, in das Reaktorcontainment. Sowohl im Innern des Reaktordruckbehälters als auch im Containment bilden sich instationäre Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen mit Luft als zusätzlicher Komponente (Containment) aus.

Bei der meßtechnischen Bestimmung der Parameter dieser Zweiphasenströmungen ergeben sich von der Strömungsform her zwei Aufgabenstellungen:

- Im Innern des Reaktordruckbehälters mit seinen Einbauten und im Bruchstutzen können kurzzeitig sämtliche Strömungsformen der Zweiphasenströmung von einphasig-Wasser bis einphasig-Dampf auftreten.
- Bei dem Ausströmen in das Containment wird Wasser oder Dampf plötzlich entspannt und in Überströmöffnungen mehrfach umgelenkt. Ab einer gewissen Entfernung von der eigentlichen Bruchstelle ist hier mit einer Nebelströmung und feinverteilter flüssiger Phase zu rechnen.

Das Infrarotmeßverfahren eignet sich speziell für die Untersuchung der Strömungsvorgänge im Containment, da es in Nebelströmungen die kontinuierliche, getrennte Bestimmung der Dampf-, Luft- und Wasseranteile ermöglicht. Es liefert damit Meßergebnisse -unter anderem den sog. "Wassermitrißfaktor"-, die zur Überprüfung und Verbesserung theoretischer Modellrechnungen dienen können.

Die in |1,2| beschriebene Modellvorstellung wird hier zunächst weiterentwickelt, die Infrarot (IR)-Meßeinrichtung und die Auswertung der Marviken-Blowdownversuche beschrieben und eine Fehlerrechnung ausgeführt.

2. Modellvorstellung

Wir betrachten die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Luft- oder Dampf molekülen und feinverteilten Wassertröpfchen in einer Mehrkomponenten-Zweiphasennebelströmung

und führen dazu nach Bild 2 eine Transmissionsmessung durch.

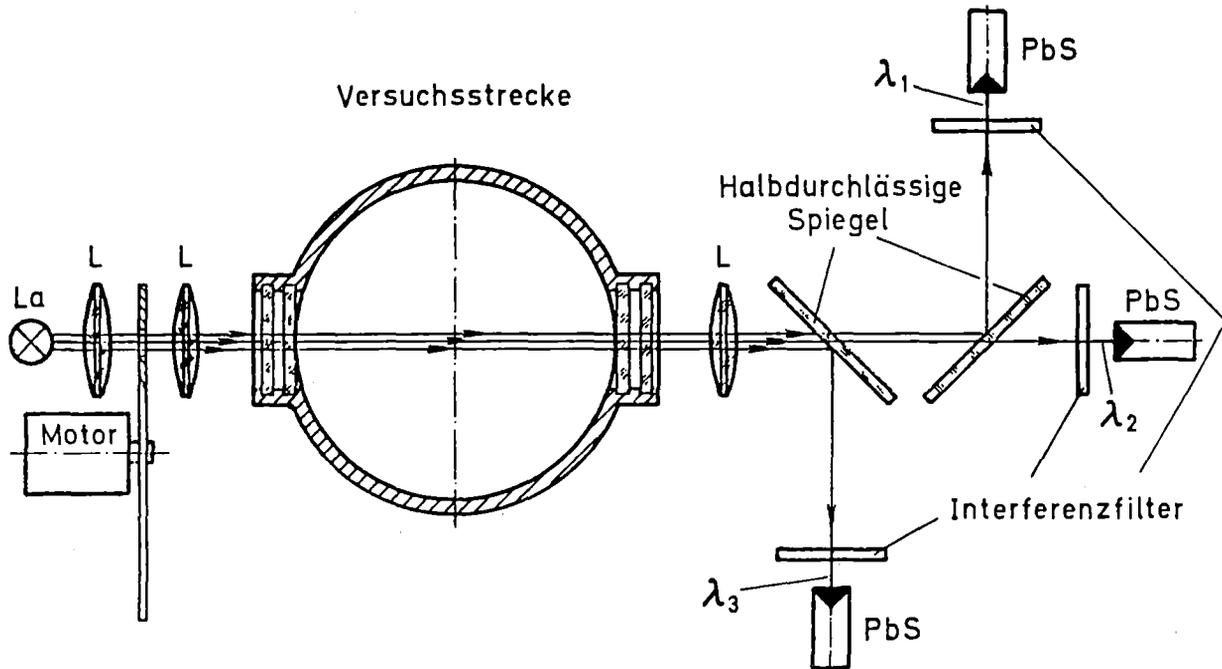


Bild 2: Optischer Strahlengang der IR-Meßeinrichtung

Die folgenden Voraussetzungen sollen gelten:

- Luft und Wasserdampf verhalten sich wie perfekte Gase;
- Dampf und Wasser befinden sich im thermodynamischen Gleichgewicht, Dampf- und Lufttemperatur stimmen überein;
- Die flüssige Phase sei gleichmäßig über den Strömungsquerschnitt verteilt;
- Das Wasservolumen wird gegenüber dem Dampfvolmen vernachlässigt;
- Die Flüssigkeitstropfen werden in ihrem Lichtstreuverhalten nicht von benachbarten Teilchen beeinflusst, es tritt keine Vielfachstreuung auf;
- Die Tropfengrößenverteilung sei monodispers;

Das H_2O -Molekül weist im nahen Infrarotbereich zwischen 0,9 und 2,7 μm einige stark ausgeprägte Rotationsschwingungsbanden auf. Die Absorptionsmaxima einer bestimmten Schwingungsform liegen für Dampf und Wasser bei unterschiedlichen Wellenlängen [4]. Das Licht tritt im Meßvolumen der optisch wirksamen Länge 1

mit Z-Tröpfchen vom Radius r sowie mit Dampfmolekülen in Wechselwirkung. Nach Durchsetzen der Meßstrecke werden die Intensitäten bei drei Wellenlängen gemessen.

Diese sind folgendermaßen gewählt:

- λ_1 : Der Brechungsindex m Dampf/Wasser ist nahezu reell, es findet fast ausschließlich Lichtstreuung an Wassertropfen statt.
- λ_2 : Der Brechungsindex m Dampf/Wasser ist komplex, jedoch überwiegt der Realteil. An Wasserteilchen findet daher fast ausschließlich Lichtstreuung statt. Im Dampf wird die Strahlung absorbiert, da λ_2 einer Wasserdampfabsorptionsbande entspricht.
- λ_3 : Die Wellenlänge stimmt mit einer Wasserabsorptionsbande überein. Der Brechungsindex ist komplex. Es findet Lichtstreuung an Tröpfchen und Absorption in flüssigem Wasser statt.

Damit lassen sich die Wasser- und Wasserdampfkonzentration über selektive Absorptionsmessungen in Absorptionsbanden des Wassers und des Wasserdampfes bestimmen. Den stets gleichzeitig vorhandenen Streueffekt eliminieren wir durch die Referenzmessung bei der nichtabsorbierenden Wellenlänge λ_1 .

2.1 Dampfdichtebestimmung

Im Meßvolumen mit der Querschnittsfläche $A_{\text{meß}}$ und der optischen Meßlänge l , Bild 3, befinde sich ein Gemisch aus Dampf, Luft und (monodisperser) Wassertröpfchen. Bei der Transmissionsmessung ergibt sich dann die Gesamtextinktion bei der Wellenlänge λ_1 |5,1,2|

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-N\pi r^2 \cdot Q_{\text{ext}}(\alpha, m_1) \cdot l) \quad (1)$$

und bei reellem Brechungsindex mit $Q_{\text{abs}}(\alpha, m_1) \ll Q_{\text{sca}}(\alpha, m_1)$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1} = N\pi r^2 \cdot Q_{\text{sca}}(\alpha, m_1) \cdot l \quad (2)$$

N gibt die Tropfenkonzentration an, Q_{ext} , Q_{abs} und Q_{sca} sind die Extinktions-, Absorptions- und Streuquerschnitte der Tropfen [5].

Bei der Wellenlänge λ_2 wird die Strahlungsextinktion in der homogenen Dampfphase durch das Lambert-Beersche Absorptionsgesetz beschrieben

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_2} = \epsilon(\lambda_2) \cdot \rho_D \cdot l \quad (3)$$

Befinden sich zusätzlich Tröpfchen im Meßvolumen, dann erhalten wir die Extinktion durch lineare Superposition der Absorption in der Dampfphase und der Streuung an Tropfen. Wenn auch bei dieser Wellenlänge λ_2 der Imaginärteil $i\kappa$ des Brechungsindex m sehr klein gegenüber dem Realteil n ist, d.h. $Q_{\text{abs}}(\alpha, m_2) \ll Q_{\text{sca}}(\alpha, m_2)$, gilt

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_2} = \left| N\pi r^2 \cdot Q_{\text{sca}}(r, \lambda_2) + \epsilon(\lambda_2) \cdot \rho_D \right| \cdot l \quad (4)$$

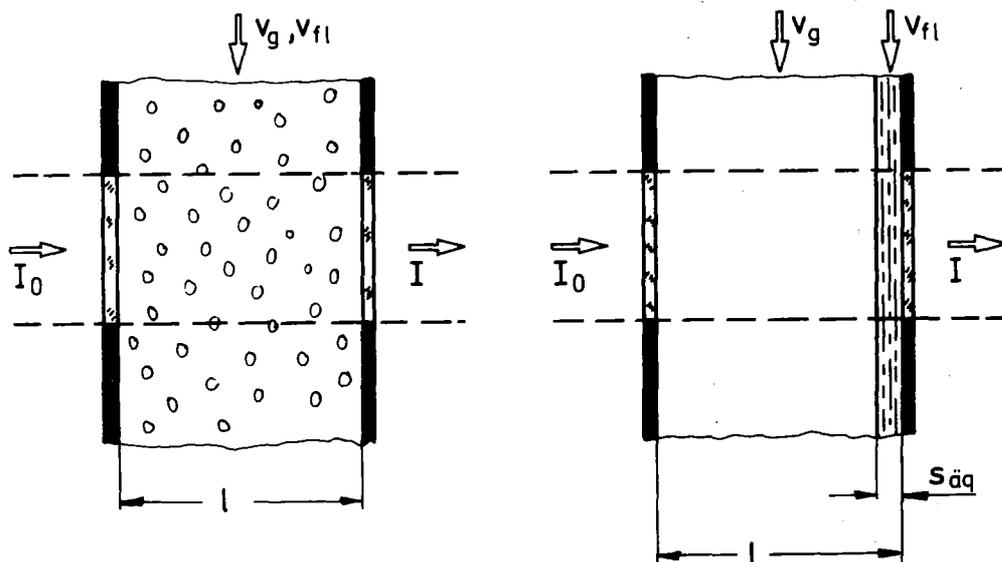


Bild 3: Tröpfchenmodell und homogenes Schichtdickenmodell mit äquivalenter Wasserschichtdicke $s_{\text{äq}}$ der Zweiphasen-Nebelströmung

Außerdem wird angenommen, daß das Flüssigkeitsvolumen gegenüber dem Gesamtvolumen vernachlässigbar klein ist (Nebelströmung). In Bild 3 bedeutet dies, daß die äquivalente Wasserschichtdicke $s_{\text{äq}}$ sehr klein gegenüber der optischen Meßlänge l ist. Unter der Annahme gleicher Streuanteile bei λ_1 und λ_2 , also

$$Q_{\text{sca}}(r, \lambda_1) = Q_{\text{sca}}(r, \lambda_2)$$

folgt für die Dampfdichte mit Gln. (2) und (4)

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_2} = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1} + \varepsilon(\lambda) \cdot \rho_D \cdot l \quad (5)$$

und damit

$$\rho_D = C_1 \cdot \frac{1}{l} \cdot \ln \frac{(I_0/I)_{\lambda_2}}{(I_0/I)_{\lambda_1}} \quad (6)$$

Die Konstante C_1 ist eine Apparatkonstante, die durch eine Eichung bestimmt wird.

Durch die gleichzeitige Messung der Intensitätsverhältnisse bei den beiden Wellenlängen λ_1 und λ_2 kann demnach die Wasserdampfdichte ρ_D des strömenden Fluids bestimmt werden.

Die Annahme gleicher Streuanteile $Q_{\text{sca}}(r, \lambda_1) = Q_{\text{sca}}(r, \lambda_2)$ ist wegen des geringen Abstandes der Wasser- und der Wasserdampfabsorptionsbanden sowie der endlichen Durchlaßbreite der in der Meßapparatur nach Bild 2 verwendeten Interferenzfilter nur annähernd erfüllt. Der Fehlereinfluß und Korrekturmöglichkeiten werden im Anhang diskutiert.

2.2. Wasserkonzentration im Meßvolumen

Zur Bestimmung des Wassermassenstroms durch das Meßvolumen müssen u.a. der Dampf- bzw. der Wasservolumenanteil bekannt sein. Es gilt:

Gasvolumenfaktor

$$\alpha = \frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{gas}} + V_{\text{flüssig}}} \quad (7)$$

Wasservolumenfaktor

$$(1-\alpha) = \frac{V_{\text{flüssig}}}{V_{\text{gas}} + V_{\text{flüssig}}} = \frac{A_{\text{meß}} \cdot s_{\text{äq}}}{A_{\text{meß}} \cdot l}$$

$$(1-\alpha) = \frac{s_{\text{äq}}}{l} = \frac{\bar{w}}{\rho_w \cdot l} \quad (8)$$

\bar{w} ist dabei die auf die Flächeneinheit bezogene Wassermasse in kg/m^2 .

Außerdem gilt für den Wasservolumenfaktor auch

$$(1-\alpha) = \frac{s_{\text{äq}}}{l} = \frac{V_{\text{fl meß}}}{V_{\text{meß}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot N \cdot V_{\text{meß}}}{V_{\text{meß}}}$$

$$(1-\alpha) = \frac{s_{\text{äq}}}{l} = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot N \quad (9)$$

2.3 Absorptionsquotientenmethode zur Tropfengrößenbestimmung

Die Tropfenkonzentration N und der mittlere Radius der Wassertropfen im Meßvolumen müssen bekannt sein, um den Wasservolumenfaktor $(1-\alpha)$ berechnen zu können. Wir betrachten dazu die Lichtwellenlänge λ_3 , die mit einer Wasserabsorptionsbande zusammenfällt. Bei der Transmissionsmessung setzt sich die Gesamtextinktion bei komplexem Brechungsindex nach [5] aus einem Streu- und einem Absorptionsanteil zusammen

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_3} = N\pi r^2 Q_{\text{sca}}(\alpha, m_3) \cdot l + N\pi r^2 Q_{\text{abs}}(\alpha, m_3) \cdot l \quad (10)$$

Gesamt- extinktion	Streuanteil	Absorptionsanteil
-----------------------	-------------	-------------------

Nach der Mieschen Lichtstreuungstheorie [5] können $Q_{\text{sca}}(r, \lambda)$ und $Q_{\text{abs}}(r, \lambda)$ bei bekanntem Brechungsindex für vorgegebene Wellenlängen als Funktion des Tropfenradius r berechnet werden. Wenn wir ferner annehmen, daß für zwei benachbarte Wellenlängen λ_1

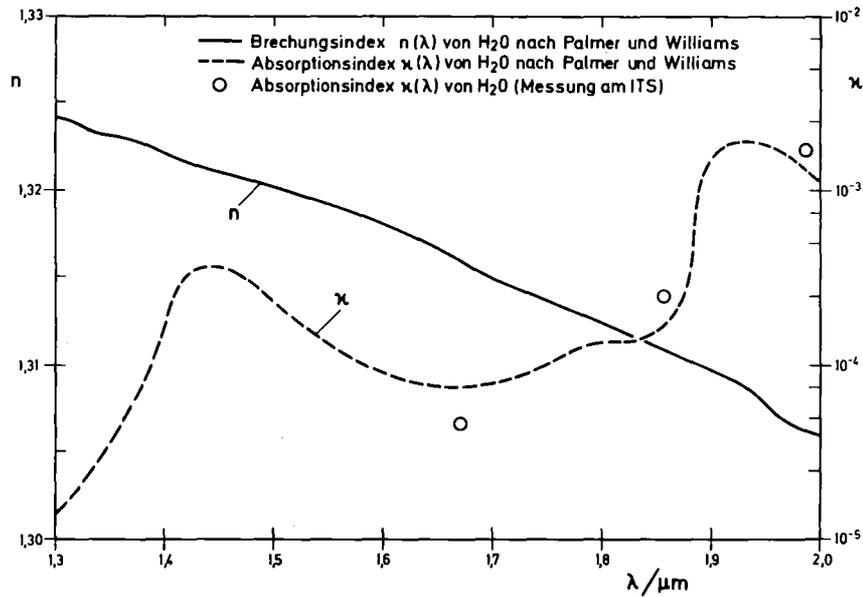


Bild 4: Brechungsindizes nach Real- und Imaginärteil im nahen Infrarot aus [6] und eigenen Messungen.

und λ_3 die Realteile n der Brechungsindizes nach Bild 4 [6] nicht allzu sehr voneinander abweichen und damit auch die Streuanteile etwa gleich sind, dann gilt mit Gl.2

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1} = N\pi r^2 \cdot Q_{sca}(r, \lambda_1) \cdot l \approx N\pi r^2 \cdot Q_{sca}(r, \lambda_3) \cdot l \quad (11)$$

und

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_3} \approx \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1} + N\pi r^2 \cdot Q_{abs}(r, \lambda_3) \cdot l \quad (12)$$

Gesamtex- tinktion	Streu- anteil	Absorptionsanteil
-----------------------	------------------	-------------------

Durch Division der Gln.(2) und (12) lassen sich die unbekann- te Tropfenzahl N und der unbekannt Radius r eliminieren und die gemessenen Intensitätsverhältnisse dem berechneten Quo- tienten des Streu- und des Absorptionsquerschnitts gleich- setzen. Dieser Quotient $Q_{sca}(r, \lambda_1) / Q_{abs}(r, \lambda_3)$ ist für vorgegebene Wellenlängen eine Funktion des Tropfenradius r allein.

$$\frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1}}{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_3} - \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1}} \approx \frac{Q_{\text{sca}}(r, \lambda_1)}{Q_{\text{abs}}(r, \lambda_3)} \quad (13)$$

Die nach |7| berechnete Funktion $Q_{\text{sca}}(\lambda_1) / Q_{\text{abs}}(\lambda_3)$ für die Wellenlängen $\lambda_1=1.671\mu\text{m}$ und $\lambda_3=1.986\mu\text{m}$ ist als Funktion des Tropfenradius r in Bild 5a, b angegeben. Bedingt durch die bekannten Oszillationen der Lösungen für die Extinktionsquerschnitte ergibt sich in einigen Radienbereichen eine Doppeldeutigkeit, die zu einer Unsicherheit in der Bestimmung der Tropfengröße führt.

Damit läßt sich aus den gemessenen Intensitätsverhältnissen bei λ_1 und λ_3 in einem gewissen Radienbereich ein Schätzwert für den Tropfenradius bestimmen. Bei den hier verwendeten Lichtwellenlängen im nahen Infrarot gilt dies nach Bild 5 für $2 < r < 40\mu\text{m}$. Nach Gl.(2) wird dann aus dem gemessenen Intensitätsverhältnis $(I_0/I)_{\lambda_1}$, dem bekannten Streuquerschnitt $Q_{\text{sca}}(r, \lambda_1)$ und gegebener Meßlänge l die Tropfenkonzentration N bestimmt.

Das daraus ermittelte Produkt $N\pi r^2$, das der wirksamen Gesamtquerschnittfläche aller Flüssigkeitsteilchen im Meßvolumen proportional ist, wird durch gleichzeitige Kontrollmessungen bei weiteren Wellenlängen überprüft und gegebenenfalls verbessert und nach Gl.(9) der Wasservolumenfaktor $(1-\alpha)$ berechnet.

Die hier beschriebene Absorptionsquotientenmethode kann zu kleineren Radien durch die von TEORELL |8| angegebene und oftmals angewandte "Dispersionsquotienten"- oder "Trübungsmethode" |5, 8 bis 10| ergänzt werden, die wiederum nur in gewissen Radienbereichen auswertbare Ergebnisse liefert. Bild 6 zeigt die ebenfalls nach |7| berechnete Funktion $Q_{\text{ext}}(\lambda_1) / Q_{\text{ext}}(\lambda_6)$ für die Wellenlängen $\lambda_1=1.671 \mu\text{m}$ und $\lambda_6=0.620 \mu\text{m}$.

