

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

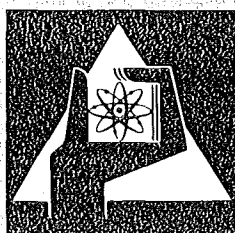
April 1975

KFK 2085

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

**Untersuchungen der Strömungsform,
des Druckabfalls und des kritischen Wärmeflusses
einer Zweiphasenströmung mit Natrium**

A. Kaiser, W. Pepler, L. Vöröss



**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 2085

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

Untersuchungen der Strömungsform, des Druckabfalls und des
kritischen Wärmeflusses einer Zweiphasenströmung mit Natrium

von

A. Kaiser

W. Pepler

L. Vöröss ^x

x Institut für Elektrische Energie (VEIKI), Budapest,
als Stipendiat des DAAD delegiert vom 1.10.72-31.7.73

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Kurzfassung

In einem Natrium-Siedekreislauf mit induktiv beheizter Teststrecke wurden weitere Versuchsreihen zum Na-Sieden durchgeführt, bei denen im Gegensatz zu früheren Versuchen [1] insbesondere auf die Erreichung eines quasistationären Zustandes geachtet wurde. In einer der Aufheizzone nachgeschalteten, adiabaten Meßstrecke wurden der Zweiphasendruckverlust und die Filmstärke bis hin zu den kritischen Kühlungsbedingungen gemessen. Diese Meßwerte wurden mit Rechenwerten verglichen, welche durch Anwendung bekannter Modelle zur Zweiphasenströmung erzielt wurden.

Der Vergleich zeigt, daß eine Vorhersage der Strömungsform, d.h. speziell der Verteilung der flüssigen Phase über den Strömungsquerschnitt, nur dann ein befriedigendes Ergebnis bringt, wenn der Zweiphasendruckverlustgradient genau bekannt ist. Dies gilt auch für den Grenzwert des Massendurchsatzes, nach dessen Unterschreiten Dryout auftritt. Die Strömungsformen der reinen Ringströmung bzw. der Ring-Nebelströmung wurden als dominierend gefunden.

Flow Pattern, Pressure Drop, and Critical Heat Flux of a Two-Phase Sodium Flow

Abstract

For further investigations of sodium boiling a new test series was carried out in a sodium boiling loop with an induction heated test section. Contrary to previous tests [1], special attention was paid to achieve quasi steady-state boiling conditions. In an adiabatic measuring section downstream of the heated zone the two-phase pressure loss and the film thickness were measured up to the critical cooling conditions. The experimental results are compared with values predicted by known models on two-phase flow.

The comparison yields that a prediction of the type of flow, especially the distribution of the liquid phase over the flow cross section, produces a satisfactory result only if the two-phase pressure loss gradient is known with sufficient accuracy. As a rule, the flow patterns of pure annular flow and annular mist flow proved to be dominating.

Moreover, measurements showed that also the boundary value for mass flow, falling below of which leads to dryout, can be estimated reliably only if the two-phase pressure loss is known.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Ziel und Schwerpunkt der Untersuchungen	1
2. Versuchsaufbau und -durchführung	2
2.1 Versuchsanlage	2
2.2 Teststrecke mit Instrumentierung	2
2.3 Filmstärkenmessung	4
2.4 Versuchsparameter (Übersicht)	6
2.5 Typischer Versuchsablauf	6
2.6 Datenerfassung und -verarbeitung	8
2.7 Fehlerabschätzung	9
3. Versuchsergebnisse	11
4. Diskussion der Versuchsergebnisse	12
4.1 Zweiphasenströmungsform	12
4.2 Zweiphasendruckverlust	13
4.3 Filmstärken und Tröpfchenanteil	18
4.3.1 Überblick	18
4.3.2 Vergleich mit dem Zweiphasenmodell nach Levy [7]	19
4.4 Vergleich mit reiner Ringströmung	23
4.5 Kritischer Wärmefluß	26
5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	29
6. Nomenklatur	30
7. Literaturverzeichnis	32

Tabellen

Abbildungen

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. Nr.	Titel
1	Fließbild des Natriumsiedekreislaufs (NSK)
2	Testanordnung
3	Konstruktiver Aufbau der Testanordnung
4	Filmstärken-Meßanordnung
5	Gemessener el. Widerstand R_{ges} bei verschiedenen definierten Filmstärken (Vorversuch)
6	Schema der Datenerfassung und -verarbeitung
7	Schematische Darstellung der Phasenbereiche bei reiner Ringströmung
8	Eintrittsgeschwindigkeit, Filmdicke und Temperaturen in Versuch Nr. 15/44
9	dto. Nr. 15/60
10	Letzte Versuchsphase bis zum Dryout für Versuch Nr. 15/44
11	dto. Nr. 15/60
12	Zweiphasen-Druckverlustmultiplikator ϕ_L als Fkt. des Lockhart-Martinelli-Parameters X_{LM}
13	Versuchsergebnisse von Lurie [10] mit siedendem Natrium
14	Radiale Geschwindigkeits- und Dichteverteilung im Testrohr (Längsschnitt)
15	F als Funktion des Dichteverhältnisses

Verzeichnis der Tabellen

- Tabelle 1: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte.
Heizflächenleistung $q = 272 \text{ W/cm}^2$
- Tabelle 2: dto. $q = 365 \text{ W/cm}^2$
- Tabelle 3: dto. $q = 432 \text{ W/cm}^2$
- Tabelle 4: dto. $q = 526 \text{ W/cm}^2$
- Tabelle 5: dto. $q = 629 \text{ W/cm}^2$
- Tabelle 6: dto. $q = 213$ bzw. 737 W/cm^2
- Tabelle 7: Geschwindigkeiten vor und während der Dryoutphase