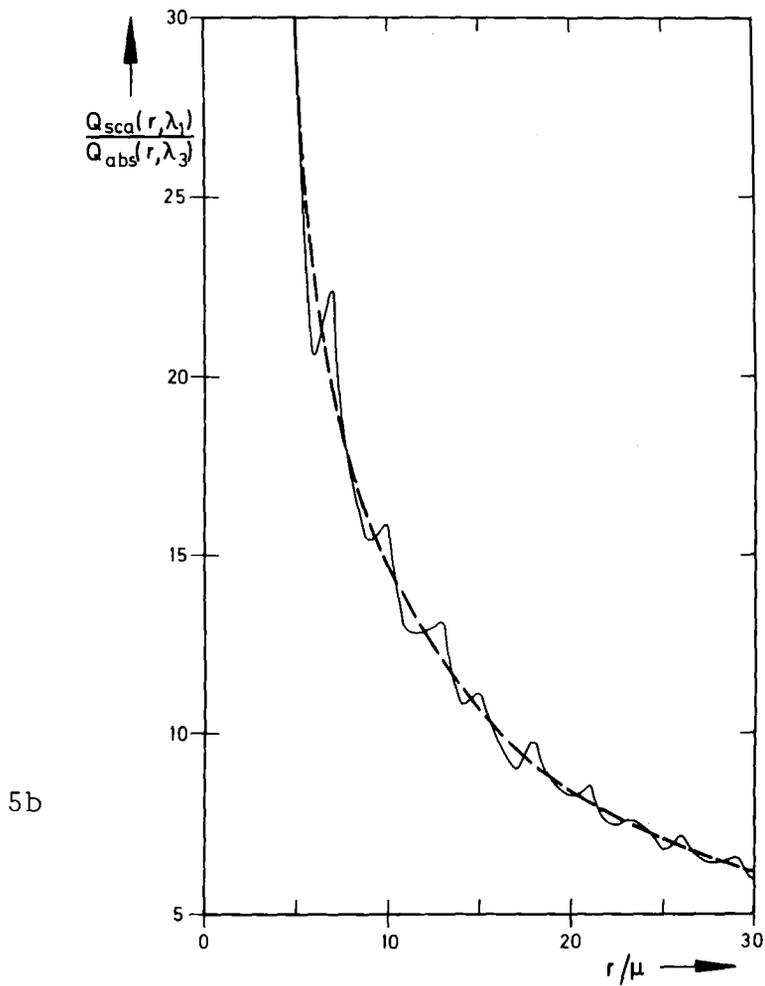
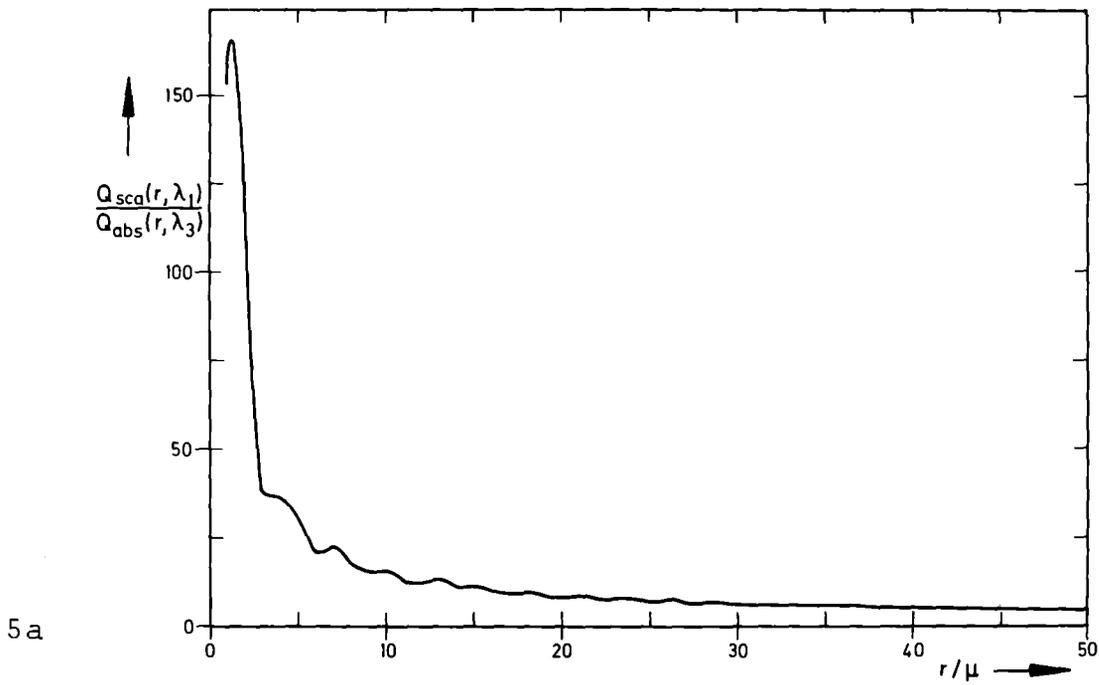


Bild 5a und b: Quotient $\frac{Q_{sca}(r, \lambda_1)}{Q_{abs}(r, \lambda_3)}$ in Abhängigkeit vom Tropfenradius
a) im Radienbereich von 1-50 μ m
b) im Radienbereich von 5-30 μ m

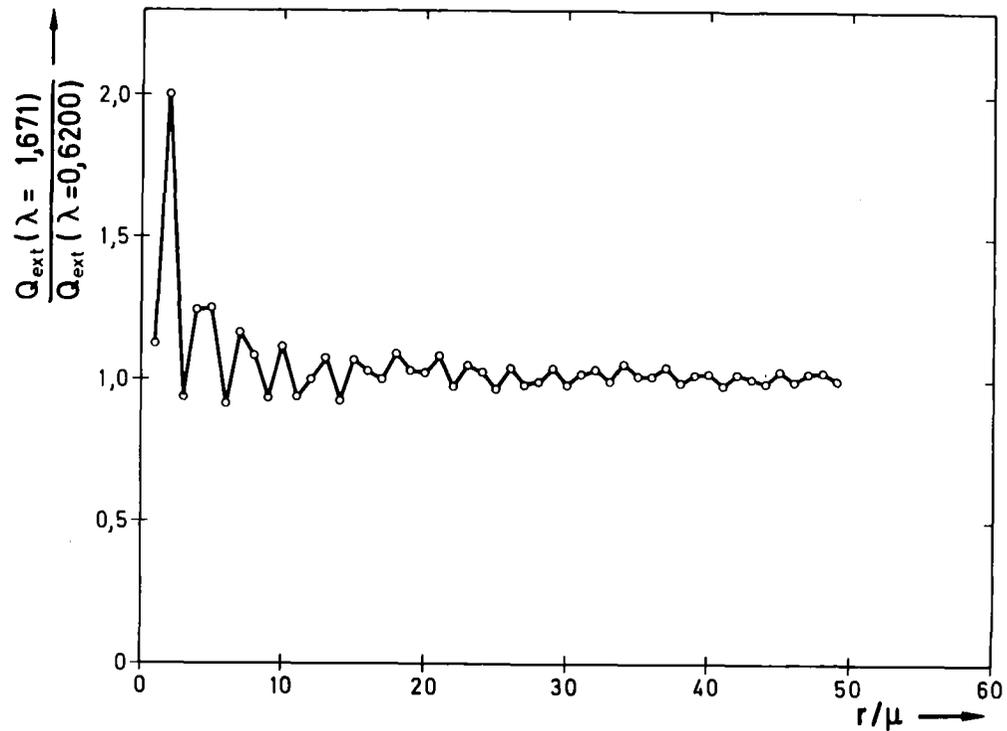


Bild 6: Verhältnis der Extinktionsquerschnitte für $\lambda=1.671\mu\text{m}$ und $\lambda=0.620\mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Tropfenradius r

2.4 Wasserkonzentrationsbestimmung nach dem Schichtdickenmodell

Die unter 2.3 beschriebene Absorptionsquotientenmethode ist für die Rechnerauswertung der Meßergebnisse an instationären Zweiphasenströmungen etwas umständlich in der Handhabung und erfordert lange Rechenzeiten. Nach der Modellvorstellung, Bild 3, kann eine äquivalente Wasserschichtdicke $s_{\ddot{a}q}$ auch ähnlich einer von GREENBERG [11]⁺ angegebenen Vorgehensweise durch eine Absorptionsmessung ermittelt werden

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_3, \text{abs}} &\approx \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_3} - \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_1} \approx N\pi r^2 Q_{\text{abs}}(r, \lambda_3) \cdot l \\ &= C \cdot s_{\ddot{a}q} \end{aligned} \quad (14)$$

⁺) Dieser berücksichtigt jedoch keinen Streueffekt.

Die Konstante C wird durch Eichmessungen mit der Meßapparatur und den entsprechenden Interferenzfiltern bei vorgegebenen Wasserfilmdicken bestimmt. Für die Blowdownauswertung wird sie für einzelne Versuche oder Versuchsabschnitte nach Abschnitt 2.3 überprüft oder neu berechnet. Mit Gl.8 folgt dann die gesuchte Wasserkonzentration.

Die Interferenzfilter erlauben keine vollständige Bandenseparation der Wasser- und Wasserdampflinien. Ein Übersprechen der Dampfabsorption auf die Extinktion bei λ_3 wird nach Gl.(15) berücksichtigt.

$$s_{\text{äq}} = C_2 \cdot \left[\ln \frac{(I_0/I)_{\lambda_3}}{(I_0/I)_{\lambda_1}} - C_3 \cdot \ln \frac{(I_0/I)_{\lambda_2}}{(I_0/I)_{\lambda_1}} \right] \quad (15)$$

3. Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase

Die regellos schwankende Anordnung der Flüssigkeitsteilchen im optischen Meßvolumen verursacht eine stochastische Modulation der Lichtintensität. Ordnet man eine zweite Infrarotmeßebeine in Strömungsrichtung versetzt am Strömungskanal an, dann kann die Strömungsgeschwindigkeit über die Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion der Ausgangssignale der beiden Meßeinrichtungen bestimmt werden. Die theoretischen Grundlagen und Anwendungen dieser Verfahren wurden z.B. von LANGE [12] und MESCH et.al. [13,14] ausführlich beschrieben.

Bild 7 zeigt schematisch die Anordnung der Infrarotmeßeinrichtungen an einem der Überströmkanäle sowie Oszillogramme der Ausgangssignale mit verschiedener Zeitauflösung. Bei bekanntem Abstand d der Meßebenen ergibt sich die Geschwindigkeit u mit der Laufzeit τ zu

$$u = \frac{d}{\tau} \quad (16)$$

Da die gesamte Datenauswertung der Infrarotabsorptionsmessungen auf dem Prozeßrechner des ITS geschieht, wurde ein spezielles Korrelationsprogramm entwickelt. Es gestattet die automatische

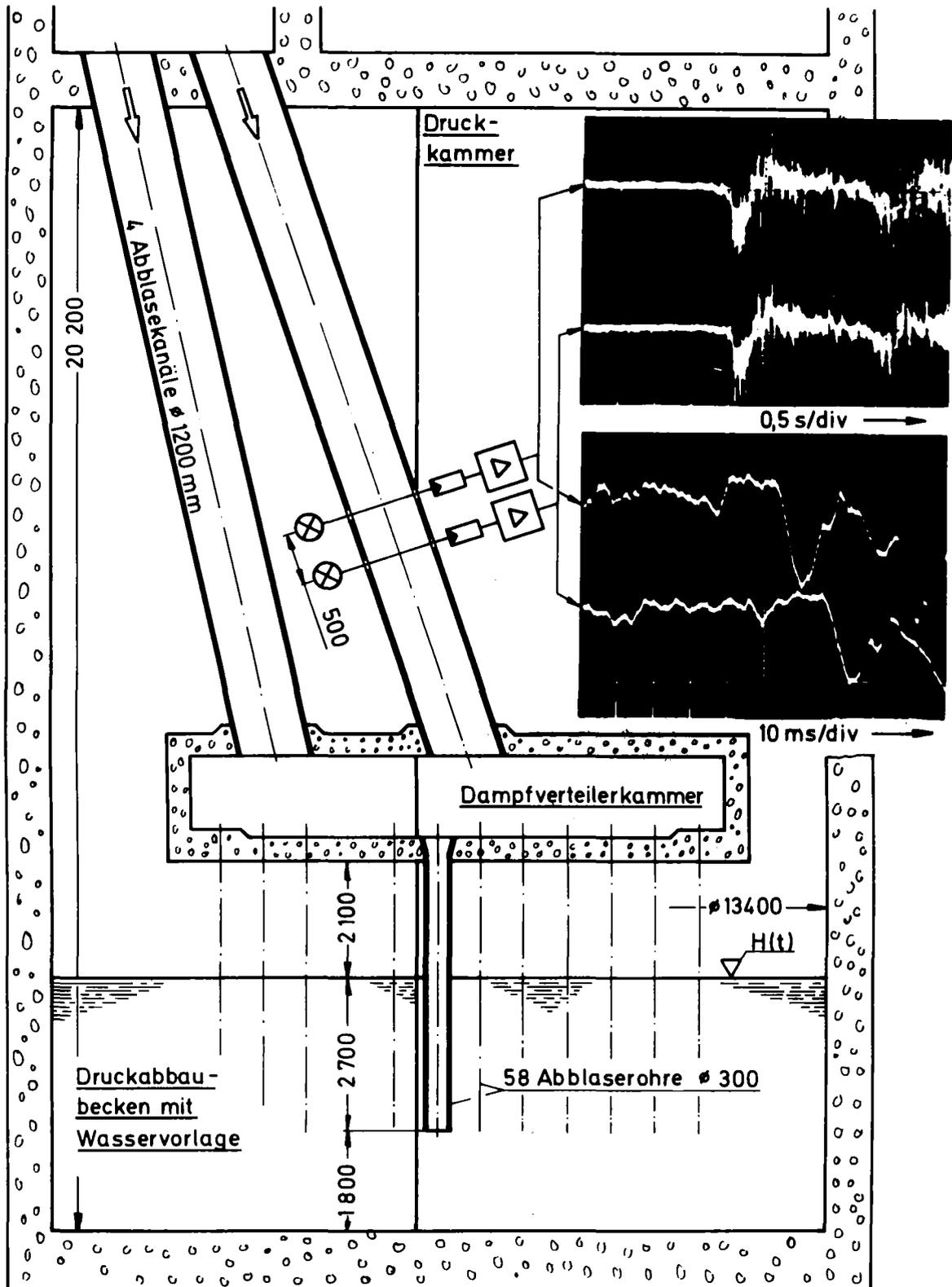


Bild 7: Schematische Anordnung der IR-Meßeinrichtung an einem der Überströmkanäle und Oszillogramme der Ausgangssignale beider Meßebenen (Blowdown 18)

punktweise Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit auch bei instationärem Verlauf der Oszillationen.

Nach der simultanen Digitalisierung der beiden Zeitfunktionen $x(t)$ und $y(t)$ wird die normierte Kreuzkorrelationsfunktion

$$\phi_{xy}^+ = \frac{\sum_{n=1}^{N-k} x(n \cdot \Delta t) \cdot y(n \cdot \Delta t + k \cdot \Delta t)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N-k} x^2(n \cdot \Delta t) \cdot \sum_{n=k+1}^N y^2(n \cdot \Delta t)}} \quad (17)$$

mit $k \cdot \Delta t = \tau$, wobei $k = 0, 1, \dots, m$ und $m \ll N$, für bestimmte Datensegmente (N Abtastwerte) einer entsprechenden Zeitdauer (z.B. 60m/sec.) berechnet. Für das Maximum der Funktion $\phi_{xy}^+(k \cdot \Delta t)$ wird die Laufzeit τ_{\max} bestimmt und die Geschwindigkeit \bar{u} errechnet.

Wegen turbulenter Austauschvorgänge in der Zweiphasenströmung existiert eine Geschwindigkeitsverteilung der Partikel über den Meßquerschnitt. Für kugelige Tröpfchen und Gaußsche Geschwindigkeitsverteilung kann angenommen werden, daß alle Partikel gleich gewichtet zum Streu- oder Absorptionseffekt beitragen. Die berechnete Geschwindigkeit \bar{u} wird dann als Mittelwert für das Meßvolumen und das entsprechende Zeitintervall interpretiert ⁺⁾ .

Bild 7 zeigt im unteren der beiden Oszillogramme einen Ausschnitt aus einem typischen Verlauf der Zeitfunktionen $x(t)$ und $y(t)$. Als günstige Zeitabschnitte haben sich bei den hier besprochenen Versuchen 60 msec für entsprechende Datensegmente ergeben.

In Bild 8 wird ein Ausschnitt aus dem Strukturdiagramm des Korrelationsprogramms angegeben. Da vor allem bei instationären Strömungserscheinungen mehrere relative Maxima der normierten Korrelationsfunktion $\phi_{xy}^+(k \cdot \Delta t)$ vorkommen können, wird das erste auftretende Maximum auf seinen Absolutwert hin untersucht, der z.B. der Bedingung $0,8 \leq (\phi_{xy}^+)_{\max} \leq 1,0$

⁺⁾ Bei nichtgaußscher Geschwindigkeitsverteilung während instationärer Vorgänge oder Oszillationen der Massenströme muß das Zeitsegment entsprechend kürzer gewählt werden.

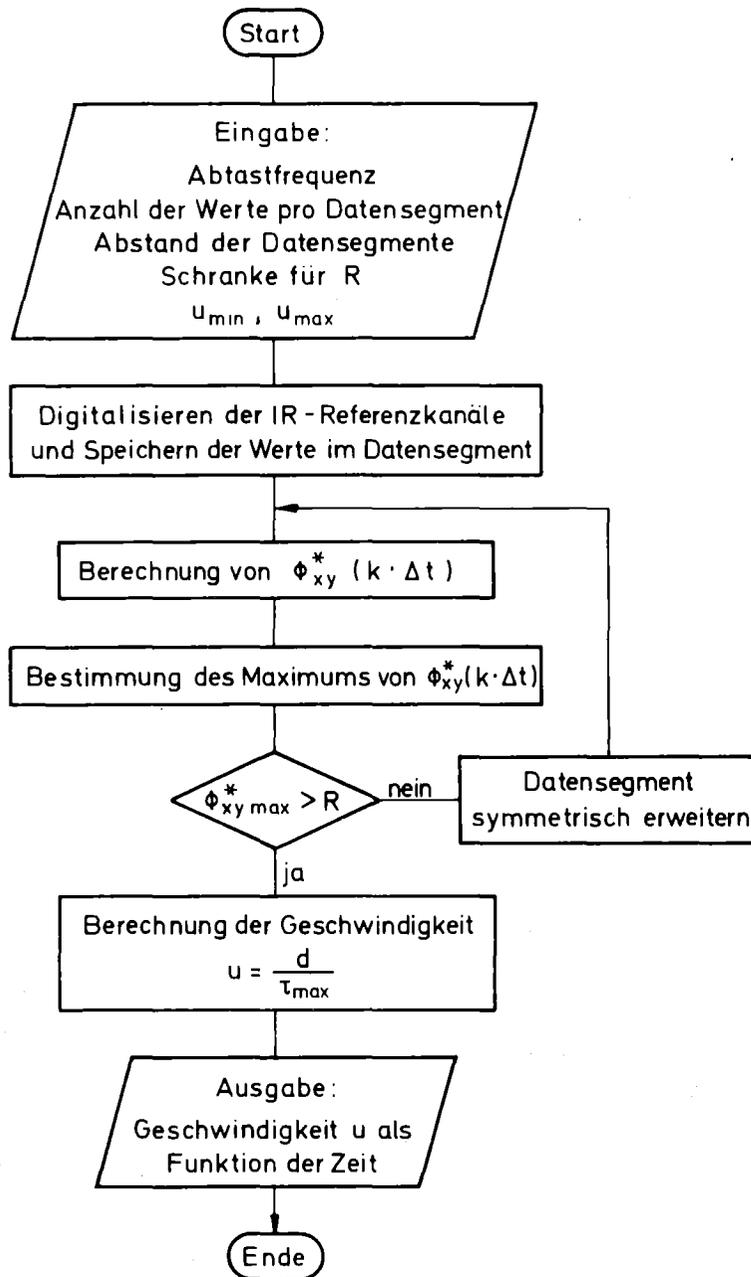


Bild 8: Strukturdiagramm für die Geschwindigkeitsberechnung

BLOWDOWN : 18.
ITS, UNI. KARLSRUHE

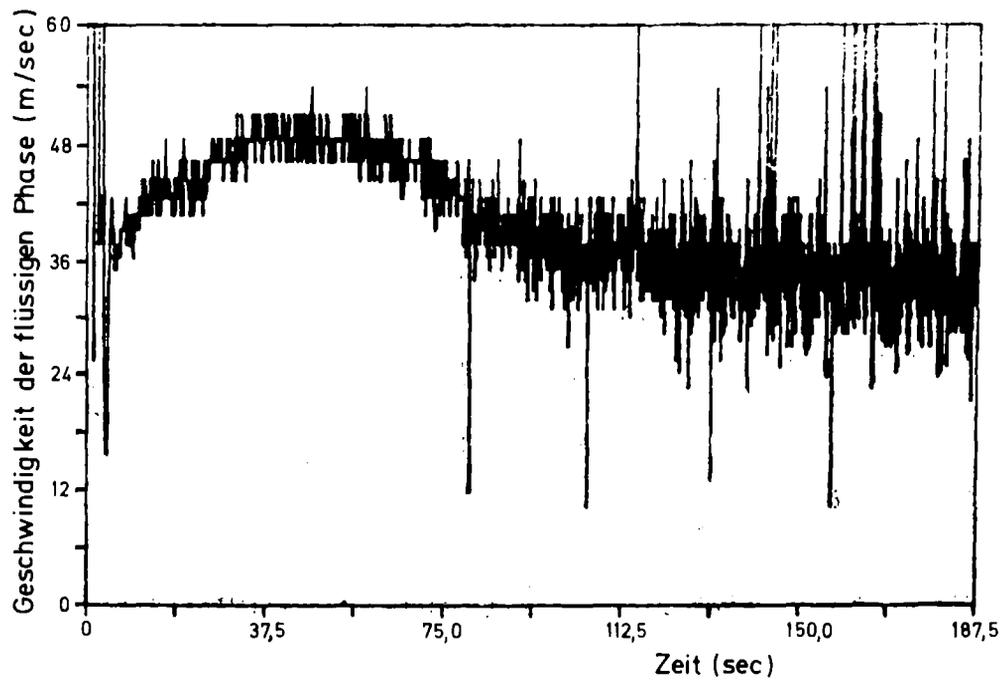
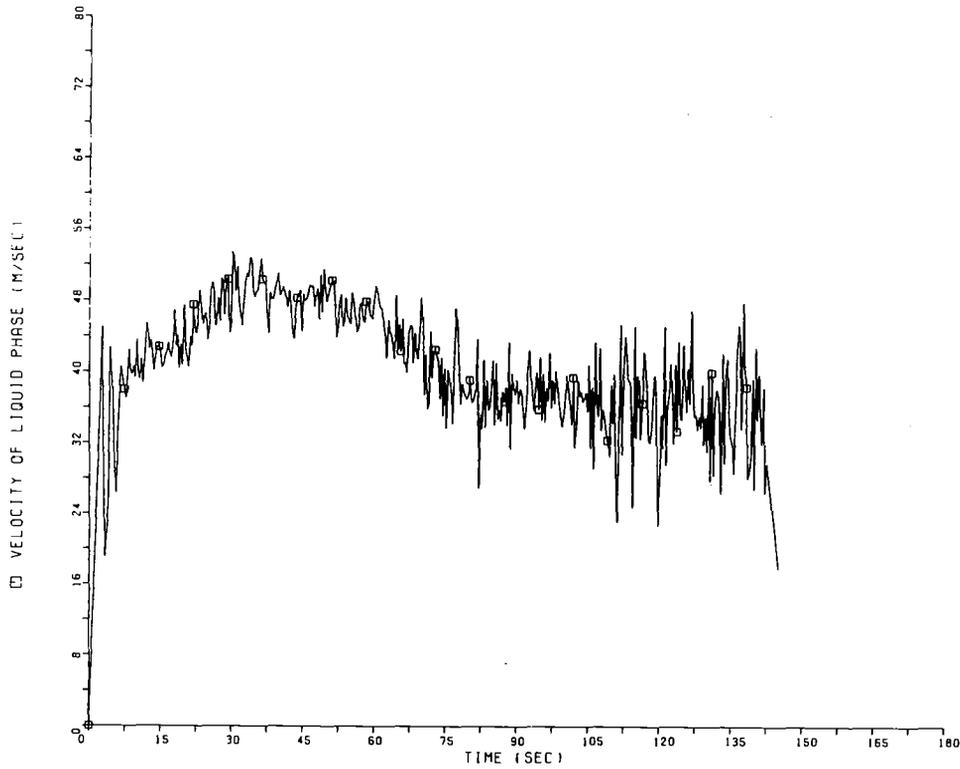


Bild 9: Vergleichsauswertung des instationären Geschwindigkeitsverlaufs bei Blowdown 18 (Auswertung ITS oben, IRE unten)

genügen muß. Ist dies nicht der Fall, dann werden die Datenssegmente x_i und y_i , $i=1, \dots, N$ symmetrisch erweitert und ϕ_{xy}^+ neu berechnet. Der Zahlenwert für $(\phi_{xy}^+)_{\max}$ wird als Parameter (R) vorgegeben.

Eine Vergleichsauswertung des instationären Geschwindigkeitsverlaufs bei Blowdown 18 mit dem Prozeßrechner (3 Werte/sec) und einem Zeitserienanalysator des Instituts für Reaktorentwicklung (IRE) der Gesellschaft für Kernforschung (2 Werte/sec) zeigt Bild 9 ⁺). Die quantitative Übereinstimmung ist gut. Ab $t_{\underline{v}} 75\text{sec}$ ergeben sich wegen Geschwindigkeits- und Massenstromoszillationen und Nichteinhaltung des Abtasttheorems stark schwankende Ausschläge. In Abschnitt 8.2 wird eine Auswertung mit höherer zeitlicher Auflösung (20 Werte/sec) angegeben.

⁺) Herrn Dipl.-Ing. R.A.Müller und Herrn Eberle vom IRE-GfK sei an dieser Stelle für diese Auswertung gedankt.

4.0 Abgeleitete Kenngrößen

Über die zusätzliche Messung des Gesamtdrucks und der Temperatur des Fluids am Meßort wird der Wasserdampfpartialdruck und der Luftpartialdruck bestimmt. Die Komponenten Wasserdampf und Luft werden als perfekte Gase betrachtet (Gesetz von Dalton).

Für den Wasserdampfpartialdruck p_D gilt

$$p_D = \rho_D \cdot R_D \cdot T \quad (18)$$

und mit Gl.6

$$p_D = C_1 \cdot \frac{1}{I} \cdot \ln \frac{(I_0/I)^{\lambda_2}}{(I_0/I)^{\lambda_1}} \cdot R_D \cdot T \quad (19)$$

R_D = Gaskonstante für Wasserdampf
 T = absolute Temperatur in Kelvin

Der Gesamtdruck p ist die Summe aus Wasserdampf- und Luftpartialdruck

$$p = p_D + p_L \quad (20)$$

Mit Gl.19 ergibt sich der Luftpartialdruck p_L zu

$$p_L = p - C_1 \cdot \frac{1}{I} \cdot \ln \frac{(I_0/I)^{\lambda_2}}{(I_0/I)^{\lambda_1}} \cdot R_D \cdot T \quad (21)$$

Die Dichte der Luft ρ_L ist

$$\rho_L = \frac{p_L}{R_L \cdot T} \quad (22)$$

Sie berechnet sich mit Gl.21 zu

$$\rho_L = \frac{p - C_1 \cdot \frac{1}{I} \cdot \ln \frac{(I_0/I)^{\lambda_2}}{(I_0/I)^{\lambda_1}} \cdot R_D \cdot T}{R_L \cdot T} \quad (23)$$

R_L = Gaskonstante der Luft

Bei bekannten Strömungsgeschwindigkeiten u der Einzelkomponenten, die hier als gleich angenommen werden (kein Schlupf zwischen den Phasen, wie die gleichzeitig ausgeführte radioaktive Tracermessung [15] ergab), können die Luft- Dampf- und Wassermassenströme getrennt angegeben werden. Mit dem Gesamtströmungsquerschnitt A erhält man für den Dampfmassenstrom

$$\dot{m}_D = \rho_D \cdot u_D \cdot A \quad (24)$$

für den Luftmassenstrom

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot u_L \cdot A \quad (25)$$

und für den Wassermassenstrom

$$\dot{m}_W = \rho_W \cdot u_W \cdot (1-\alpha) \cdot A \quad (26)$$

mit

$$(1-\alpha) = \frac{\bar{w}}{\rho_W \cdot l}$$

nach Gl.8.

5. Marviken-Instrumentierung

5.1 Beschreibung der Infrarot (IR)-Meßeinrichtung⁺

Die am Reaktor Marviken eingesetzte Infrarotmeßeinrichtung besteht aus zwei Sende- und zwei Empfangsgeräten. Sie sind an einem der vier "blowdown-channels" über eine schwingungsfrei gelagerte Rahmenkonstruktion befestigt, Bild 10

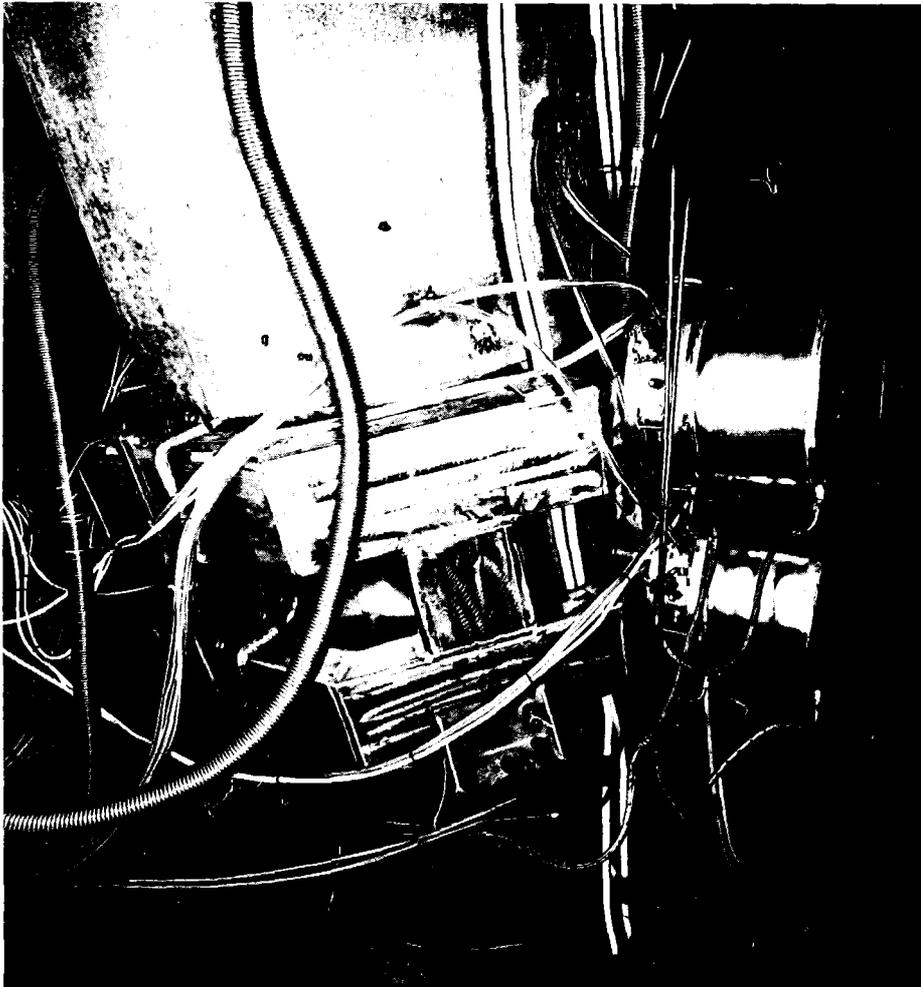


Bild 10: Blowdown-channel mit der IR-Meßeinrichtung
(zwei Meßebenen)

⁺) Die Konstruktion des mechanischen Teils der Meßeinrichtung erfolgte gemeinsam mit Dipl.-Ing. E. Wolf und Mitarbeitern, Institut für Reaktorentwicklung der GfK. Eine detaillierte Beschreibung der Konstruktion ist in Vorbereitung.

Sender und Empfänger sind durch druckdichte und wassergekühlte Gehäuse geschützt. Die optische Meßlänge wurde für 150 und 300 mm ausgelegt. Da der Blowdown-Channel einen Innendurchmesser von 1200 mm aufweist wird der Lichtstrahl teilweise in Tauchrohren geführt.

Bild 11 zeigt nochmals schematisch den Einbau der Meßeinrichtung.

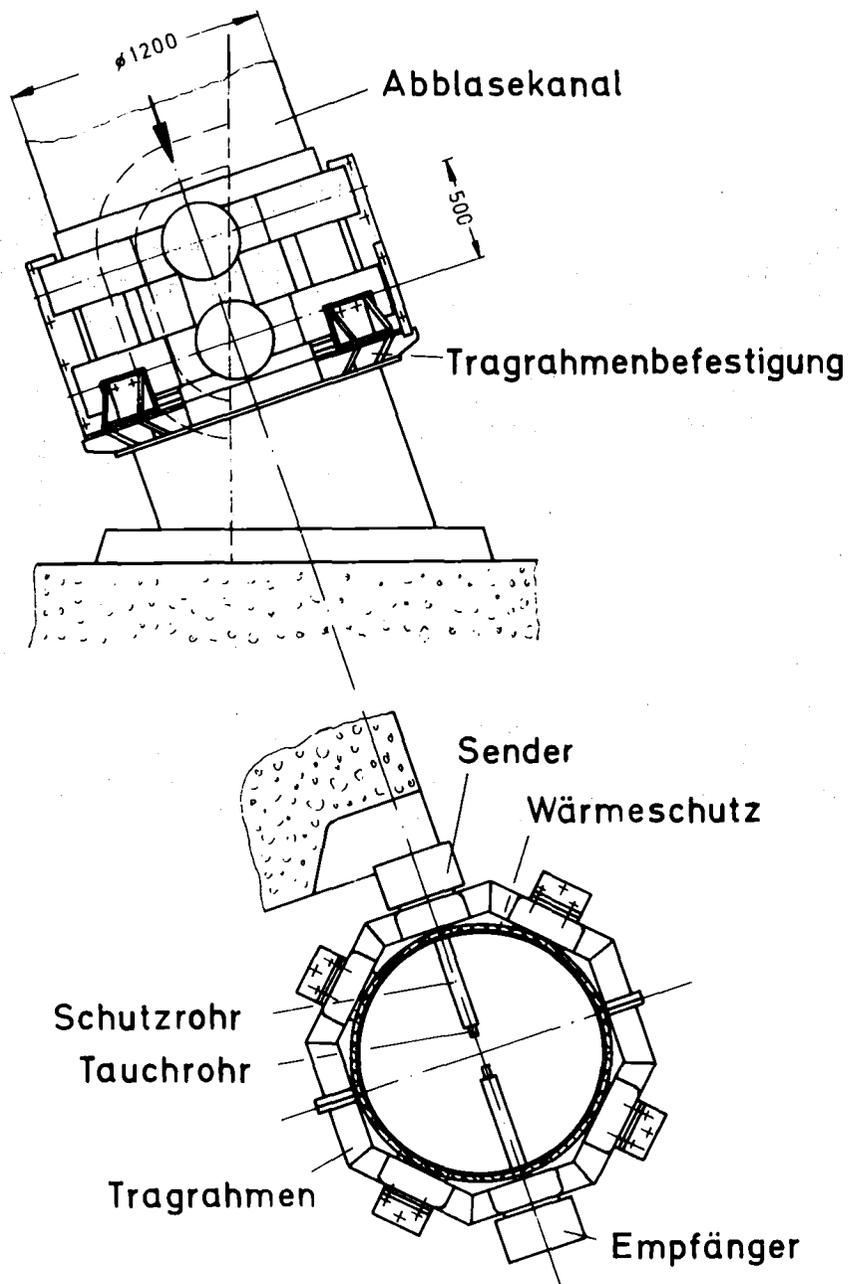


Bild 11: Schematischer Einbau der IR-Meßeinrichtung

5.2 Optik

In den Sende- und Empfangsgeräten ist der schematische Strahlengang von Bild 2 realisiert.

Das Sendegerät für die Infrarotstrahlung besteht aus einer Halogenlampe, einem Linsensystem, einer Modulationsscheibe und einer drehbaren Strahlunterbrechung, mit der die Einstellungen "Nullpunkt", "Kalibrieren" und "Messen" vorgenommen werden, Bild 2. Die Strahlung wird mit 1000 Hz moduliert.

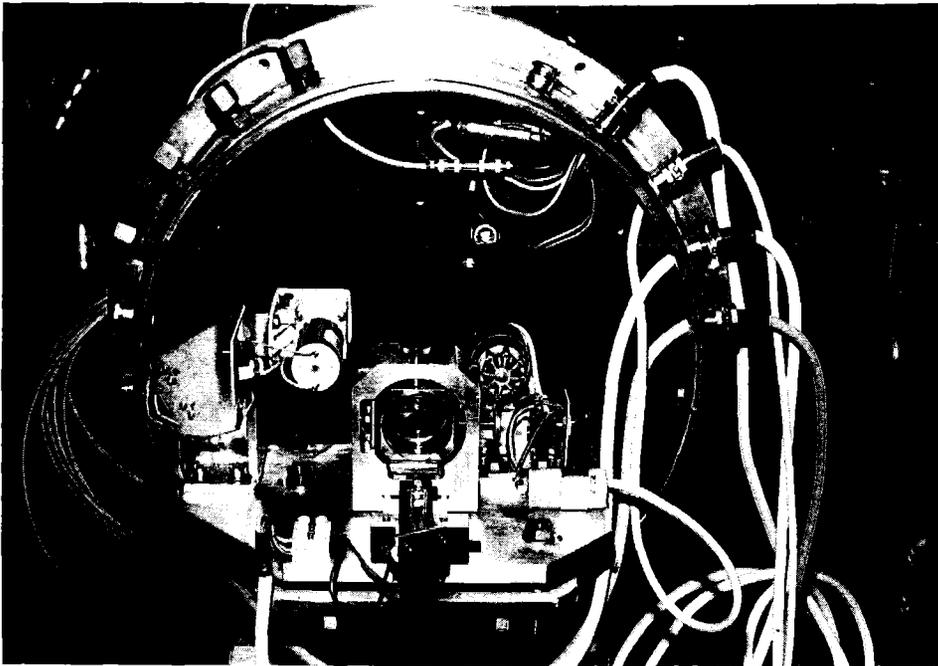


Bild 12: Sendegerät der Meßeinrichtung

Das Empfangsgerät besteht aus drei selektiven Empfangskanälen, Bild 13.

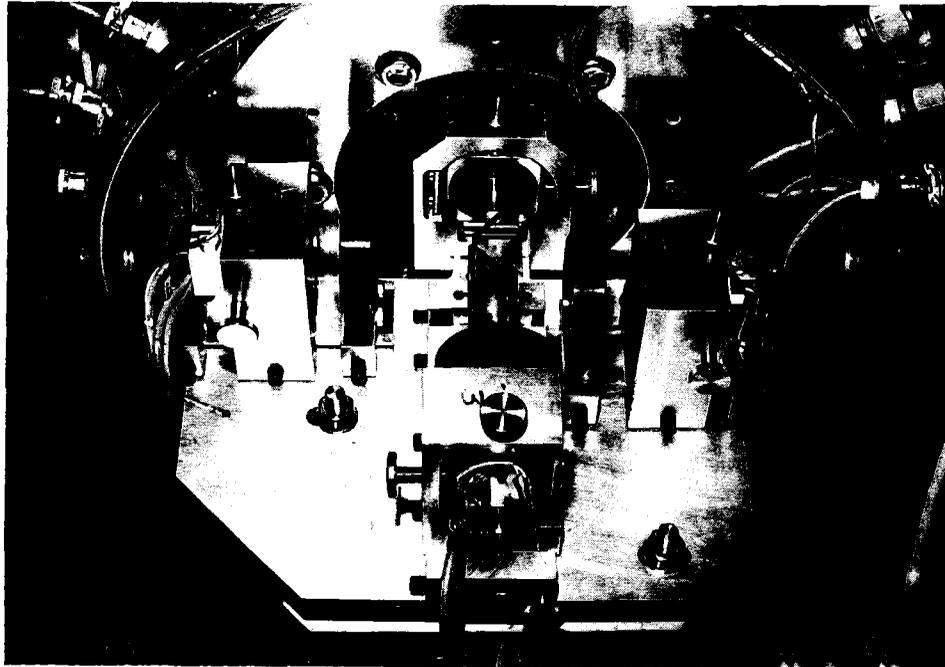


Bild 13: Empfangsgerät der Meßeinrichtung

Eine Aufteilung der Strahlung auf die einzelnen Kanäle erfolgt über halbdurchlässige Spiegel. Die Selektion der Wellenlängen wird durch entsprechende Interferenzfilter erreicht. Die PbS-Fotowiderstände werden über eine Heizung und eine elektronische Regelung - (R) in Bild 14 - zur Ausschaltung von Temperatureinflüssen auf einer konstanten Temperatur oberhalb der Gehäusetemperatur gehalten.