Abb. Nr.	Titel
16	F als Funktion der relativen Filmstärke s_r
17	Vergleich der gemessenen und der nach Gleichung (4.17) berechneten Filmstärken
18	Schlupf in der Zweiphasenströmung $S_L = u_C/u_F$
19	Gemittelte Filmstärken unter Verwendung von $\phi = f(X_{LM})$
20	Gemittelte Filmstärken als Funktion der Dampfgeschwindigkeit ($q = 213 \text{ W/cm}^2$)
21	dto. ($q = 272 \text{ W/cm}^2$)
22	dto. ($q = 365 \text{ W/cm}^2$)
23	dto. ($q = 432 \text{ W/cm}^2$)
24	dto. ($q = 526 \text{ W/cm}^2$)
25	dto. ($q = 629 \text{ W/cm}^2$)
26	dto. ($q = 737 \text{ W/cm}^2$)
27	dto. (Zusammenstellung)
28	Eintrittsgeschwindigkeiten vor und während des Dryouts
29	Kritischer Wärmefluß als Funktion des Dampfgehaltes
30	Flußdiagramm zur Berechnung des Druckverlustmultiplikators ϕ sowie der Funktionen F und F'
31	Flußdiagramm zur Berechnung der Filmstärke nach dem Modell der Ring-Nebelströmung
32	Flußdiagramm zur Berechnung der Filmstärke nach dem Modell reiner Ringströmung (1. Methode mit $\alpha = 1-1/\phi$)
33	dito, (2. Methode)
34	Flußdiagramm zur Berechnung der kritischen Durchfließgeschwindigkeit (Ring-Nebelströmung)

1. Ziel und Schwerpunkt der Untersuchungen

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse schneller, natriumgekühlter Reaktoren werden zuverlässige Voraussagen zum Ablauf von Schäden in Brennelementen, verursacht durch integrale und lokale Kühlungsstörungen, benötigt. Die vorliegende Arbeit liefert dazu einen Beitrag. Es wird über Grundlagenuntersuchungen berichtet, die der Erweiterung der Kenntnisse auf dem Gebiet der Zweiphasenströmung des Natriums dienen.

Zweiphasendruckverluste und kritischer Wärmefluß für siedendes Natrium unter Zwangskonvektion sind nur sehr lückenhaft bekannt. Die besonderen thermohydraulischen Eigenschaften des Natriums erschweren die Extrapolation von Versuchsdaten anderer Flüssigkeiten auf Natrium. In einem Na-Siedekreislauf mit induktiv beheizter Teststrecke von 9 mm Innendurchmesser und 200 mm beheizter Länge wurden daher neue Versuchsreihen durchgeführt. Sie können als Fortsetzung früherer Versuche in Einkanalgeometrien $[1]$ verstanden werden, bei denen u.a. auch das Sieden, ausgehend von stagnierendem Natrium, untersucht wurde. Bei gut einem Drittel jener Versuche trat ein Siedeverzug von mehr als 30 °C auf, welcher transiente Siedevorgänge zur Folge hatte. In den neuen Versuchsserien, die mehr als 60 Einzelversuche umfassen, wurde durch Unterdrückung des Siedeverzuges ein quasistationärer Zustand erreicht.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag in der Messung des Zweiphasendruckverlustes und der Filmstärke in einer der Aufheizzone nachgeschalteten, adiabaten Meßstrecke bis zum Erreichen der kritischen Kühlungsbedingungen. Durch Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen bekannter Modelle zur Zweiphasenströmung war die Gültigkeit dieser Modelle für Flüssigmetallströmungen zu überprüfen.

2. Versuchsaufbau und -durchführung

2.1 Versuchsanlage

Abb. 1 zeigt das Kreislaufschema des Natrium-Siedekreislaufs (NSK) mit seinen peripheren Einrichtungen wie Schutzgassystem, Kühlkreislauf, Abblasttank usw. . Über den Abblasttank besteht eine Verbindung zu einem Natriumreinigungssystem, bestehend aus einer Kaltfalle, einem Oxidgehaltmesser (plugging meter) und einer EM-Pumpe. Mit diesem System kann im Natrium des Kreislaufs ein minimaler Restsauerstoffgehalt von ca. 10 ppm eingestellt werden.

Weitere Einzelheiten über die Funktion der einzelnen Komponenten der Anlage sind der Lit. [2] zu entnehmen.

2.2 Teststrecke mit Instrumentierung

Eine fotografische Aufnahme der Teststrecke vor ihrem Einbau in den Kreislauf ist in Abb. 2 wiedergegeben, konstruktive Einzelheiten sind der Abb. 3 zu entnehmen.

Die Beheizung des Testrohrs (13 x 2 mm) geschah mit Hilfe einer eingängigen Hochfrequenz-Induktionsspule aus Kupferrohr mit rechteckigem Querschnitt. Als Abstandshalter zwischen Spule und Testrohr diente ein mehrteiliges Quarzglasrohr. Die Daten der Hochfrequenz-Energieversorgung wurden so bemessen, daß die Wärmeerzeugung im Natrium selbst weniger als 1 % betrug. Durch eine nennenswerte Wärmeerzeugung würde das Temperaturprofil im Kühlkanal verfälscht. Die Verlustwärme der Spule wurde über eine Ölkühlung abgeführt.

Mit Ausnahme des Testrohrs wurden alle natriumführenden Teile aus austenitischem Stahl Nr. 1.4541 gefertigt. Um möglichst niedrige radiale Temperaturgradienten in der Testrohrwand zu erhalten, wurde Nickel als Rohrwerkstoff verwendet, dessen Wärmeleitfähigkeit rund zweieinhalb mal so groß wie diejenige von austenitischem Stahl ist.