5.3 Elektronische Signalverarbeitung

In Bild 14 ist schematisch die Signalauswertung für einen Empfangskanal angegeben. Alle Steuerfunktionen und die Auswertung der Meßsignale erfolgt durch die IR-Elektronik, die mit Ausnahme des Lampennetzteils im etwa 80 m entfernten Kontrollraum untergebracht ist.

Das Lampennetzteil ist etwa 20 m von der IR-Meßeinrichtung unmittelbar an der Kabeleinführung in das Sicherheitscontainment aufgestellt, um kürzere Leitungslängen zu erreichen.

Die Meßwerte werden von der zentralen Meßwerterfassungsanlage auf PCM (FM) - Magnetband zur Weiterverarbeitung gespeichert.

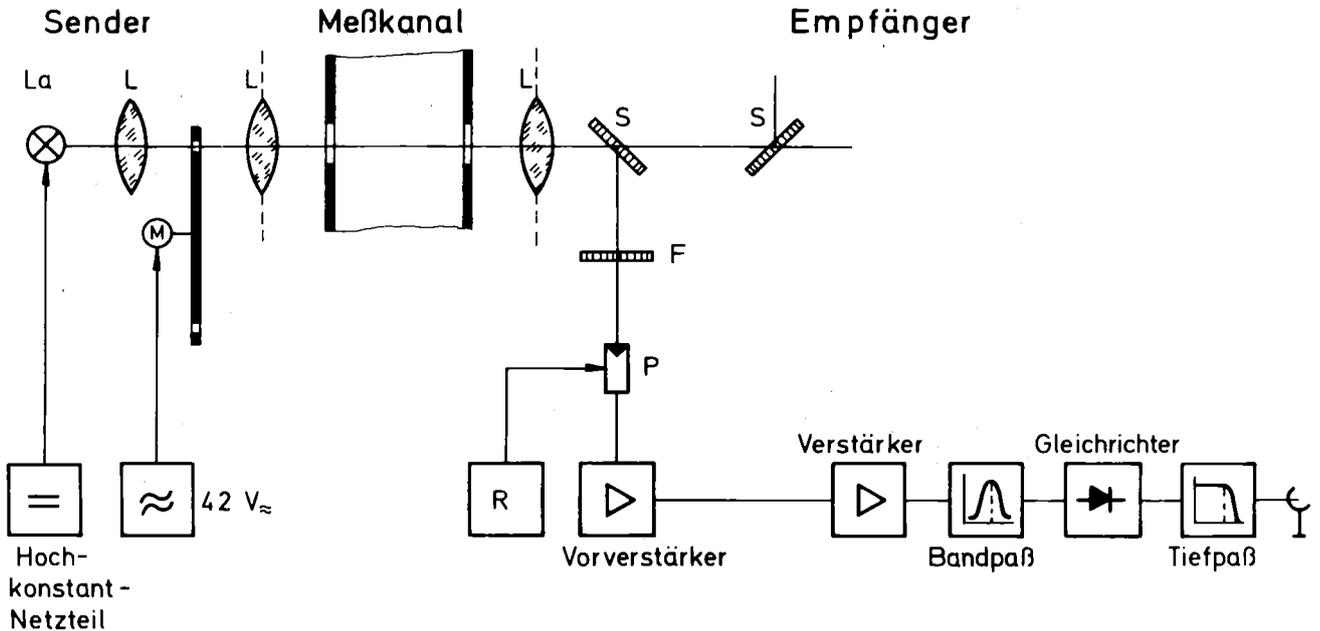


Bild 14: Schema der Signalauswertung für einen Empfangskanal

5.4 Modifikation während der Versuchsserie

Die optische Meßlänge beider Meßebenen betrug bis einschließlich Blowdown 21 150 mm. Nach diesem Versuch wurde für Blowdown 22 die Meßlänge der oberen Meßebeue durch kürzere Tauchrohre auf 300 mm vergrößert. Die Meßlänge der unteren Meßebeue blieb bei diesem Versuch unverändert. Sie wurde dann für Blowdown 23 ebenfalls auf 300 mm erweitert. Bei allen folgenden Versuchen wurde die Meßlänge von 300 mm in beiden Meßebeuen beibehalten. In der oberen Meßebeue erfolgte die Bestimmung der Wasserdampfdichte mit einem Interferenzfilter, das auf eine Wasserdampfabsorptionsbande geringerer Absorption abgestimmt ist.

6. Beschreibung der Versuchsauswertung

Anhand der Blockschaltbilder, Bilder 15 bis 17 wird die Datenregistrierung in Marviken, die Signalverarbeitung am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und die Konvertierung der Meßwerte in physikalische Größen am Rechenzentrum der Universität Karlsruhe erläutert.

6.1 Datenregistrierung

Die zentrale PCM-Magnetband-Registrierung zeichnet die sechs Infrarotsignale beider Meßebenen sowie das Druck- und Temperatursignal am Einbauort der Infrarotmeßeinrichtung während des Versuchs auf, Bild 15. Die Infrarotsignale der Referenzwellenlängen beider Meßebenen werden zusätzlich auf einem FM-Magnetband aufgenommen. Außerdem registriert ein x,t-Schreiber direkt zur Kontrolle zwei ausgewählte Infrarotsignale. Nach dem Versuch werden die Daten von PCM - auf FM-Magnetband überspielt und zusätzlich mit einem x,t-Schreiber aufgezeichnet.

6.2 Auswertung der Blowdownversuche

Die auf Magnetband gespeicherten Analogsignale der Infrarotmeßeinrichtung sowie die Druck- und Temperaturgrößen werden mit dem Prozeßrechner des Institut für Thermische Strömungsmaschinen sukzessive digitalisiert und nach einer Datenreduktion auf Lochstreifen ausgegeben, Bild 16. Auch die Geschwindigkeitsberechnung nach dem Korrelationsprogramm erfolgt mit diesem Prozeßrechner. Die Geschwindigkeitswerte werden zeitgleich zu den Infrarotdaten auf Lochstreifen ausgegeben. Die Konvertierung in physikalische Größen und die Erstellung von Diagrammen mit dem zeitlichen Verlauf der berechneten Parameter geschieht im Rechenzentrum der Universität Karlsruhe an der Rechenanlage UNIVAC 1108, Bild 17.

Alle Auswertalgorithmen wurden vom Institut für Thermische Strömungsmaschinen dem Marviken Projekt übergeben und Einzel-

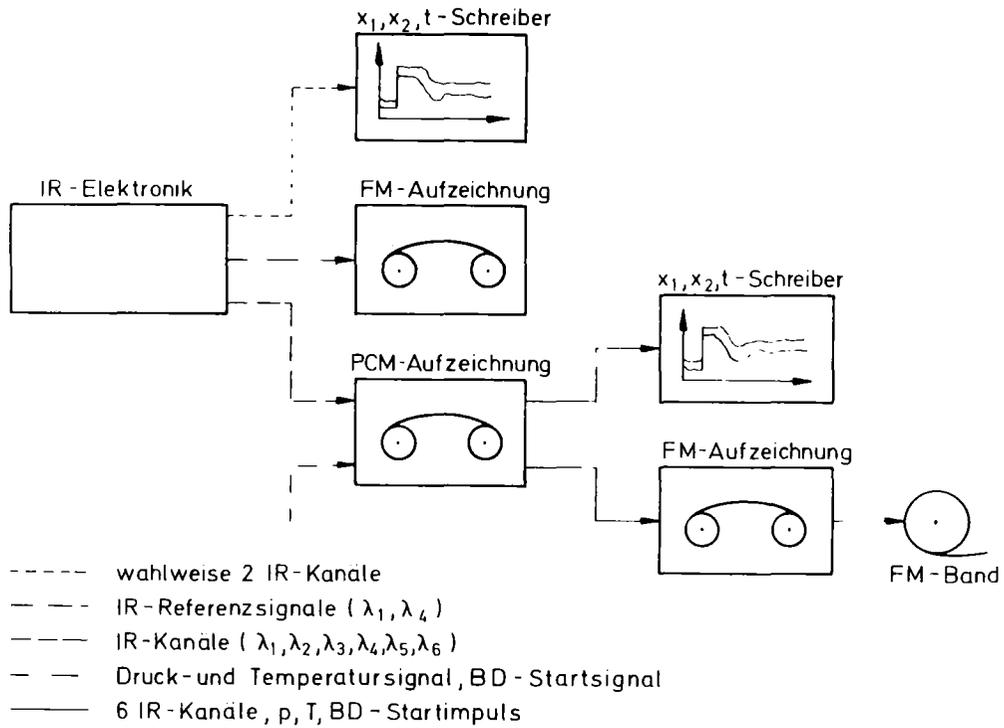


Bild 15: Datenaufzeichnung in Marviken

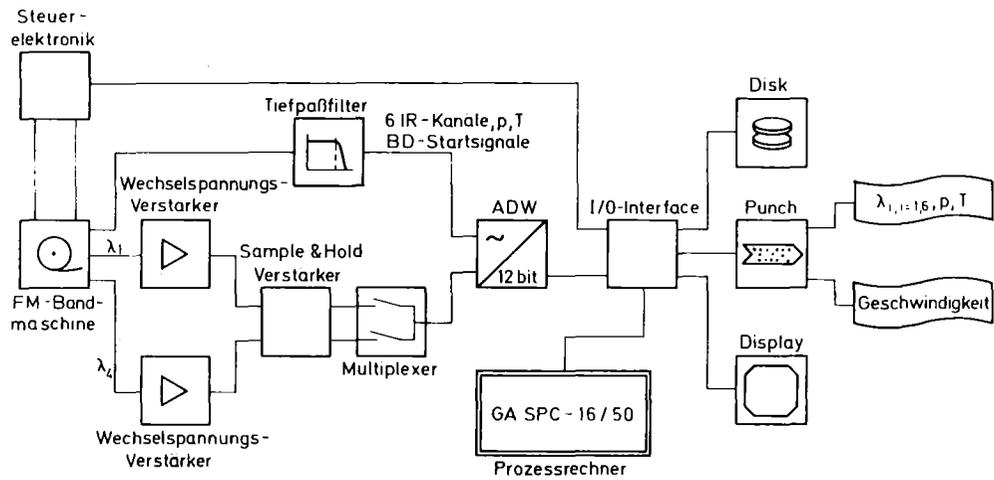


Bild 16: Signalverarbeitung am ITS

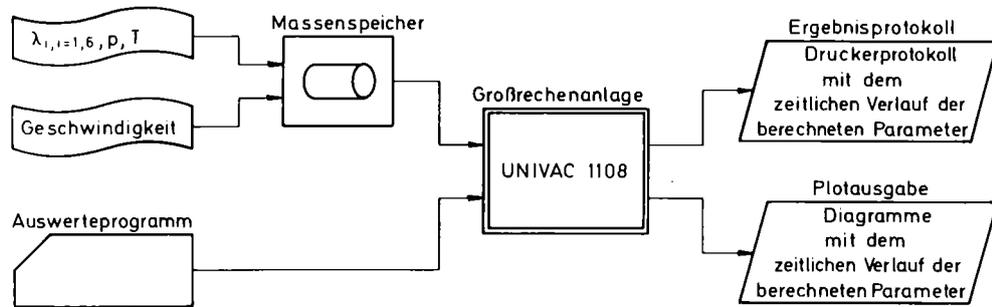


Bild 17: Konvertierung der Meßdaten in physikalische Größen am Rechenzentrum der Universität Karlsruhe

heiten der Auswertung besprochen. Ab Blowdown 19 erfolgte die Auswertung gleichzeitig durch das ITS und das Marviken Projekt. Bild 18 zeigt vergleichend die Berechnung der Tropfengeschwindigkeit bei Blowdown 24 durch das ITS und das Marviken Projekt.

7. Ergänzende Auswertungen

Die Infrarotabsorptionsmeßeinrichtung wurde bei den Blowdownversuchen 17 bis 25 eingesetzt. Diagramme mit den Meßgrößen Wasserdampfdichte, Wasserkonzentration, Luft- und Dampfpartialdruck, Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase sowie die Luft, Dampf- und Wassermassenströme, gemessen in der Kernströmung eines der vier vent channels, veröffentlicht das Marviken-Projekt in den MX-II-Berichten zu den einzelnen Versuchen. Im folgenden werden einige zusätzliche Auswertungsmöglichkeiten der IR-Meßwerte diskutiert.

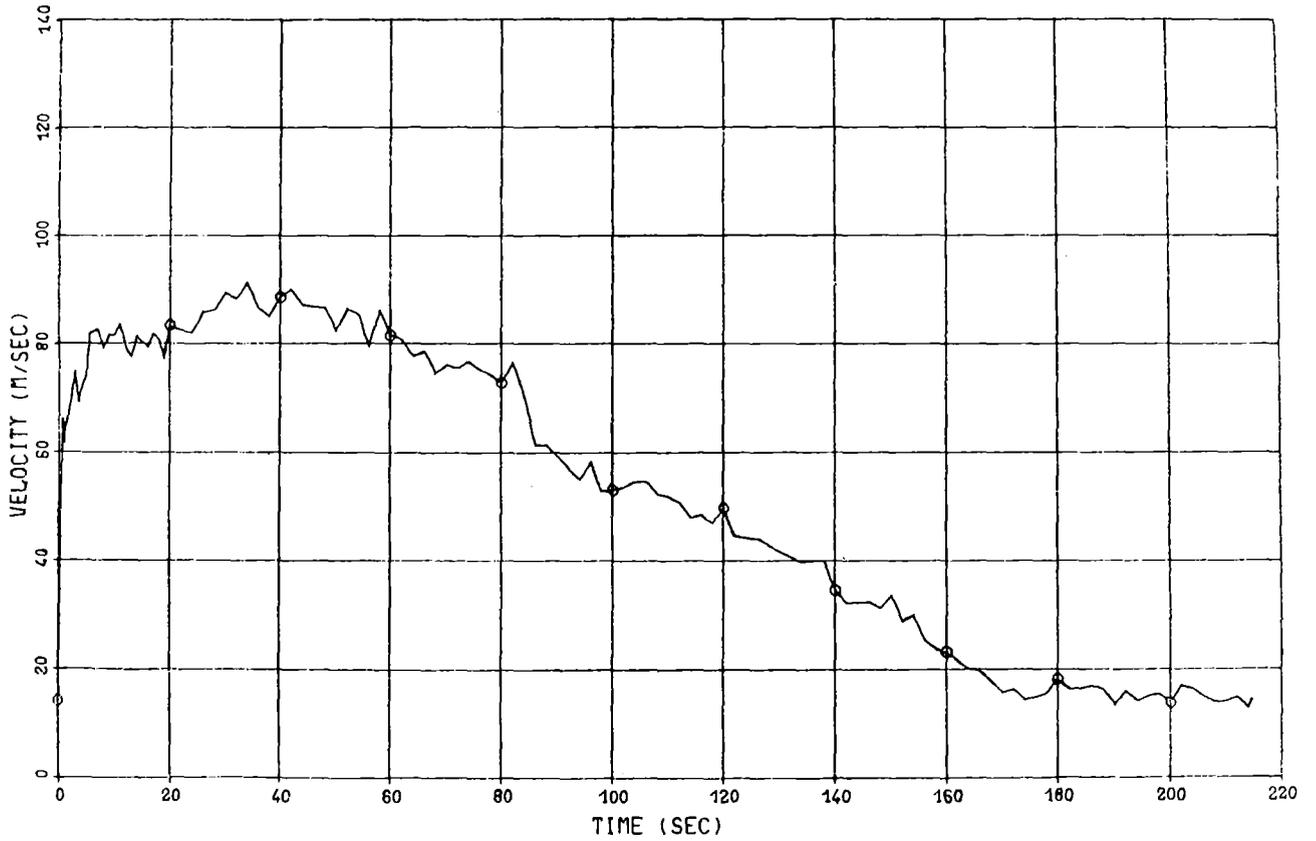
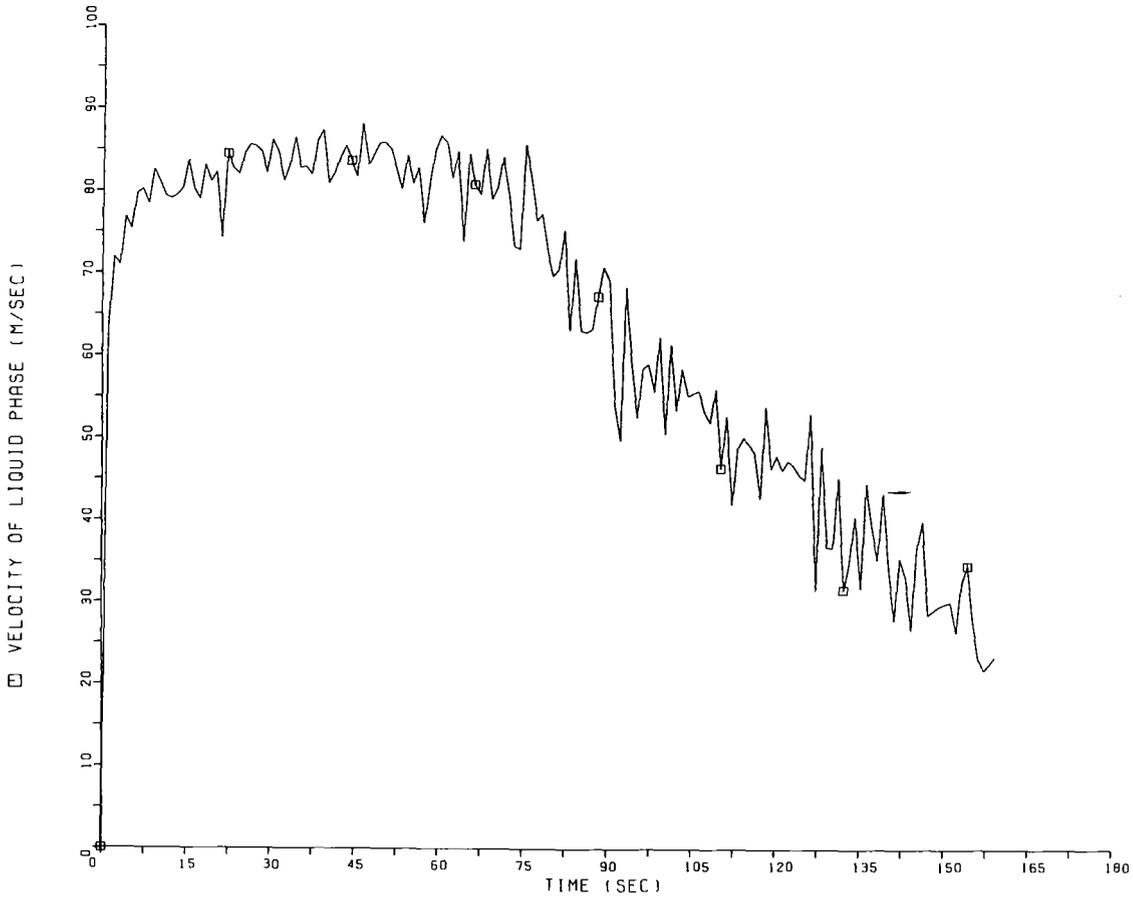


Bild 18: Tropfengeschwindigkeit bei Blowdown 24
(Auswertung ITS oben, Marviken-Projekt unten)

7.1 Startphase des Blowdown 18

Es handelt sich um einen Blowdown ohne prepurging, bei dem Wasser aus dem Reaktordruckbehälter (RDB) durch einen Rohrstutzen mit einem Durchmesser von 280 mm in das kalte Containment (104,5kPa, 19,9°C) abgeblasen wurde. Im RDB herrschte zu Beginn ein Druck von 4,64 MPa und eine Temperatur von 259°C. Die Blaszeit betrug 171 sec. Am Ort der IR-Meßeinrichtung stieg der Gesamtdruck nach 0.4 sec ab Blowdownstart oszillierend und ab etwa 2 sec monoton steigend an, Bild 19.

Der Temperaturverlauf zeigt zwei ausgeprägte Anstiege bei 2,2 sec und bei 4,1 sec nach Blowdownstart. Anhand der IR-Signale, Bild 20, der Dampfdichte ρ_D und Wasserkonzentration \bar{w} , Bild 21 sowie der Partialdrücke p_D und p_L , Bild 22, können diese wie folgt interpretiert werden:

Bis 2,2 sec strömt Luft bei ansteigenden Druck- und Temperaturwerten.

Bei $t=2,2$ sec trifft die Dampffront am Ort der IR-Meßeinrichtung ein. An der Grenzfläche Luft-Dampf hat sich durch Heterogenkondensation ein Tröpfchennebel mit sehr geringer Gesamtwasserkonzentration gebildet.

Ab 2,5 sec entsprechen die gemessenen Temperaturwerte und die nach Gl.(19) berechneten Wasserdampfpartialdruckwerte innerhalb der Meßgenauigkeit dem Sättigungszustand (Dampftafelwerte). Ab 4,1 sec nimmt der Tropfenradius bei einer mittleren Konzentration $N \approx 10^9 \text{ (m}^{-3}\text{)}$ stetig zu.

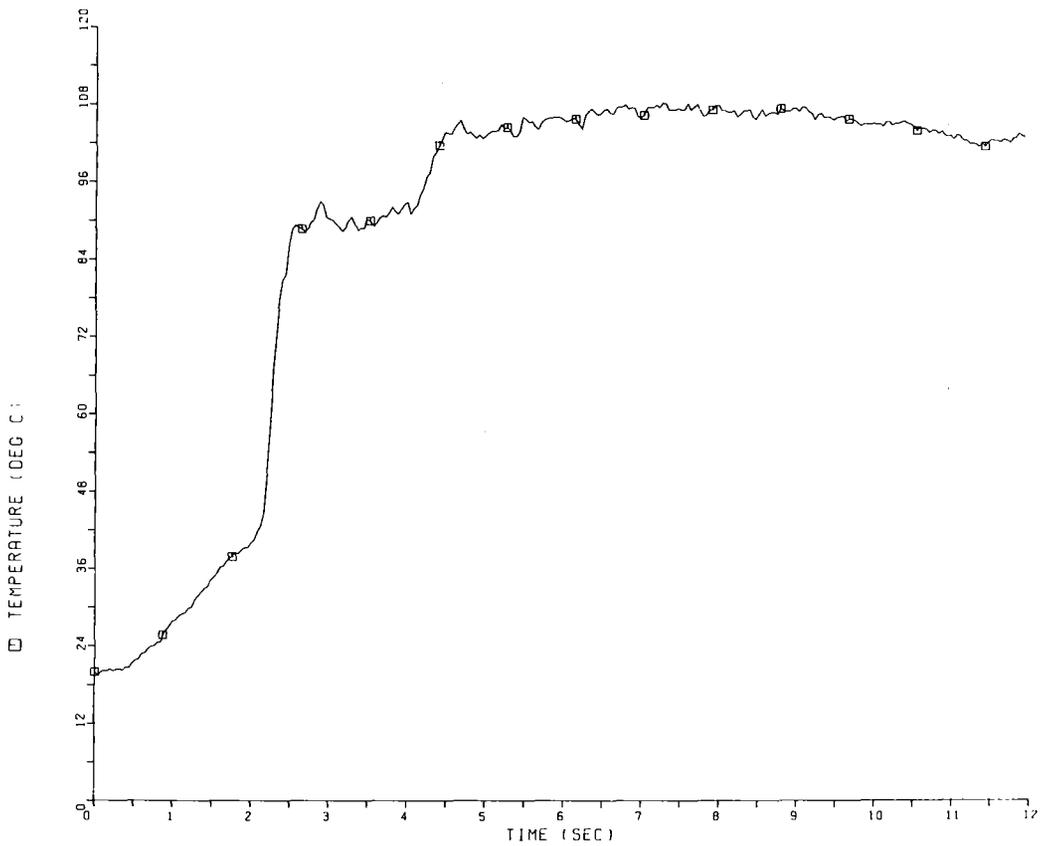
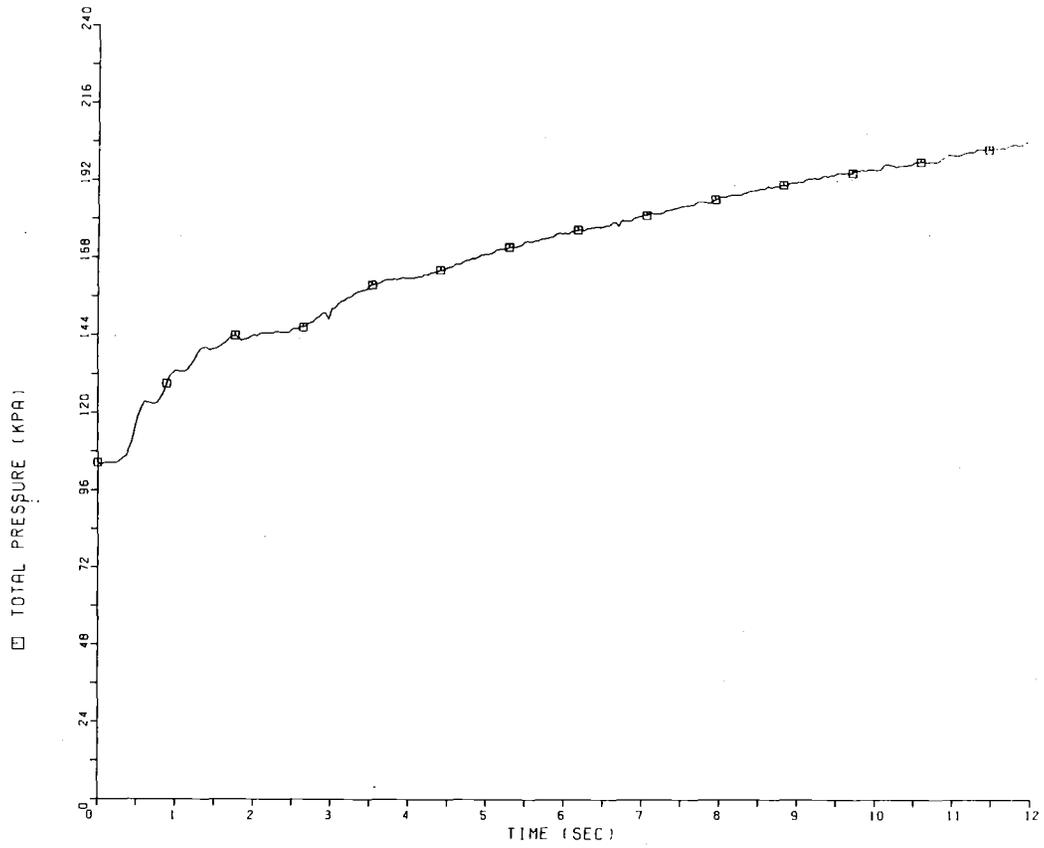


Bild 19: Druck - (oben) und Temperaturverlauf (unten) während der Startphase bei Blowdown 18

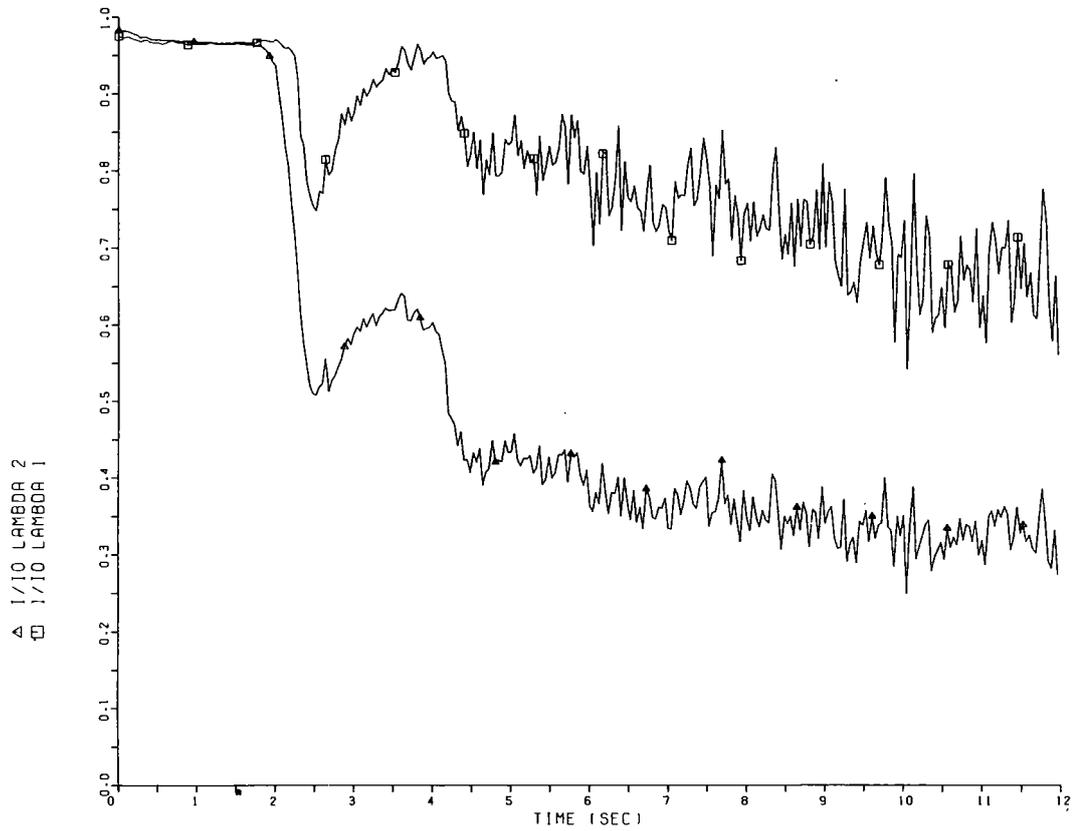


Bild 20: Verlauf der IR-Signale während der Startphase bei Blowdown 18

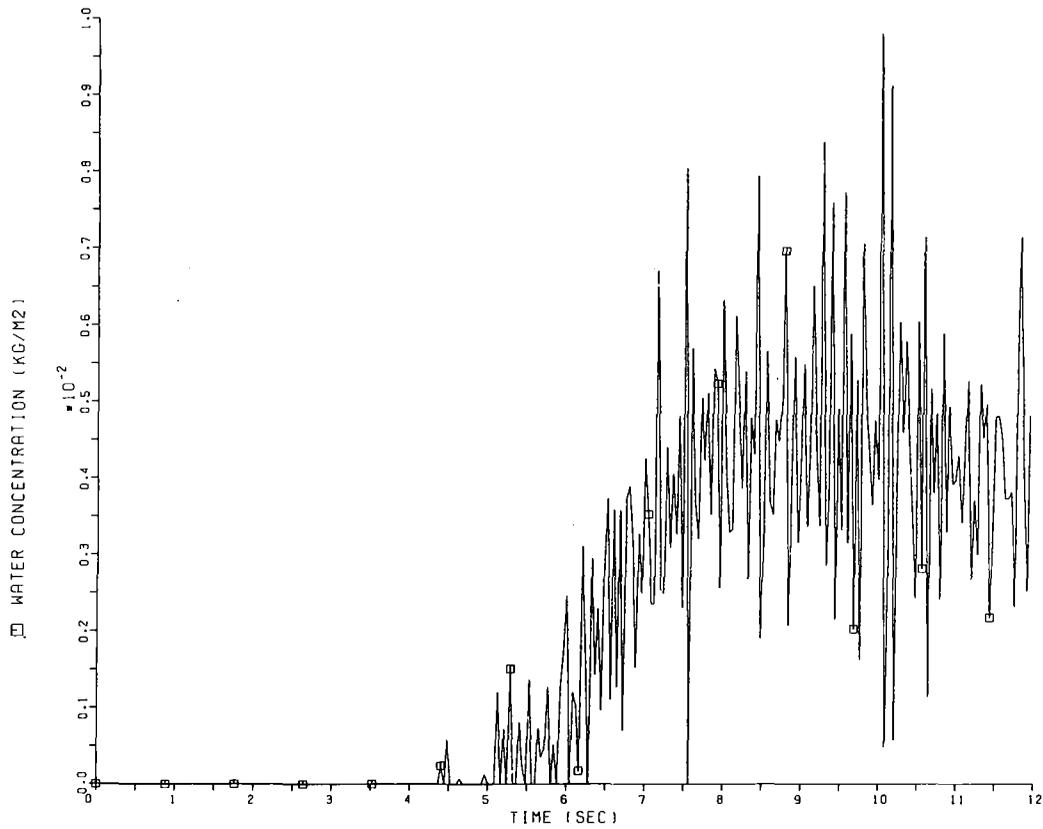
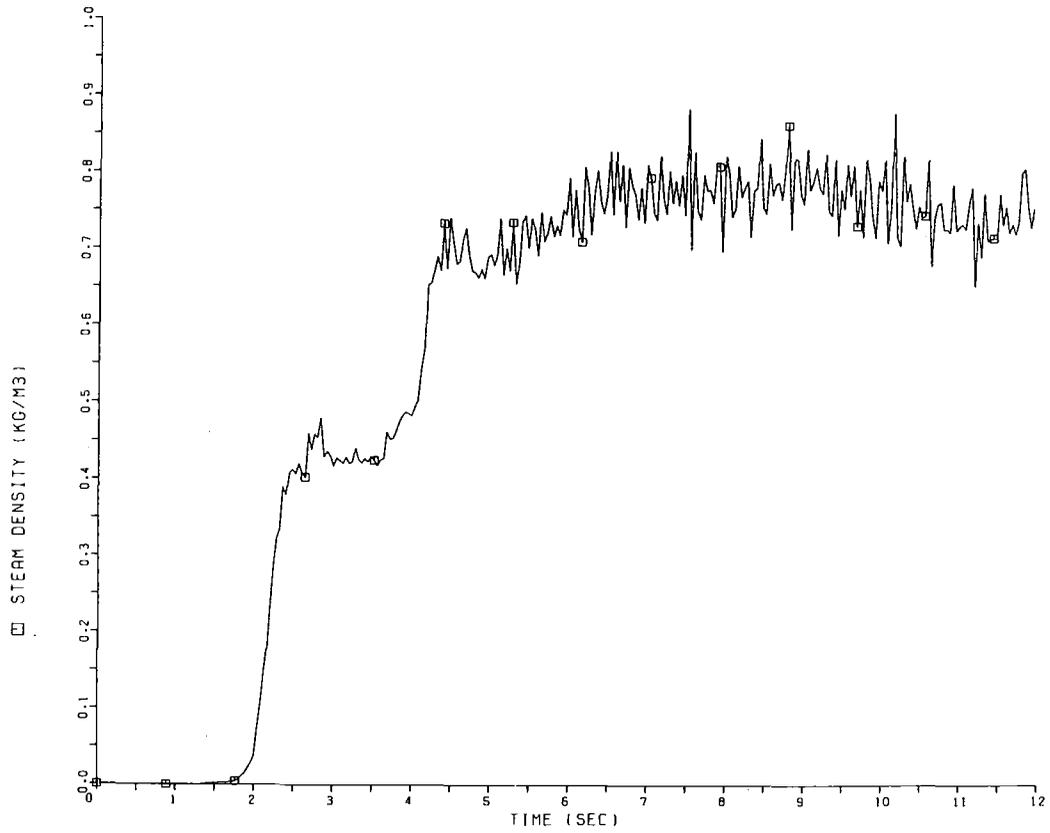


Bild 21: Verlauf der Dampfdichte (oben) und Wasserkonzentration (unten) während der Startphase bei Blowdown 18

BLOWDOWN : 18.
ITS. UNI. KARLSRUHE

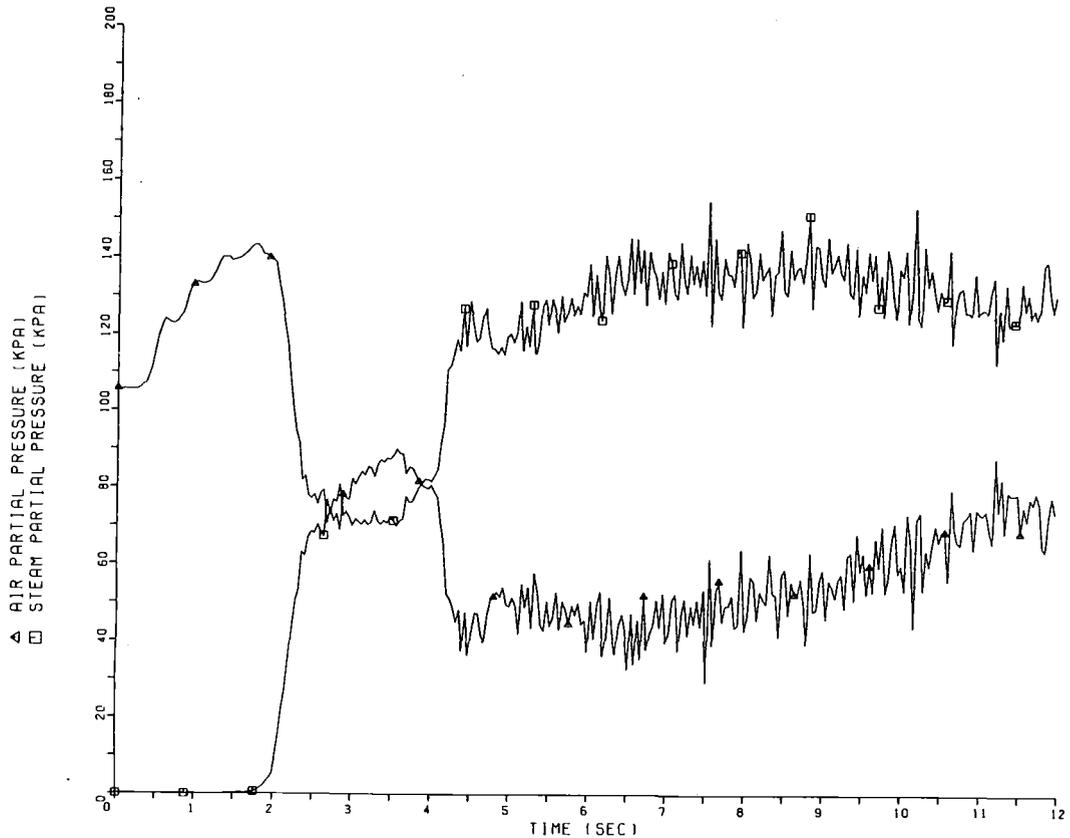


Bild 22: Verlauf der Partialdrücke für Dampf und Luft während der Startphase bei Blowdown 18

7.2 Mittlere Tropfengröße

Für Blowdown 18 und Blowdown 20 (Versuch mit "prepurging") wird zu verschiedenen Zeitpunkten nach Blowdownstart der mittlere Tropfenradius nach der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Absorptionsquotientenmethode bestimmt und die zugehörige Tropfenzahl N aus der Referenzmessung bei λ_1 berechnet. Mit bekanntem r und N können wir die Wasserkonzentration \bar{w} nach dem Tropfenmodell bestimmen und mit der nach dem Schichtdickenmodell ermittelten Wasserkonzentration vergleichen.

7.2.1 Bestimmung des mittleren Tropfenradius und der Tropfen-
zahl nach der Absorptionsquotientenmethode (Tropfenmodell).

Die Berechnung der mittleren Tropfenradien erfolgt nach Gl.13, wobei eine zusätzliche Dampfabsorption bei λ_3 entsprechend Gl.15 berücksichtigt wird. Der Quotient $Q_{\text{sca}}(r, \lambda_1)/Q_{\text{abs}}(r, \lambda_3)$ hat bei $r=2\mu$, Bild 5a, ein ausgeprägtes Maximum. Somit erhält man zu einem Ordinatenwert zwei Schätzwerte r_1 und r_2 für den mittleren Tropfenradius.