Als Maßnahme zur Unterdrückung des Siedeverzuges wurden im Bereich der beheizten Länge 43 Löcher in wendelförmiger Reihe durch die Wand des

Testrohres gebohrt und von außen her teilweise wieder verschlossen (s. Abb. 3). Aus dem ruhigen Verlauf der Temperaturanzeigen in diesem Bereich während der Phasen konstanter Durchflußgeschwindigkeit (s. z. B. Abb. 8) ist zu ersehen, daß die Versuche tatsächlich ohne merklichen Siedeverzug abliefen.

Nachfolgend wird die Instrumentierung beschrieben, welche die Informationen über die Vorgänge in der Teststrecke während eines Versuches lieferte (s. Abb. 2 u. 3).

- Zur Überwachung des axialen Temperaturprofils wurden 13 Thermoelemente (TE) eingesetzt. Sechs von ihnen (0,5 mm \varnothing) wurden in ungefähr gleichen axialen Abständen so in die Wand des beheizten Testrohrs eingelötet, daß sich die Meßstelle 0,5 mm von der inneren Oberfläche entfernt befand. In Achsrichtung gesehen, waren diese 6 TE gleichmäßig am Umfang des Testrohres verteilt. Weitere 5 TE (1,0 mm \varnothing) registrierten Kühlmitteltemperaturen, und zwar am Eintritt in die Teststrecke, in Höhe des Durchflußmessers D3 und der beiden Druckaufnehmer sowie hinter der Kondensationskammer.
- Zur Messung des örtlichen Massendurchsatzes dienten 4 permanentmagnetische Durchflußmesser, deren Lage den Abbildungen 1 bzw. 3 zu entnehmen ist. Die leichter gebauten Durchflußmagnete D2 und D3 waren über ihre Halterungen fest mit der Teststrecke verbunden, um den Meßfehler, der durch das Auswandern der Elektroden relativ zum Magnetfeld infolge unterschiedlicher Temperaturen entsteht, möglichst klein zu halten.
- Die quasi adiabate, 120 mm lange Meßstrecke wurde axial durch die beiden Druckaufnehmer begrenzt, die über Bartonzellen den Absolutdruck p_2 am oberen Ende sowie den Gesamtdruckverlust Δp über die Meßstrecke registrierten.
- Etwas ausführlicher als die vorstehend beschriebene, allgemein übliche Instrumentierung zur Erfassung der Versuchsparameter Temperatur, Massendurchsatz und Druck wird im folgenden Abschnitt die in dieser Versuchsreihe erstmals eingesetzte zweifache Anordnung zur Filmstärkemessung F1 und F2 (s. Abb. 3) behandelt.

2.3 Filmstärkenmessung

Die Dicke des an der Wand des Testrohres befindlichen Flüssigkeitsfilmes wird durch die Messung des elektrischen Querwiderstandes bestimmt.

Zur Verbesserung des Nutzsymbols ist das Testrohr an den Meßstellen auf einer Länge von 20 mm auf eine Wandstärke von 0,5 mm abgedreht. Der Meßstrom wird über zwei einander gegenüber liegende Elektroden zugeführt; der Spannungsabfall wird unmittelbar an der Verbindungsstelle zwischen Elektrode und Rohr abgegriffen (Abb. 3 u. 4).

Der Gesamtwiderstand der Meßanordnung setzt sich aus den parallelen Widerständen des Testrohres R_R und des Natriumfilms R_{Na} (je 2 zylindrische Halbschalen) und dem Übergangswiderstand der Elektrodenanschlußstelle R_E zusammen (Abb. 4):

$$R_{ges} = 2 \cdot R_E + 1 / \left(\frac{2}{R_R} + \frac{2}{R_{Na}} \right) \quad (2.1)$$

Ohne den Natriumfilm vereinfacht sich Gl.(2.1) zu

$$R'_{ges} = 2 \cdot R_E + 0,5 \cdot R_R \quad (2.2)$$

Die exakte Berechnung der Einzelwiderstände ist wegen der Singularität am Übergang zwischen den Elektroden und dem Testrohr kaum möglich. Für die Auswertung wird deshalb folgende Vereinfachung vorgenommen:

- Die Widerstände des Testrohres und des Natriumfilms werden eindimensional unter Verwendung einer gemeinsamen, effektiv wirkenden Zylinderlänge L_{eff} berechnet:

$$R_R = \frac{(D + \delta) \cdot \pi}{2 \sigma_R \cdot \delta \cdot L_{eff}} \quad (2.3)$$

$$R_{Na} = \frac{(D - s) \cdot \pi}{2 \sigma_{Na} \cdot s \cdot L_{eff}} \quad (2.4)$$

- L_{eff} ist für einen vorgegebenen Rohrrinnendurchmesser konstant. R_{F} dagegen hängt von Fertigungstoleranzen und von der Ausführung der Schweißnaht ab und muß für jede Meßstelle einzeln bestimmt werden.

Zur Erprobung des Meßprinzips und zur Bestimmung von L_{eff} wurden mit einer separaten Probe Vorversuche durchgeführt, bei denen Natriumfilme verschiedener Stärken durch Einbau eines Keramikverdrängers erzeugt wurden. Die gemessenen, auf die Stromeinheit bezogenen Werte des Spannungsabfalls für das leere Rohr, für Filmschichtstärken von 0,475 und 1,38 mm und für das vollständig mit Natrium gefüllte Rohr sind in Abb. 5 als Funktion der Temperatur aufgetragen.

An der eingebauten Teststrecke wurde, ebenfalls in einem Vorversuch, für beide Meßstellen der Widerstand des leeren Rohres gemessen. Mit der relativ schwachen, für die Inbetriebnahme jedoch ausreichenden Beheizung der Meßstrecke konnten bei dieser Messung nur Temperaturen bis knapp über 300 °C erreicht werden. Für die erste Auswertung wurden daher die Meßreihen entsprechend der Charakteristik der Widerstandskurve des Probenrohres für höhere Temperaturen extrapoliert. Die weitere Auswertung der Versuche ließ es ratsam erscheinen, die Genauigkeit der so ermittelten Filmstärken durch eine Nachmessung der Widerstandswerte für das leere Rohr bei höheren Temperaturen zu verbessern. Dazu wurde die (ausgediente) Teststrecke mit einer verstärkten Beheizung versehen. Die in diesem Bericht aufgeführten Filmstärkewerte sind aufgrund dieser Nachmessung errechnet und liegen im unteren und mittleren Meßbereich ca. 5-10 µm höher als die in früheren Veröffentlichungen [3, 4].