Für beide Radien werden aus Gl.1

$$N_i = \frac{\ln(I_o/I)_{\lambda_1}}{\pi \cdot r_i^2 \cdot Q_{\text{ext}, \lambda_1} \cdot l} \quad i=1,2 \quad (27)$$

die zugehörigen Tropfenzahlen N_1 bzw. N_2 berechnet.

Als Lösung für die Bestimmung von r und N erhält man:

- 1.) einen kleinen Radius r_1 und eine große Tropfenzahl N_1
- und 2.) einen großen radius r_2 und eine kleine Tropfenzahl N_2

Anhand zusätzlicher Intensitätsmessungen im sichtbaren Wellenlängenbereich (Extinktion nur durch Streuung an den Wassertröpfchen) kann eine eindeutige Lösung für das Problem der Bestimmung von Tropfenradius und Tropfenzahl angegeben werden, da entweder r_1 und N_1 oder r_2 und N_2 folgende Gleichung erfüllen müssen:

$$\ln\left(\frac{I_o}{I}\right)_{\lambda_k} = N_i \cdot \pi r_i^2 \cdot Q_{\text{ext}}(\lambda_k, r_i) \cdot l \quad (28)$$

$i = 1,2$
 $k = \text{Index für Wellenlänge im sichtbaren Bereich}$

Diesen Gleichungen genügen nur die Lösungen für den größeren Tropfenradius und die kleinere Tropfenzahl.

7.2.2 Bestimmung der Wasserkonzentration nach dem Tropfenmodell und Vergleich mit der Wasserkonzentrationsbestimmung nach dem Schichtdickenmodell

Aus Gl.8 mit Gl.9 ergibt sich für die auf die Flächeneinheit bezogene Wassermasse \bar{w}

$$\bar{w} = \rho_w \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot N \quad (29)$$

Die Wasserkonzentration \bar{w} nach dem Schichtdickenmodell berechnet sich nach Gl.8 und Gl.15 aus

$$\bar{w} = \rho_w \cdot C_2 \cdot \left[\ln \frac{(I_o/I)^{\lambda_3}}{(I/I_o)^{\lambda_1}} - C_3 \cdot \ln \frac{(I_o/I)^{\lambda_2}}{(I_o/I)^{\lambda_1}} \right] \quad (30)$$

Blowdown 18, Bild 23

Der mittlere Tropfenradius in der Kernströmung beträgt nach Blowdownstart etwa 6 bis 10 μm und steigt nach 30 sec auf Werte zwischen 20 und 25 μm an. Die nach dem unkorrigierten Schichtdickenmodell errechnete Wasserkonzentration liegt etwa 10 bis 15 % niedriger als die nach dem Tropfenmodell berechnete.

Blowdown 20, Bild 24

Bei diesem Blowdown wurde vor dem eigentlichen Beginn Dampf in das Containment abgeblasen, um den Luftanteil zu verringern ("prepurgung"). Während der prepurgung-Phase wurde die Zusammensetzung des Fluids von der IR-Meßeinrichtung gemessen. Bei Blowdownstart betrug der Wasserdampfpartialdruck $p_D=1.115$ bar, die Temperatur $T=114.7^\circ\text{C}$ und der Luftpartialdruck $p_L=0.7$ bar. Der Blowdownchannel war mit einem Tropfennebel mit mittleren Tropfenradien von etwa 62 μm angefüllt. Nach Blowdownstart verringerte sich der Tropfenradius in der ersten Dampffront auf 11 μm , um im Verlauf des Experiments wieder auf Werte bis 34 μm anzusteigen. Auch hier liegt die

Wasserkonzentration nach dem Schichtdickenmodell um 10-15 % zu niedrig.

Bei den angegebenen Tropfenradien handelt es sich um Mittelwerte für die Kernströmung. Eine spektrale Verteilung der Radien wurde nicht berücksichtigt.

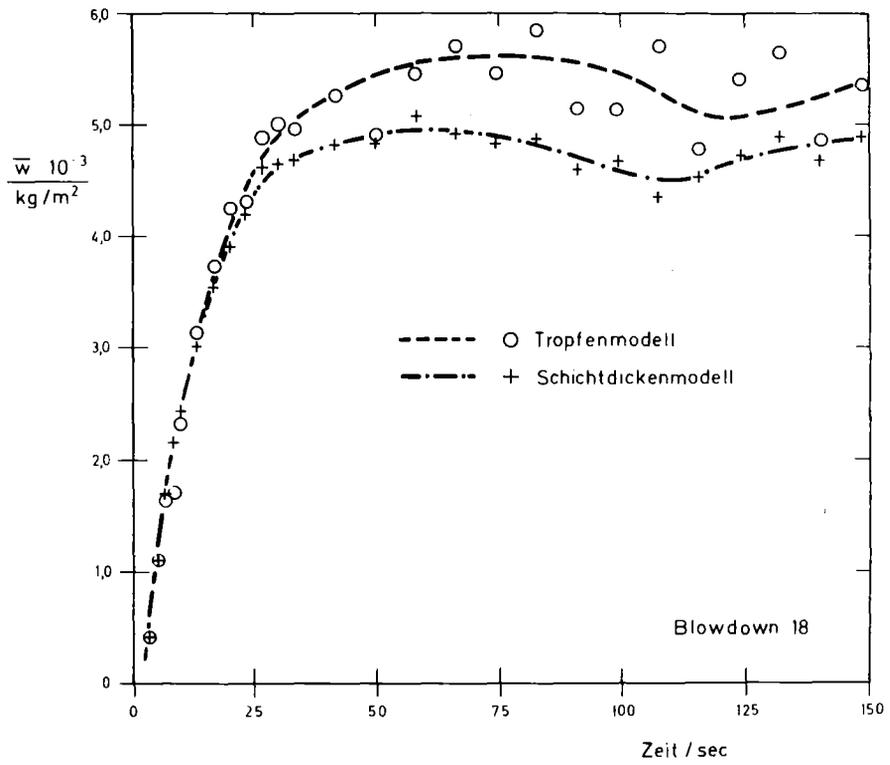
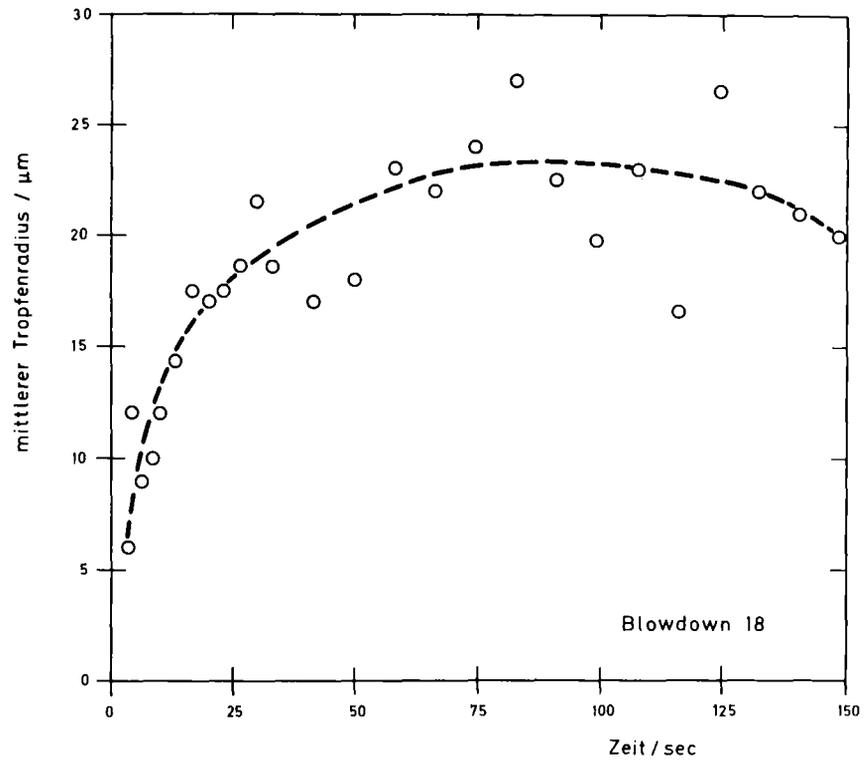


Bild 23: Mittlerer Tropfenradius (oben) und Wasserkonzentration (unten) bei Blowdown 18

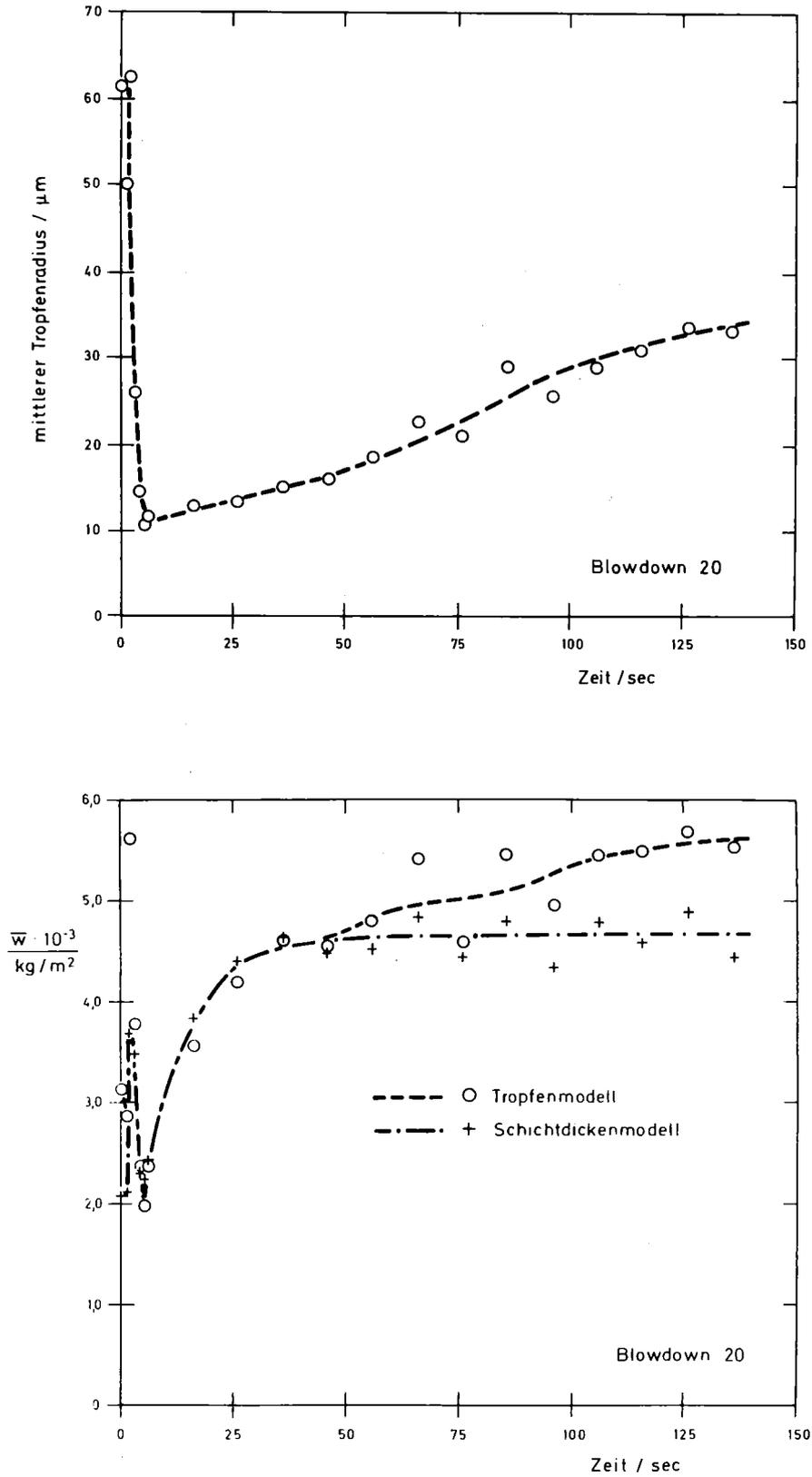


Bild 24: Mittlerer Tropfenradius (oben) und Wasserkonzentration (unten) bei Blowdown 20

7.3 Massenstromoszillationen

Bei verschiedenen Blowdowns der ersten Marvikenversuchsserie traten periodische Druck- und Temperaturschwankungen in den Überströmrohren (vent channels), der Verteilerkammer (vent header) und den Verteilerrohren (vent pipes) auf, Bild 7. Sie werden durch die Geometrie des gesamten Druckabbausystems (z.B. der Gesamtfläche der Abblaserohre, der Eintauchtiefe der Abblaserohre in die Wasservorlage, der Gesamtoberfläche der Wasservorlage) und durch die Zusammensetzung des Fluids -vor allem durch den Luftanteil- beeinflusst. Die Beschreibung dieser Vorgänge setzt theoretische Modelle voraus, die durch Messungen an realen Systemen überprüft werden müssen.

Im folgenden wird eine Auswertung der IR-Meßdaten des Blowdown 18 für das Zeitintervall 95 sec $<t<$ 105 sec angegeben, die das Auftreten von Massenstromoszillationen mit einer Frequenz von 4,2 Hz in einem Überströmrohr erkennen läßt. Die hohe Zeitauflösung der Infrarotmeßeinrichtung erlaubt es, diese Oszillationen im einzelnen zu untersuchen.

7.3.1 Geschwindigkeitsschwankungen

Die Tröpfchengeschwindigkeit wird im angegebenen Zeitintervall nach Abschnitt 3 mit einer Auflösung von 10 Hz berechnet. Es zeigen sich periodische Geschwindigkeitsschwankungen um einen Mittelwert $u=38$ m/s, Bild 25. Nahezu gegenphasig finden sich diese Oszillationen in den Meßsignalen einer Infrarot-Meßebene, Bild 26.

7.3.2 Dampfdichte, Wasserkonzentration und abgeleitete Größen

Die direkten Meßgrößen Dampfdichte ρ_D und Wasserkonzentration \bar{w} oszillieren mit derselben Frequenz um entsprechende Mittelwerte, Bild 27. Da auch die Temperatur- und Druckmeßwerte, Bild 28, entsprechend schwanken, ergeben sich auch für die abgeleiteten Meßgrößen Dampf- und Luftpartialdruck, Bild 29, Dampf-, Luft- und Wassermassenströme, Bilder 30 bis 32, diese Oszillationen. Mit der Infrarotmeßeinrichtung können damit

erstmalig die den entsprechenden Mittelwerten überlagerten periodischen Massenstromschwankungen nachgewiesen werden. Bei den weiteren Blowdownversuchen der Marviken-MXII-Serie traten bei veränderter Geometrie des Druckabbausystems auch höherfrequente Massenstromoszillationen mit Frequenzen bis zu 8 Hz auf, teilweise auch während der "prepurgung"-Phase. Sie können im Rahmen dieses Berichts nicht im einzelnen behandelt werden.

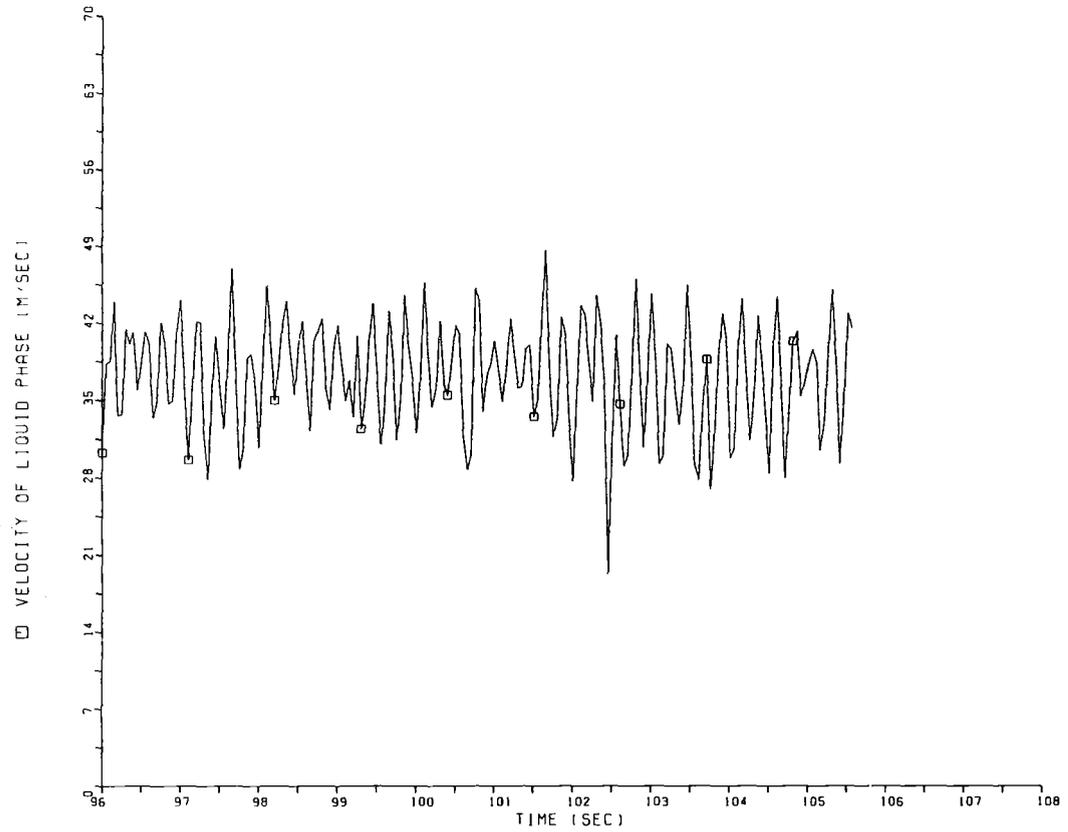


Bild 25: Periodische Geschwindigkeitsschwankungen bei Blowdown 18

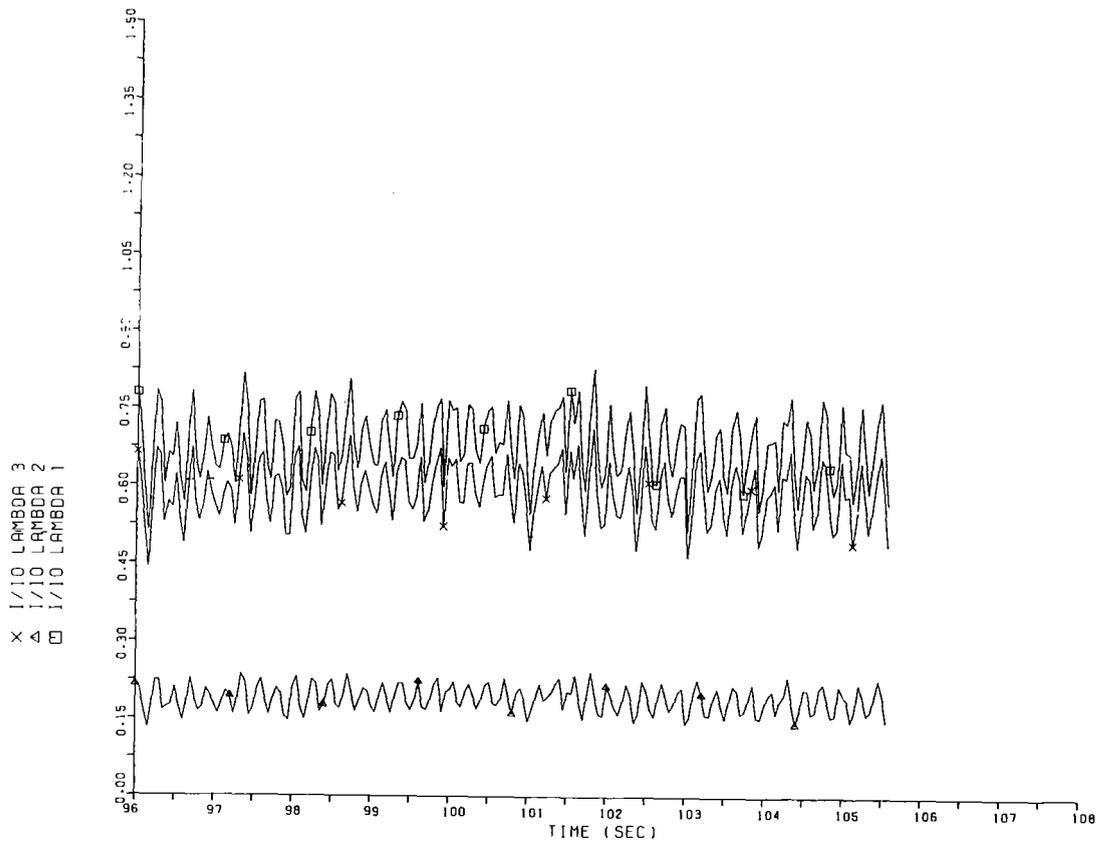


Bild 26: Oszillationen in den Meßsignalen einer IR-Meßebeine bei Blowdown 18

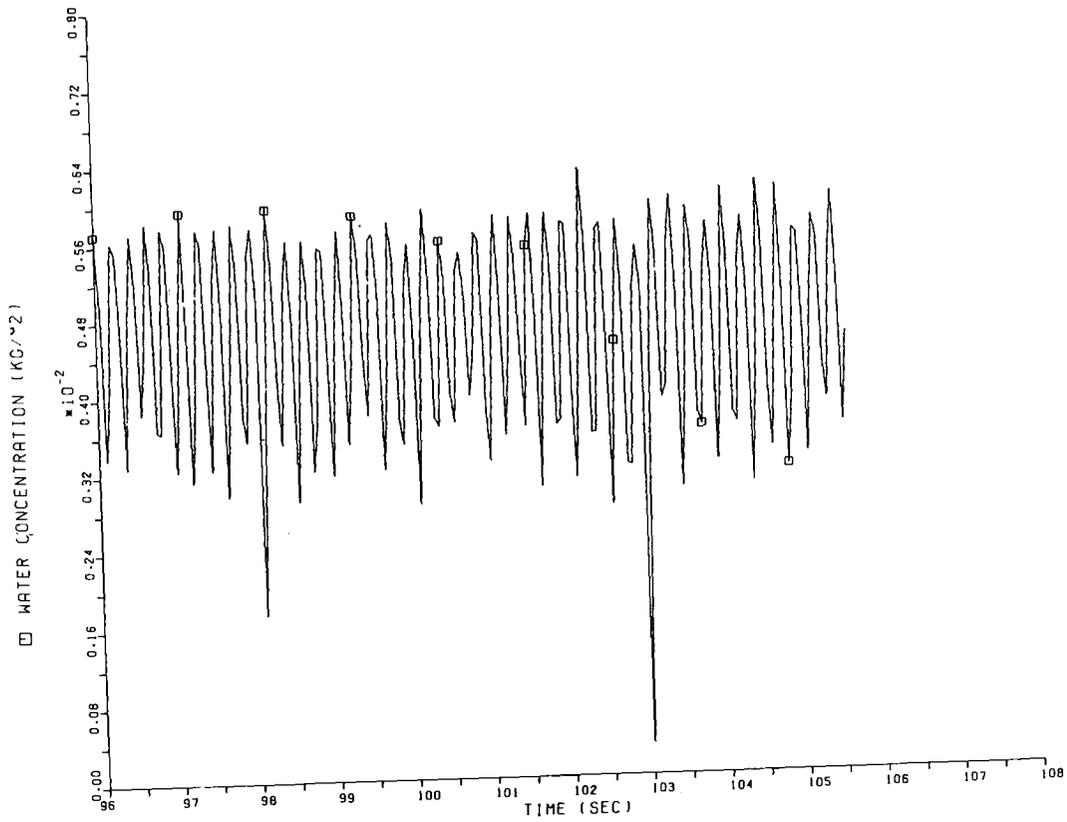
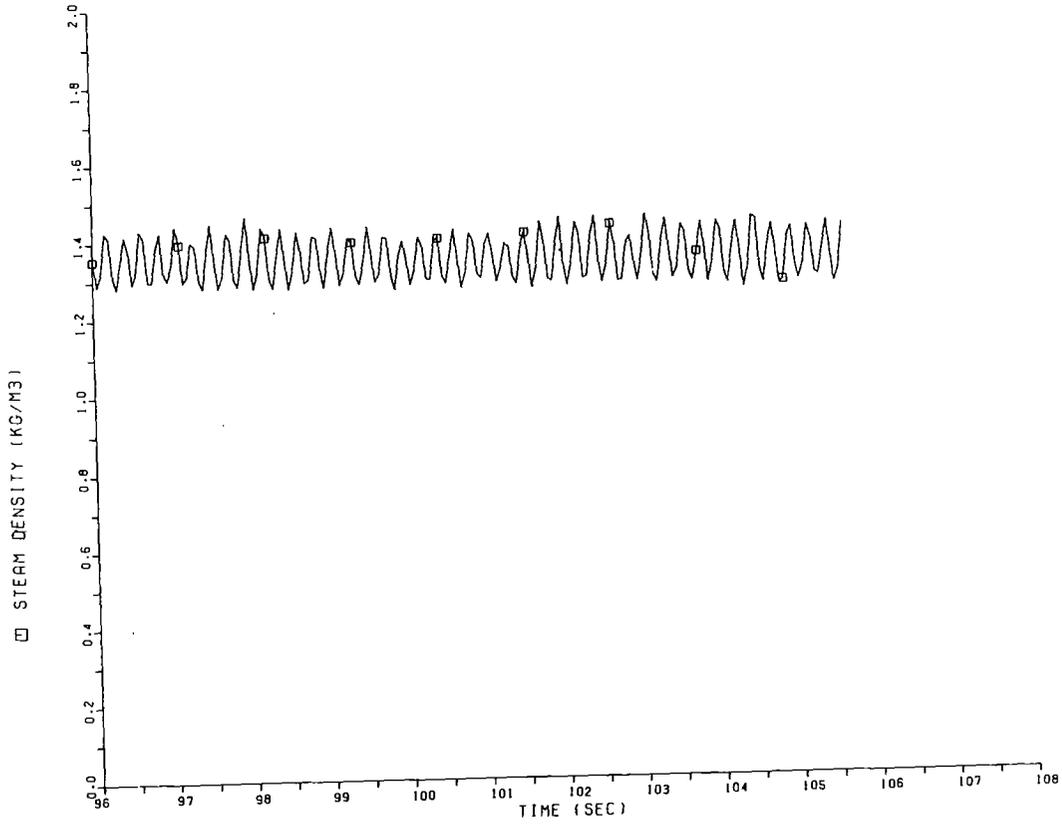


Bild 27: Periodische Schwankungen der Dampfdichte (oben) und Wasserkonzentration (unten) bei Blowdown 18

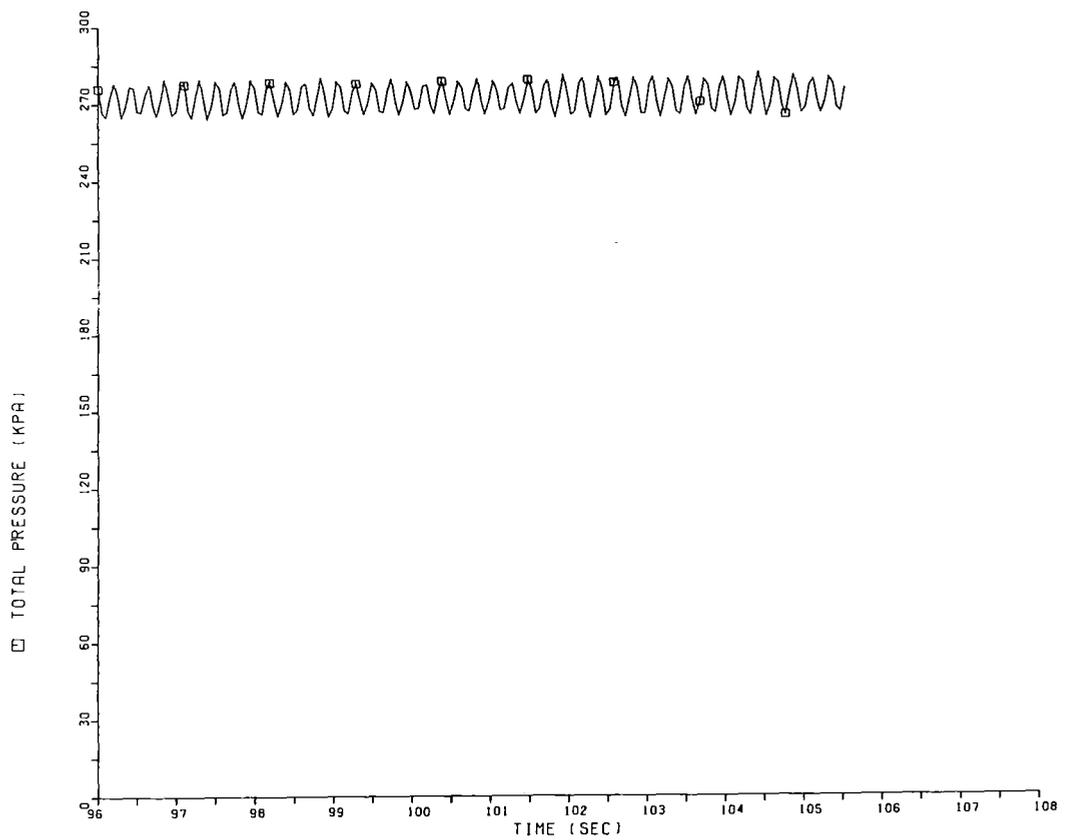
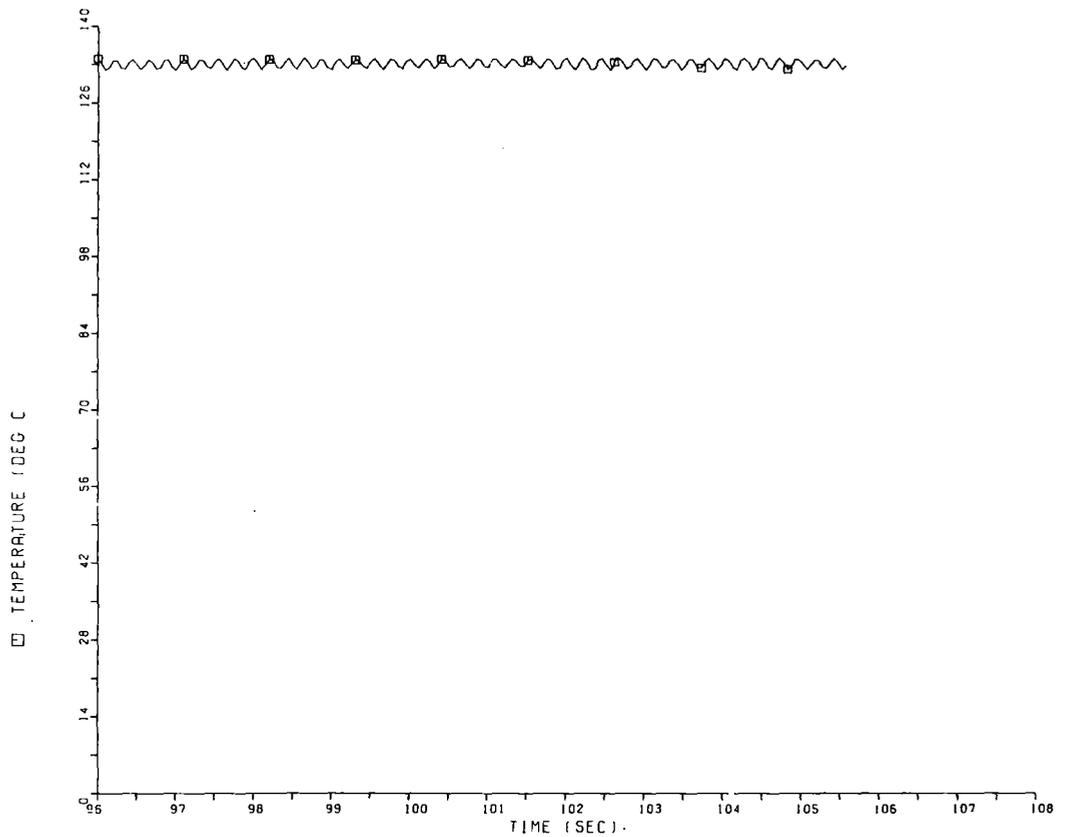


Bild 28: Oszillationen in den Temperatur - (oben) und Druckmeßwerten (unten) bei Blowdown 18

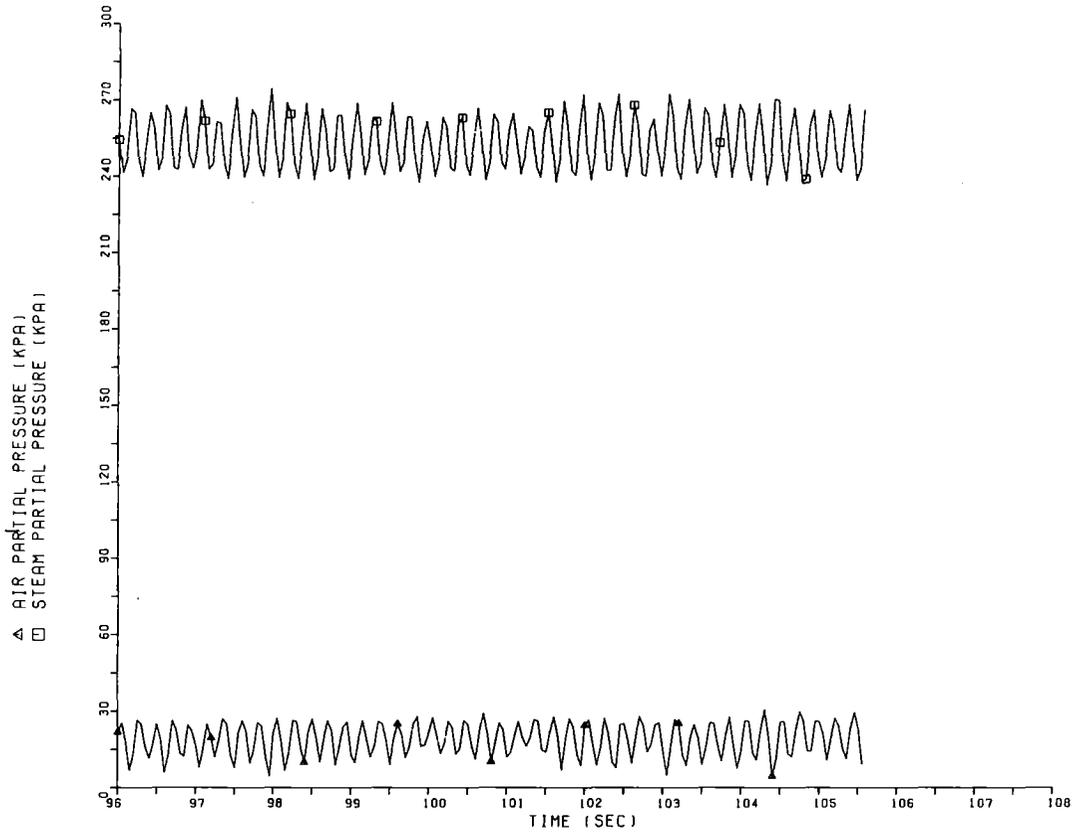


Bild 29: Periodische Schwankungen der Partialdrücke von Dampf und Luft bei Blowdown 18