Aus den Gl.(2.1)-(2.4) läßt sich nach Eliminieren von R_{F} folgende Beziehung für L_{eff} ableiten:

$$L_{\text{eff}} = \frac{\pi (D + \delta)}{4 \sigma_2 (R'_{\text{ges}} - R_{\text{ges}}) \delta} \left/ \left(1 + \frac{\sigma_{\text{R}} (D - s) \delta}{\sigma_{\text{Na}} (D + \delta) s} \right) \right. \quad (2.5)$$

Nach Einsetzen der Meßwerte für R'_{ges} (leeres Rohr) und R_{ges} (mit $s = 0,475$ mm) sowie der geometrischen Daten und der Stoffwerte erhält man

$$L_{\text{eff}} = 19,12 \text{ mm.}$$

Damit läßt sich auch R_E aus Gl. (2.2) berechnen, und man erhält unter Verwendung der Gl. (2.1) bis (2.4) folgende explizite Gleichung für die in Umfangsrichtung auf der Länge L_{eff} gemittelte Filmstärke (s.a. Kap. 3, S.11):

$$s = D \cdot \frac{k_1 - U}{k_2 \cdot U - k_3}, \quad (2.6)$$

wobei U der gemessene Spannungsabfall in mV,
 D der Rohrrinnendurchmesser,
 k_1, k_2, k_3 Funktionen der temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit des Rohrwerkstoffs und des Natriums, der Stromstärke und des Elektrodenübergangswiderstands sind.

2.4 Versuchsparameter (Übersicht)

Das Versuchsprogramm enthielt folgende Parameter:

Spez. Wärmefluß	q	:	213 ... 737 W/cm ² (7 Stufen)
Schutzgasdruck	p_{SG}	:	0,4, 0,8 und 1,2 bar
Na-Eintrittsge- schwindigkeit	v_2	:	ca. 3,5 m/s $\rightarrow v_2$ kr
Eintrittstemp.	T_A	:	680 °C (= konstant)
Mittl. Sattedampf- druck in der Meß- strecke	p_m	:	0,5 ... 1,7 bar
Mittl. Dampfge- halt in der Meß- strecke	x_m	:	0 ... ~ 98 %

Die Versuchsreihe, die durch einen Defekt im höchstbelasteten Abschnitt des beheizten Testrohrs beendet wurde, besteht aus 17 Serien, mit jeweils drei bis vier zeitlich kurz aufeinander folgenden Einzelversuchen von je ca. einminütiger Dauer bei einheitlichem Wärmefluß sowie Schutzgasdruck.

2.5 Beispiel eines Versuchsablaufs

Während eines jeden Einzelversuchs wurde der Massendurchsatz durch die Teststrecke in kleinen, allmählich abnehmenden Stufen durch Rücknahme der Pumpenspannung reduziert. Die Unterbrechungen zwischen den Einzelversuchen waren erforderlich, um mit Hilfe des Drosselventils in der Teststrecke den Durchsatz bei erneuter voller Pumpenspannung so weit zu drosseln,

daß während des folgenden Laufes der instabile Bereich der mit den Versuchsbedingungen abgeschätzten Zweiphasen-Druckverlustkennlinie der Teststrecke nicht berührt wurde. Die Einstellung des Drosselventils mußte wiederholt geändert werden, da die Förderhöhe der Pumpe im unteren Spannungsbereich zu gering wurde.

Die nachfolgende Aufstellung gibt stichwortartig den Ablauf einer Versuchsserie in zeitlicher Reihenfolge wieder (bezüglich der Datenerfassung siehe Abschnitt 2.6).

1. Einstellung des vorgesehenen Schutzgasdruckes p_{SG} .
2. Beginn der Registrierung durch Lichtpunktlinienschreiber (Lumiscrypt). Annäherung des Durchsatzes an denjenigen Wert, bei dem nach Überschlagsrechnung Siedebeginn zu erwarten war. Zuschaltung der Heizleistung.
3. Beginn der Magnetbandaufzeichnung des ersten Einzellaufes. Reduktion des Massendurchsatzes durch Erniedrigung der Pumpenspannung in 5-7 Stufen. Ende der Bandaufzeichnung nach ca. 1 min. Abschaltung der Heizleistung. Hochfahren der Pumpe auf volle Spannung. Ende der Aufzeichnung durch Lumiscrypt. Ende des 1. Einzelversuches.
4. Einstellung der Durchsatzgeschwindigkeit mit dem Drosselventil für den zweiten Lauf. Lumiscrypt und Heizleistung ein.
5. Beginn der Magnetbandaufzeichnung des zweiten Einzellaufes. Weiterer Verlauf wie Pkt. 3.
6. Neueinstellung des Durchsatzes für 3. Lauf (sonst wie Pkt. 4).
7. Beginn Magnetbandaufzeichnung für 3. Lauf. Reduktion des Durchsatzes wie in Pkt. 3. Bei Erreichung der kritischen Durchsatzgeschwindigkeit (Beobachtung einer plötzlichen Aufhellung der Glühfarbe im oberen Bereich der beheizten Teststrecke) Abschaltung der Leistung. Hochfahren des Durchsatzes. Ende der Aufzeichnungen und Ende der Versuchsserie.

Um die kritische Durchsatzgeschwindigkeit zu erreichen, wurden bei fünf Serien vier statt der oben beschriebenen drei Einzelversuche benötigt. Bei vier Serien wurde der letzte Einzellauf bis zum Dryout bei gleichen Anfangsbedingungen wiederholt (Definition des Dryout siehe Abschnitt 4.1).

2.6 Datenerfassung und -verarbeitung

Eine schematische Darstellung des Weges der einzelnen Meßsignale vom Ort der Entstehung über die Registrierung bis zur Verarbeitung ist in Abb. 6 wiedergegeben.

Die Aufzeichnung der wichtigsten Meßsignale durch den Lichtpunktlinienschreiber (UV-Schreiber) gestattete unmittelbar nach Beendigung eines Einzelversuches eine zumindest qualitative Beurteilung des Versuchsvorganges. Wichtigstes Element der Meßwertdokumentation war jedoch die zentrale, elektronische Datenerfassungsanlage (ERA-Anlage) des Instituts für Reaktorentwicklung, wo die Daten digitalisiert und auf Magnetband gespeichert wurden. Die Meßwerte wurden in fast allen Versuchen mit einer Frequenz von 625 Hz abgetastet. Es fielen in diesen Versuchen insgesamt 58 Millionen Daten an.

Für eine effektive Auswertung war es erforderlich, diese große Datenmenge ohne wesentliche Beeinträchtigung des Aussagegehalts stark zu reduzieren. Diese Aufbereitung wurde mit dem Programm SEDAP [5] vorgenommen. An Hand von Übersichtsdiagrammen der Durchsatzgeschwindigkeit wurde aus den einzelnen Durchsatzstufen von etwa 8 bis 10 s Dauer kurz vor dem Übergang zur nächsten Stufe jeweils eine Datenmenge quer durch alle Kanäle von etwa 1 s Dauer aussortiert, aneinandergereiht und auf ein neues Magnetband mit höherer Schreibdichte übertragen. Auf diese Weise entstanden 17 neue, jeweils auf ca. 21 s Dauer komprimierte Dateien, charakterisiert durch 11 bis 14 Geschwindigkeitsstufen sowie die abschließende Versuchsphase von 7 bis 10 s Länge, welche ungekürzt mit übernommen wurde. Die neue Datenmenge hatte nur noch knapp ein Zehntel des ursprünglichen Umfangs.

Die weitere Auswertung mittels SEDAP geschah zumeist durch Mittelwertbildung der Temperatur-, Geschwindigkeits- und Filmstärkemeßwerte der ausgewählten Versuchsabschnitte. Diese Werte wurden vom Rechner in Listenform ausgedruckt und bildeten die Grundlage für die mit Karteneingabe arbeitenden Iterationsprogramme zur Berechnung von Druckabfall, Dampfgehalt, Filmstärke, kritische Geschwindigkeit, usw. Darüber hinaus war es natürlich auch notwendig, maschinell hergestellte Diagramme (Plots) für die individuelle Beurteilung der Versuchsvorgänge anzufertigen (vgl. Abb. 8-11).

2.7 Fehlerabschätzung

Die von Pepler [1] durchgeführte Fehlerabschätzung in bezug auf die Meßwerte Temperatur, Durchsatz, Heizleistung und Druck bzw. Druckdifferenz gilt infolge weitgehend übereinstimmender Meß- und Kalibrierverfahren auch für die vorliegenden Ergebnisse. Durch den Einsatz anderer Verstärker und der elektronischen Datenverarbeitung hat sich die Genauigkeit sogar noch erhöht. Zu erwähnen ist, daß lediglich die Druckwerte p_2 und Δp den Aufzeichnungen des Lichtpunktlinienschreibers entnommen wurden, da die Magnetbandaufzeichnungen in diesen beiden Fällen infolge eines Übertragungsfehlers keine brauchbaren Werte lieferten.

Von besonderem Interesse ist die Genauigkeit, mit der mittels Gl.(2.6) die an der Rohrwand verbleibende Natrium-Filmstärke s von der Meßanordnung wiedergegeben wird. Bei näherer Betrachtung der eben erwähnten Gleichung erkennt man, daß die Genauigkeit der Summanden des Zählers (ausführlich geschrieben: $-U+I \cdot U'_{\text{ges}}/I'$) eine maßgebliche Rolle bei der Fehleranalyse spielt. Je kleiner die Filmstärke wird, umso größer wird der relative Fehler, da der absolute Fehler stark unterproportional zur Filmstärke abnimmt. Dies wird an Hand der folgenden Aufstellung verdeutlicht, die eine Fehlerabschätzung zu zwei verschiedenen Meßzeiten des Versuchs Nr. 15/60 wiedergibt.

Abweichungen der in Gl.(2.6) erhaltenen Variablen:

Rohrlänge L_{eff}	:	\pm	3 %
Rohrinnendurchmesser D	:	\pm	0,5 %
Spannungsabfall im Versuch U	:	\pm	0,65 %
Temperatur T_I	:	\pm	0,55 %
Stromstärke im Versuch I	:	\pm	1,5 %
Stromstärke bei der Nachmessung des leeren Rohres I'	:	\pm	1 %
Spannungsabfall bei der Nachmessung U'	:	\pm	0,4 %

Ergebnis der Fehlerrechnung:

$v_2 \overline{[m/s]}$	0,41	0,187
$s_1 \overline{[mm]}$	0,0427	0,0121
$\Sigma \Delta s_1 \overline{[mm]}$	0,0146	0,0113
$\Sigma \Delta s_1 / s_1$	0,34	0,93
$\Delta s_{1L} / s_1$	0,03	0,03
$\Delta s_{1D} / s_1$	0,01	0,01
$\Delta s_{1U} / s_1$	0,06	0,16
$\Delta s_{1T} / s_1$	0,02	0,04
$\Delta s_{1I} / s_1$	0,11	0,34
$\Delta s_{1I'} / s_1$	0,08	0,25
$\Delta s_{1U'} / s_1$	0,03	0,10

Die Indizes L, D, U usw. beziehen sich auf die Variablen L_{eff} , D, U usw. Der durch die Abweichung einer Variablen x_i hervorgerufene Einzelfehler wurde nach folgender Beziehung berechnet:

$$\Delta s_1(x_i) = |s_1(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_7) - s_1(x_1, \dots, x_7)|$$

Der mit $\Sigma \Delta s_1$ angegebene Wert ist der maximal mögliche Fehler in der Filmstärkeangabe. Er ist mit rund 0,01 mm bei allen Versuchsserien während der letzten Versuchsphase vor dem Dryout ungefähr gleich. Der relative Fehler in diesem Bereich beträgt dann bis zu 100 % und mehr.