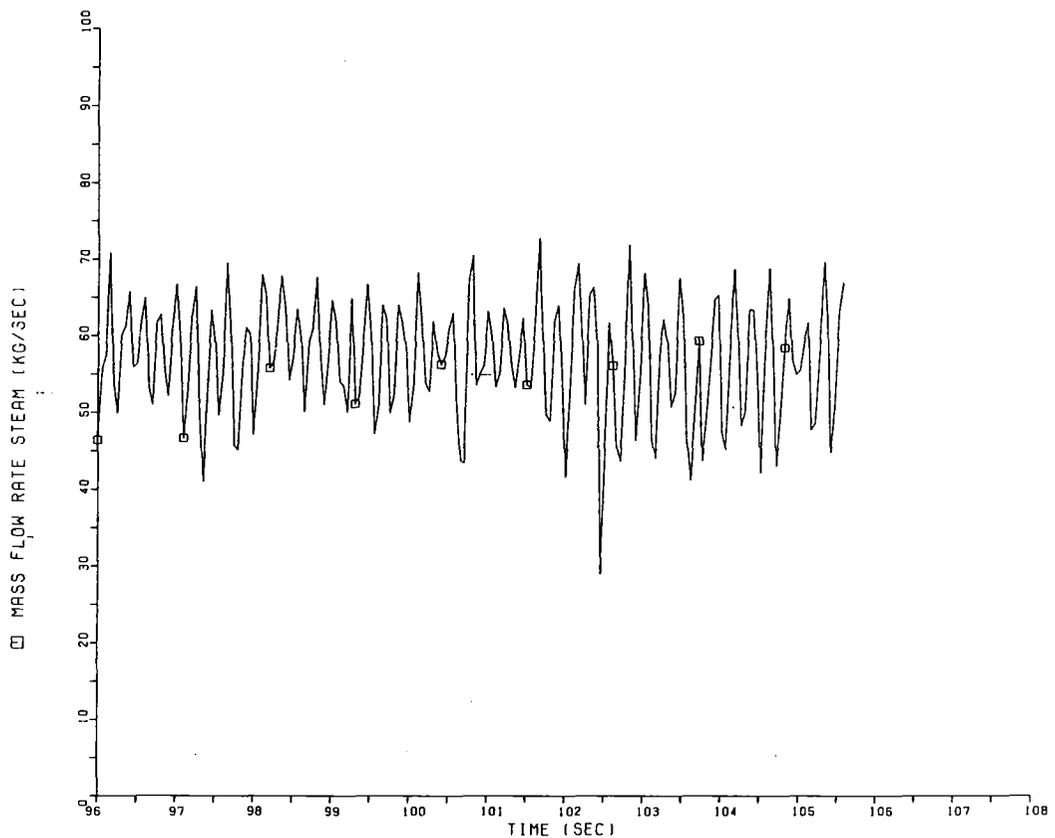


Bild 30: Oszillationen des Dampfmassenstroms bei Blowdown 18

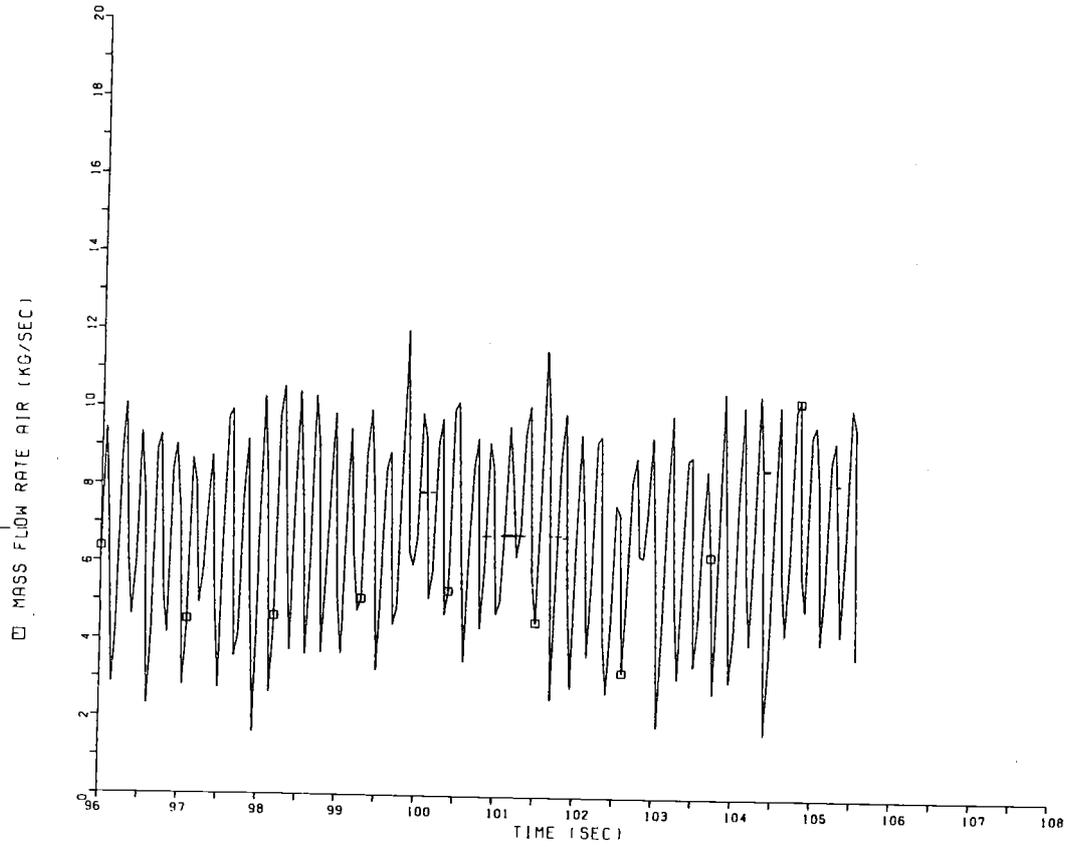


Bild 31: Oszillationen des Luftmassenstroms bei Blowdown 18

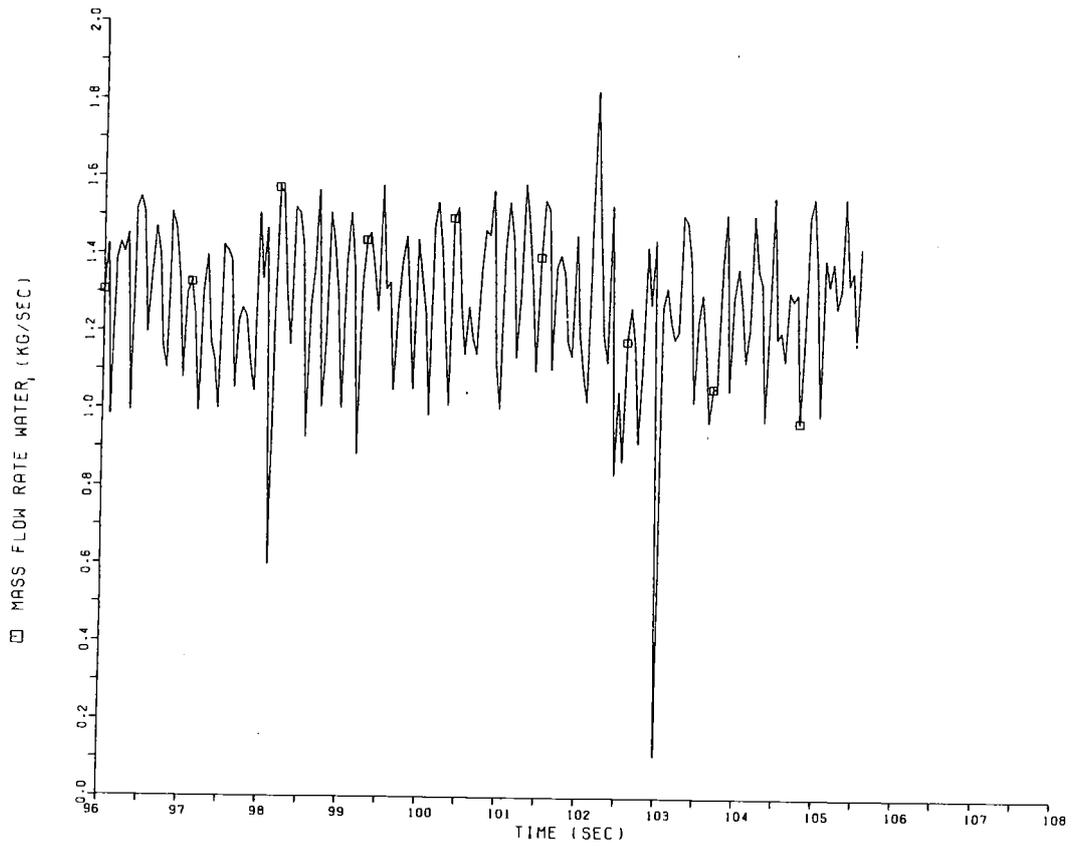


Bild 32: Oszillationen des Wassermassenstroms bei Blowdown 18

8. Zusammenfassung

Die im Rahmen des Projekts Nukleare Sicherheit gemeinsam vom ITS und IRE entwickelte Infrarotmeßeinrichtung konnte bei allen Versuchen der Marviken-MXII-Serie erfolgreich eingesetzt werden. Die Ergebnisse bestätigten die bei der Voruntersuchung [1] gewonnenen Erkenntnisse.

Durch selektive Transmissionsmessungen erlaubt die Meßeinrichtung die getrennte Angabe der Dampfdichte, der Wasserkonzentration sowie über die Korrelationsmethode die Berechnung der Tropfengeschwindigkeit. Als abgeleitete Größen ergeben sich die Partialdrücke sowie die Massenströme der Mehrkomponenten/Zweiphasenströmung. Die erzielte Meßgenauigkeit wird in einer Fehleranalyse behandelt.

Die hohe Zeitauflösung ermöglicht außerdem verschiedene Sonderauswertungen wie die Untersuchung der Blowdownstartphase mit dem Eintreffen der ersten Dampffront und die Analyse periodischer Massenstromschwankungen während einzelner zeitlicher Phasen eines Blowdownversuchs. Durch die Anwendung einer neuen Absorptionsquotientenmethode kann darüber hinaus die mittlere Tropfengröße bestimmt werden.

Mit der Infrarotmeßeinrichtung wurden die Strömungsparameter in der Kernströmung eines der Überströmkanäle im Druckabbau-system des Marviken-Reaktors gemessen. Bei einem Vergleich der Meßergebnisse mit anderen integralen Meßwerten muß zusätzlich zur unterschiedlichen Zeitauflösung überprüft werden, ob die Annahme gleicher Strömungsverhältnisse in allen vier Überströmkanälen zulässig ist. Außerdem muß eine -bisher meßtechnisch nicht erfaßte- Wasserfilmströmung an den Kanalwänden berücksichtigt werden.

9. Formelzeichen

A	Strömungsquerschnitt des Blowdownchannels
$A_{\text{meß}}$	Querschnittsfläche im Meßvolumen
C_1, C_2, C_3	Apparatekonstanten der IR-Meßeinrichtung
d	Abstand der beiden Meßebenen
i	imaginäre Einheit
I	Intensität
l	optische Meßlänge
m	komplexer Brechungsindex
\dot{m}	Massenstrom
n	Brechungsindex (Realteil)
N	Tropfenkonzentration
p	Druck
Q	Wirkungsquerschnitt
r	Tropfenradius
R	individuelle Gaskonstante
$s_{\text{äq}}$	äquivalente Wasserschichtdicke
t	Zeit
T	Temperatur
u	Strömungsgeschwindigkeit
V	Volumen
\bar{w}	flächenbezogene Wassermasse
Y	Korrekturfaktor
Z	Anzahl der Teilchen im Meßvolumen
α	Teilchenparameter, Gasvolumenfaktor
ϵ	Absorptionskonstante für Wasserdampf
κ	Absorptionsindex
λ	Wellenlänge
ρ	Dichte
τ	Laufzeit
ϕ^+	normierte Kreuzkorrelationsfunktion

Indices

abs	Absorption	D	Dampf
ext	Extinktion	L	Luft
sca	Streuung	W	Wasser
		o	Anfangszustand

10. Literatur

1. Barschdorff, D., Wolf, E.: Infrarotmeßtechnik für Zweiphasen-Mehrkomponenten-Massenströme.
KTG-Fachtagung "Experimentiertechnik auf dem Gebiet der Reaktor-Fluidodynamik", Berlin, 10.-12.März 1976.
2. Barschdorff, D., Class, G., Löffel, R., Reimann, J.:
Mass Flow Measuring Techniques in Transient Two Phase Flow Specialists' Meeting on Transient Two Phase Flow OECD Nuclear Energy Agency, Toronto (Canada), August 3 and 4, 1976
3. Barschdorff, D., Neumann, M.: Anpassung der Infrarot-Massenstrommeßeinrichtung an die HDR-Versuchsbedingungen.
Intern.Bericht Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe und Projekt HDR, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe, Oktober 1976.
4. Jaffé, G.: Dispersion und Absorption
Handbuch der Physik, Bd.13.
5. Kerker, M.: The Scattering of Light and other electromagnetic Radiation
Academic Press, New York 1969.
6. Palmer, K.F., Williams, D.: Optical properties of water in the near infrared.
Journal of the Optical Society of America, Vol.64, 8, S.1107-1110.
7. Wickramasinghe, N.C.: Light Scattering Functions for Small Particles.
London: Hilger 1973.
8. Teorell, T.: (1931), Kolloid-Z. 54, 58, S.150
9. Evva, F.: (1953), Kolloid-Z. 133, 79
10. Lester, T.W., Wittig, S.L.K.: Particle Growth and Concentration Measurements in Sooting Homogeneous Hydrocarbon Combustion Systems.
Combustion Laboratory School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
11. Greenberg, M.: An Infrared Instrument for the Quality of Steam in: Wexler, A. and Ruskin, R.E., Humidity and Moisture, Vol.1 New York 1965, Reinhold Publishing Corp.
12. Lange, F.H.: Signale und Systeme, Bd.3 (Regellose Vorgänge)
VEB Verlag Technik Berlin 1973.

13. Mesch, F., Daucher, H.-H., Fritsche, R.:
Geschwindigkeitsmessung mit Korrelationsverfahren
Messtechnik 79 (1971) S.152-157 und 163-168.
14. Mesch, F., Kippahn, H.: Solids flow measurement by
correlation methods
Opto-electronics 4 (1972) S.451-462.
15. Löffel, R.: Durchflußmessung mit Radiotracern
VDI-Bericht Nr. 254 (1976).

11. Anhang

11.1 Fehleranalyse

Am Beispiel von Blowdown 18 wird zu verschiedenen Zeitpunkten nach Blowdownstart der maximale absolute Fehler für die Wasserdampfdichte ρ_D , die Partialdrücke p_D und p_L , die Strömungsgeschwindigkeit u , sowie der Massenströme \dot{m}_D und \dot{m}_L angegeben. Für die Apparatekonstanten der IR-Meßeinrichtung werden dabei folgende Fehler angenommen:

Konstante zur Bestimmung der Wasserdampfdichte:

$$c_1 = 0.1577 \pm 2 \% \quad [\text{kg/m}^2]$$

optische Meßlänge:

$$l = 0.15 \pm 5 \% \quad [\text{m}]$$

Für das Verhältnis der Extinktionskonstanten wird im Tropfenradienbereich von 5-30 μm eine mittlere Abweichung von $\pm 10\%$ vom Wert 1 (gleiche Extinktion) angenommen. Der Einfluß ungleicher Extinktion und eine Korrekturmöglichkeit werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Fehler in der Messung der Intensitätsverhältnisse, die sich für beide Wellenlängen λ_1 und λ_2 in gleicher Größe und Richtung auswirken (z.B. Scheibenverunreinigung, Schwankung der Lampenintensität) werden durch die Referenzmethode eliminiert. Der Fehler bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase ist mit $\pm 5\%$ angenommen.

Für die maximalen Abweichungen der Druck- und Temperaturwerte wurden die Angaben des Marviken Projekts zugrunde gelegt.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die absoluten maximalen Fehler die in Tabelle 1 angegebenen Werte.

Eine Fehlerabschätzung für die nach der IR-Methode bestimmte Wasserdampfdichte ist auch durch einen Vergleich mit den Werten aus der Dampftafel (Annahme von Sättigungsbedingungen) möglich. Diese Methode ist jedoch durch die Ungenauigkeiten in der Druck- und Temperaturmessung in ihrer Anwendung begrenzt.

Das folgende Beispiel zeigt, daß die gemessene Wasserdampfdichte sehr gut mit den Werten aus der Dampftafel übereinstimmt, wenn die gemessene Temperatur der Sättigungstemperatur entspricht.

Zeit [sec]	2.3	3.3	6.6	13.2	59.7
gemessener Gesamtdruck [kPa]	146.0	158.7	182.0	213.6	261.1
maximaler Fehler Δp [kPa]	± 8.1				
gemessene Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	88	89.9	108	115.6	127.5
maximaler Fehler ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	± 4.3				
Wasserdampfdichte ρ_D [kg/m^3]	0.118	0.378	0.714	0.951	1.396
maximaler Fehler $\Delta \rho_D$ [kg/m^3]	+0.011 -0.009	+0.039 -0.035	+0.085 -0.076	+0.110 -0.098	+0.149 -0.133
Wasserdampfpartialdruck p_D [kPa]	19.7	63.3	125.6	170.6	258.1
maximaler Fehler Δp_D [kPa]	+2.1 -1.7	+7.4 -6.5	+16.5 -14.6	+21.9 -19.3	+30.6 -27.1
Luftpartialdruck p_L [kPa]	126.3	95.4	56.4	43.0	3.0
maximaler Fehler Δp_L [kPa]	+9.8 -10.2	+14.6 -15.5	+22.7 -24.6	+27.4 -30.0	+35.2 -3.0
Luftdichte ρ_L [kg/m^3]	1.218	0.915	0.515	0.385	0.026
maximaler Fehler $\Delta \rho_L$ [kg/m^3]	+0.110 -0.111	+0.153 -0.157	+0.216 -0.228	+0.253 -0.270	+0.310 -0.026
Geschwindigkeit u [m/s]	32.6	29.7	38.1	43.5	46.0
maximaler Fehler Δu [m/sec]	± 1.6	± 1.5	± 1.9	± 2.2	± 2.3
Luftmassenstrom \dot{m}_L [kg/sec]	44.9	30.7	22.2	18.9	1.4
maximaler Fehler $\Delta \dot{m}_L$ [kg/sec]	+6.5 -6.1	+7.0 -6.5	+10.9 -10.4	+14.1 -13.5	+17 -1.4
Dampfmassenstrom \dot{m}_D [kg/sec]	4.4	12.7	30.8	46.8	72.6
maximaler Fehler $\Delta \dot{m}_D$ [kg/sec]	+0.6 -0.6	+2.0 -1.8	+5.3 -4.7	+8.0 -7.0	+11.8 -10.2

Tabelle 1: Zusammenstellung der absoluten maximalen Fehler

Zeit [sec]	Temperatur [°C]	Dampfdichte [kg/m ³] IR-Messung	Dampfdichte aus Temperaturmessung [kg/m ³] Werte aus Dampftafel (Sättigung)
6.6	108.0	0.714	0.776
13.2	115.6	0.951	0.980
59.7	127.5	1.399	1.395

Man kann deshalb davon ausgehen, daß die tatsächlichen Fehler erheblich kleiner sind, als die in Tabelle 1 angegebenen maximal möglichen Fehler.

Die Wasserkonzentration in der Kernströmung wurde nach dem Schichtdickenmodell bestimmt und für den gesamten Strömungsquerschnitt des Blowdownchannels unter der Annahme einer homogenen Verteilung der Wassertröpfchen berechnet. Es ist anzunehmen, daß dadurch ein beträchtlicher Wassermassenstrom, der als Film an der Channelwand abfließt, nicht berücksichtigt wurde. Eine Fehleranalyse für den Gesamtwassermassenstrom und ein Vergleich mit der integralen Wassermenge, die während des Versuchs durch die vier Blowdownchannels niederging, ist daher ohne eine Messung der Wasserfilmdicke nicht sinnvoll. Eine unabhängige Wasserkonzentrationsbestimmung aus der Tropfengröße und der Tropfenzahl ergibt eine gute quantitative Übereinstimmung mit der Wasserkonzentrationsbestimmung nach dem Schichtdickenmodell (siehe Abschnitt 7.2).

11.2 Einfluß der unterschiedlichen Extinktion durch die Wassertröpfchen.

Bei den Auswertalgorithmen für die Blowdownversuche wurde vorausgesetzt, daß die Streuanteile bzw. die Extinktion durch die Wassertröpfchen bei den verwendeten Wellenlängen gleich ist. In Bild 33 ist das Verhältnis $Q_{\text{ext}}(r, \lambda_2, m_2) / Q_{\text{ext}}(r, \lambda_1, m_1)$ für Tropfenradien von 1-50 μm aufgetragen. Die Voraussetzung gleicher Extinktion ist erst für Tropfenradien $>40 \mu\text{m}$ erfüllt.

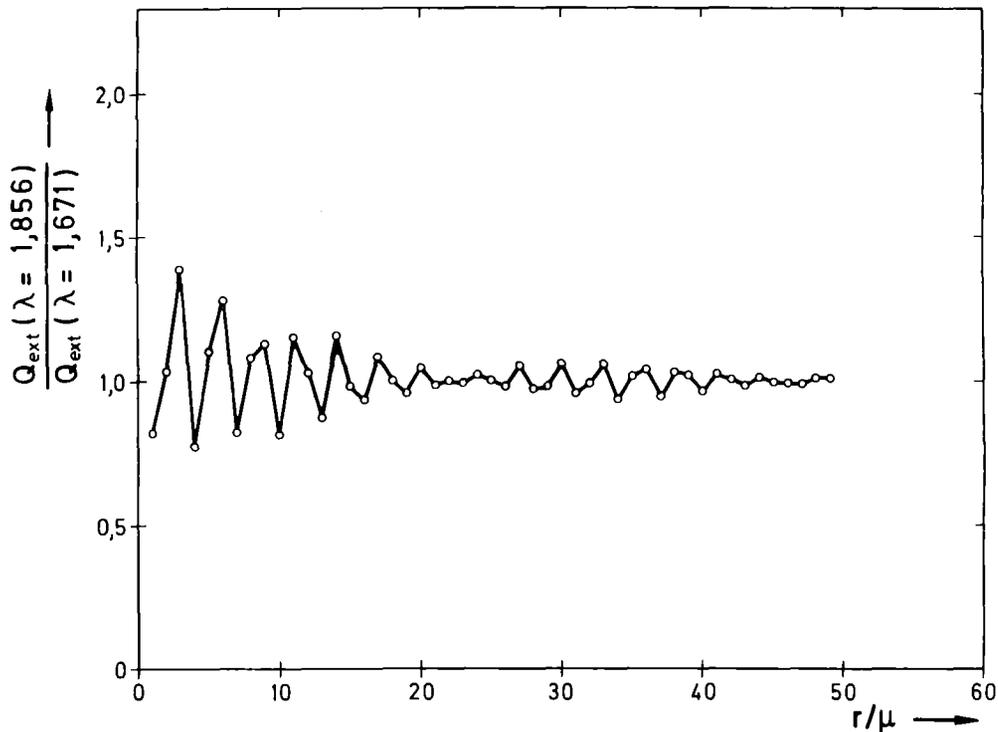


Bild 33: Verhältnis der Extinktionsquerschnitte für $\lambda=1.856 \mu\text{m}$ und $\lambda=1.671 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Tropfenradius r

Die unterschiedliche Extinktion bei Tropfenradien $< 40 \mu\text{m}$ kann bei der Berechnung der Wasserdampfdichte durch folgenden Ansatz berücksichtigt werden:

$$\rho_D = C_1 \cdot \frac{1}{I} \cdot \ln \frac{(I_0/I)_{\lambda_2}}{(I_0/I)_{\lambda_1}} \quad (31)$$

wobei

$$Y = \frac{Q_{\text{ext}}(r, \lambda_2, m_2)}{Q_{\text{ext}}(r, \lambda_1, m_1)} \quad (32)$$

einen Korrekturfaktor darstellt. Die Wirkungsquerschnitte für Extinktion können bei bekanntem Tropfenradius r berechnet werden. Unterteilt man die Abszisse in Bild 33 in vier Radienbereiche so ergibt sich -bezogen auf $Q_{\text{ext}}(r, \lambda_2, m_2)$ dividiert durch $Q_{\text{ext}}(r, \lambda_1, m_1)$ gleich eins- im jeweils ungünstigsten Fall die folgende prozentuale Abweichung:

Radienbereich [μm]	prozentuale Abweichung [%]
1 - 10	+ 39 - 23
11 - 20	+ 16 - 13
21 - 40	+ 6 - 6
> 40 μ	+ 0 - 0

Bei Blowdown 20 variieren die Tropfenradien von 10 - 60 μm . Diese Radien kann man den oben angegebenen Bereichen zuordnen und eine korrigierte Wasserdampfdichte nach Gl.31 berechnen. Diese Korrektur ergibt für die unter Voraussetzung gleicher Extinktion berechnete Wasserdampfdichte folgende maximale prozentuale Abweichung zu verschiedenen Zeitpunkten nach Blowdownstart:

t	berechnete Wasserdampfdichte (gleiche Extinktion)	maximale prozentuale Abweichung durch ungleiche Extinktion
[sec]	[kg/m ³]	[%]
1.0	0.7168	+ 0
5.0	0.5838	+ 9 - 16
36.0	1.3490	+ 6 - 7
106.0	1.2731	+ 2 -

Ein analoger Korrekturansatz ist auch bei der Berechnung der Wasserkonzentration möglich.