Zu bemerken ist, daß die Stromstärke bei der Nachmessung durch die Verwendung eines besseren Gleichrichters genauer als im Versuch selbst eingestellt und geregelt werden konnte.

3. Versuchsergebnisse

Die maßgeblichen Versuchsdaten sowie einige der wichtigsten gerechneten Größen (ausführliche Beschreibung der Berechnungsmethoden in Kap. 4) sind in den Tabellen 1-6 aufgeführt. Im einzelnen handelt es sich um folgende Größen:

- Geschwindigkeit v_2 des flüssigen Natriums am Eintritt in die Teststrecke, bezogen auf den freien Querschnitt des beheizten Rohres.
- Statischer Druck p_2 am oberen Ende der Meßstrecke.
- Druckdifferenz Δp über die Meßstrecke hinweg.
- Filmstärkewerte s_1 und s_2 , nach Gl. (2.6) aus den Spannungssignalen der Meßeinrichtung F1 und F2 ermittelt.
- Statischer Druck $p_m = p_2 + 0,5 \cdot \Delta p$.
- Dampfgehalt x_m .
- Zweiphasenreibungsdrukabfall Δp_{2PhR} nach Gl. (4.3).
- Druckverlustmultiplikator ϕ_L nach Gl. (4.5).
- Lockhart-Martinelli-Parameter X_{LM} nach Gl. (4.6).
- Filmstärke s_{RR} und Dampfgeschwindigkeit $u_{C RR}$, berechnet nach dem Modell reiner Ringströmung (s. Abb. 33, vgl. Abschn. 4.4).
- Filmstärke s_{RN} , berechnet nach dem Modell der Ring-Nebelströmung (s. Abb. 31).

Die Meßwerte sind über eine Zeitdauer von 1 s arithmetisch gemittelte Werte, wobei im Falle der Filmstärke die örtlichen Schwankungen der welligen Oberfläche über den inneren Umfang des Rohres durch die integrale Meßweise selbst gemittelt wurden. Eine ungleichförmige Verteilung des Natriumfilms im Meßbereich, im Extremfall eine Unterbrechung des Films, z.B. durch Austrocknung, konnte mit der angewandten Methode nicht erfaßt werden. Die Rechenwerte stellen das arithmetische Mittel der für Anfang und Ende der Meßstrecke berechneten Werte dar, soweit sie nicht deren gesamte Länge betreffen.

4. Diskussion der Versuchsergebnisse

4.1 Zweiphasenströmungsform

Siedet Natrium bei erzwungener Konvektion, so bildet sich nach einer gewissen Anlaufstrecke schon bei Dampfgehalten ab 1 % eine Ringströmung aus. Diese Ringströmung konnte in unseren Versuchen an Hand der Filmstärkemessung beobachtet werden. Zum besseren Verständnis der Versuchsergebnisse werden zunächst die wesentlichen Merkmale dieser Strömungsform dargestellt.

Je nach der Phasenform der Kernströmung wird zwischen nahezu reiner Ringströmung (s. Abb. 7) und Ring-Nebelströmung unterschieden. Bei der Ringströmung bewegt sich die Dampfphase zumeist mit hoher Geschwindigkeit in der Mitte des Kanals, während die Flüssigkeitsphase als Film an der Kanalwand mit einer um 1 bis 2 Größenordnungen geringeren Geschwindigkeit entlangströmt. Aus dieser Geschwindigkeitsdifferenz resultieren hohe Schubspannungen an der Phasengrenzfläche, welche die Ausbildung einer welligen Filmoberfläche bewirken. Nimmt die Geschwindigkeitsdifferenz weiter zu, werden von der wesentlichen schnelleren Dampfströmung schließlich Tropfen aus der Oberfläche des langsamer strömenden Flüssigkeitsfilms herausgerissen [6]. Gleichzeitig aber gelangen Tropfen wieder in den Film zurück. Die reine Ringströmung geht in eine Ring-Nebelströmung über, die dadurch charakterisiert ist, daß im Kern außer der zusammenhängenden Dampfphase auch eine Flüssigkeitsphase in Form von Tröpfchen anwesend ist. Der Flüssigkeitsfilm kann wiederum Dampfbläschen enthalten.

Bei ausgebildeter Strömung bewegen sich die Flüssigkeitstropfen im Durchschnitt langsamer als der Dampf. Demzufolge sind sie ständig im Zustand der Beschleunigung. Die Größe und Geschwindigkeit der Tropfen sind i. a. verschieden. Der Tropfenanteil und die mittlere Dichte der Kernströmung hängen von der Tropfenverteilung ab, die im engen Zusammenhang mit dem Verhältnis von Dampfphasen- und Tropfengeschwindigkeit, d. h. mit dem Schlupf steht (vgl. dazu die Ausführung auf Seite 22 ff). Die Ring-

strömung mit Tropfen im Kern wurde u.a. von Levy [7] analysiert. Die von ihm entwickelte Methode wird im Abschn. 4.3.2 (S.19) kurz dargestellt und zur Nachrechnung unserer im Versuch ermittelten Filmstärken verwendet. Einige der dort aufgeführten Beziehungen finden jedoch bereits im folgenden Abschnitt Anwendung, in welchem der in unseren Versuchen gemessene Zweiphasendruckverlust untersucht wird.

In diesem Zusammenhang muß auf das Phänomen des Dryout näher eingegangen werden. Dryout tritt definitionsgemäß dann ein, wenn der Flüssigkeitsfilm an der Wand abgedampft ist. Damit hört die durch Verdampfung des Films bedingte intensive Wärmeabfuhr auf. Die Wandtemperaturen steigen, wie am Beispiel der Abb. 8, Meßstelle T_G , gezeigt, sehr schnell an. In einigen wenigen Fällen kann nicht mit voller Sicherheit von einem Dryout gesprochen werden. Die Temperatur T_G hielt sich zwar auf wesentlich erhöhtem Niveau und zeigte große Schwankungen, wies jedoch keinen ausgesprochenen Steilanstieg auf (s. Abb. 9). Dieses Verhalten wird so erklärt, daß lokal vorübergehend Dryout auftrat, die Gesamtkühlung aber gerade noch ausreichend war (zeitweilige Wiederbenetzung der Wand).

Diese beiden Versuche (s. Abb. 8 und 9), mit gleicher Wärmestromdichte durchgeführt, unterscheiden sich durch die Charakteristik ihrer Durchflußsignale. Während bei den Versuchen mit niedrigen Systemdrücken das Durchflußsignal während der letzten Geschwindigkeitsstufen vor dem Dryout meist starke Oszillationen in der Art der Abb. 8 bzw. Abb. 10 aufwies, hatte das Signal bei den Versuchen mit höheren Drücken einen ruhigeren Verlauf und oszillierte erst in der Dryout-Phase stärker (s. Abb. 9 und 11).

4.2 Zweiphasendruckverlust

Bei einer Zweiphasenströmung in einem senkrechten Rohr wird der Gesamtdruckverlust über eine Länge dz des Rohres in differentieller Schreibweise als Summe dreier Glieder geschrieben:

$$dp_{2Ph} = dp_{2PhR} + dp_B + dp_H \quad (4.1)$$

In der obigen Reihenfolge berücksichtigen die Glieder den Zweiphasenreibungsdrukverlust, den Beschleunigungsdrukverlust und den hydrostatischen Druckverlust.

Die rechte Seite der Gl.(4.1) kann folgendermaßen geschrieben werden [8]:

$$dp_{2Ph} = dp_{2PhR} + d(\alpha \rho_G u_G^2 + (1-\alpha) \rho_L u_L^2) + g(\alpha \rho_G + (1-\alpha) \rho_L) dz \quad (4.1a)$$

wobei, über den Querschnitt gemittelt,

ρ_G und u_G Dichte und Geschwindigkeit der Gas- oder Dampfphase,

ρ_L und u_L Dichte und Geschwindigkeit der Flüssigkeitsphase sind,

α der Volumenanteil des Dampfes ist,

g ist die Erdbeschleunigung.

Nur der integrale Wert des Gesamtdrukverlustes über eine endliche Rohrlänge kann im Experiment gemessen werden. Benötigt wird jedoch der Reibungsdrukverlust, bzw. dessen Gradient, um die Schubspannungen im Film sowie zwischen Film einerseits und Wand bzw. Kernströmung andererseits berechnen zu können.

Zur Anwendung wird Gl. (4.2) über eine Meßstrecke $\Delta z = z_2 - z_1$ integriert unter der Annahme, daß die Änderung des Dampfanteils zwischen den betrachteten Grenzen gering ist und man daher ansetzen kann:

$$\Delta p_{2Ph} = \Delta p_{2PhR} + \Delta(\alpha \rho_G u_G^2 + (1-\alpha) \rho_L u_L^2) + g \cdot \rho_m \cdot \Delta z, \quad (4.2)$$

$$\text{wobei } \rho_m = \frac{1}{2}(\alpha_1 \cdot \rho_{G1} + (1-\alpha_1) \rho_{L1} + \alpha_2 \cdot \rho_{G2} + (1-\alpha_2) \rho_{L2}) \quad (4.2a)$$

Die Indizes 1 und 2 der letzten Gleichung beziehen sich auf die Stellen z_1 bzw. z_2 . Der Reibungsdrukverlust kann damit aus den Gleichungen (4.2) und (4.2a) ermittelt werden, indem Beschleunigungs- und hydrostatischer Druckverlust aus gemessenen Größen berechnet und vom gemessenen Gesamtdrukverlust abgezogen werden. Auf die Methoden zur Berechnung der hierzu not-

wendigen Volumenanteile und Geschwindigkeiten der beiden Phasen wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels ausführlich eingegangen.

Der Druckverlust einer Zweiphasenströmung ist eines ihrer bedeutendsten Charakteristika. Die experimentell ermittelten Werte können durch eine empirische Korrelation dargestellt werden. Diese wird unter Einbeziehung der Energie- und Massenbilanz zur Berechnung der Strömungsform bzw. Phasenanteile verwendet, sofern nur der Durchsatz und die Temperatur-, nicht jedoch die Druckverteilung, bekannt sind.

Die am häufigsten verwendete Methode zur Berechnung des Zweiphasendruckverlustes, die Korrelation von Lockhart und Martinelli [9], wird näher erläutert. Ohne ins Detail zu gehen, werden die wichtigsten Annahmen aufgezählt:

1. Die Zweiphasenströmung wird als Summe zweier, voneinander getrennter Einphasenströmungen betrachtet.
2. Der statische Druckverlust wird nur auf die Reibung zurückgeführt.
3. Der Druckgradient in radialer Richtung ist Null, d.h. die Druckverluste der beiden Phasen sind gleich groß.
4. Die von den Phasen eingenommenen Querschnitte bleiben längs des Rohres ungefähr konstant.

Diese empirische Korrelation wird als

$$\phi = f(x_{LM})$$

dargestellt, wobei

$$\phi = \sqrt{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2PhR} / \left(\frac{dp}{dz}\right)_{1Ph}}, \quad (4.3)$$

der sog. Druckverlustmultiplikator ist und

$$x_{LM} = \left(\frac{1}{x} - 1\right)^{0,9} \cdot \left(\rho_G / \rho_L\right)^{0,5} \cdot \left(\mu_L / \mu_G\right)^{0,1}, \quad (4.4)$$

der sog. Lockhart-Martinelli-Parameter ist, bezogen auf den am häufigsten vorkommenden Fall, daß beide Phasen turbulent vorliegen. Der Dampfgehalt x wird über die Wärmebilanz berechnet:

$$x = \frac{4 \cdot q \cdot L_h}{v_2 \cdot D \cdot \varrho \cdot r} - \frac{c_p \cdot (T - T_e)}{r} \quad (4.5)$$

Die Korrelation (4.3) nach [9] ist in Abb. 9 dargestellt. Sie wurde aus Meßergebnissen mit Wasser und organischen Flüssigkeiten gewonnen.

Der Zähler unter der Wurzel in Gl. (4.3), der Zweiphasen-Reibungsdruckverlustgradient, kann mit Hilfe der Gl. (4.2) berechnet werden. Der Nenner stellt den Druckverlustgradienten für den Fall dar, daß eine der beiden Phasen alleine im Rohr strömt. I.a. wird der Druckverlustgradient für die flüssige Phase verwendet, der hier wie folgt berechnet wurde:

$$\Delta p_L / \Delta z = \zeta \cdot \varrho \cdot v_L^2 / (2D) \quad (4.6)$$

mit $\zeta = 0,4 / \text{Re}^{0,25}$ für $\text{Re} > 1000$ bzw.
 $\zeta = 64 / \text{Re}$ für $\text{Re} \leq 1000$

Die Verwendung des Grenzwerts 1000 für die Re-Zahl geht auf die Empfehlung der Autoren Lockhart und Martinelli zurück.

Aus zahlreichen Veröffentlichungen, die sich mit dem Problem des Zweiphasendruckverlustes auseinandersetzen, wird die von Chen und Kalish [8] zu einem Vergleich herangezogen. Auf der Basis von Versuchen mit Kalium gaben die Verfasser folgende Beziehung, gültig für Flüssigmetalle, an:

$$\ln\left(\frac{1}{\phi}\right) = -1,59 + 0,518 \cdot \ln X_{LM} - 0,0867 \cdot (\ln X_{LM})^2 \quad (4.7)$$

Für die Darstellung unserer Ergebnisse wurde der Zweiphasen-Reibungsdruckverlust iterativ unter Verwendung der Gln. (4.2) und (4.2a) berechnet. Folgende Meßgrößen gingen in die Berechnung ein (vgl. Abb. 30):

- Wärmefluß q ,
- Natriumgeschwindigkeit v_2 am Eintritt zur Teststrecke,
- statischer Druck p_2 am oberen Ende der adiabaten Meßstrecke,
- Gesamtdruckverlust über die Meßstrecke Δp und
- Filmstärken s_1 und s_2 .

Im ersten Iterationsschritt wurde für den noch unbekanntem Reibungsdruckverlust als Rohwert der gemessene Gesamtdruckverlust eingesetzt.

Der Dampfvolumenanteil α wird aus der geometrischen Beziehung

$$\alpha = \left(\frac{D-2s}{D}\right)^2 \quad (4.8)$$

berechnet (vgl. Abb. 7). s ist die gemessene, auf den Ort der Druckmessung linear extrapolierte Filmstärke. Diese Gleichung schließt die Annahme ein, daß die gesamte Flüssigkeit in Form eines Films an der Wand entlangströmt. In Wirklichkeit enthält der Dampfkern aber auch Flüssigkeitstropfen. Diese Tatsache bedingt Unsicherheiten in der Berechnung der α -Werte und der Beschleunigungsdruckverluste. Eine Abschätzung des Fehlers erfolgt bei der Betrachtung des Schlupfes der beiden Phasen im Kern (s.S. 22). Im weiteren Verlauf der Berechnung wird der Reibungsdruckverlust so lange geändert, bis die rechte Seite der Gl. (4.2) mit dem gemessenen Gesamtdruckverlust übereinstimmt.

Die so berechneten Werte des Reibungsdruckverlustes und zum Vergleich auch die Werte des gemessenen Gesamtdruckverlustes wurden in Form der Druckverlustmultiplikatoren ϕ bzw. ϕ' zusammen mit Näherungskurven in die Abb. 12 eingetragen. Von den rund 240 Meßwerten wurden nur diejenigen (ca. zwei Drittel) berücksichtigt, bei denen beide Filmstärkenmeßwerte auf einen stationären Strömungszustand hindeuteten. In den übrigen Fällen war die obere Filmstärkenmessung durch den Wiedereintritt von flüssigem Natrium aus der Kondensationskammer gestört. Bis auf die letzten Werte in der Dryout-Phase sind alle Meßwerte im Bereich turbulent-turbulent, d.h. $Re > 2000$, gewonnen werden.

Die Streuung unserer Meßergebnisse ist gering, verglichen mit den Ergebnissen anderer Autoren (z.B. $\overline{10}$, Abb. 13). Die Differenz zwischen den aus dem Gesamtdruckverlust und dem Reibungsdruckverlust berechneten ϕ -Werten ist vom Bereich des X_{LM} abhängig und beträgt, jeweils im Mittel, für $X_{LM} > 0,1$ etwa 10 %, für $0,06 < X_{LM} < 0,1$ etwa 16 % und für $X_{LM} < 0,06$ etwa 27 %. D.h., mit zunehmendem Dampfgehalt (X_{LM} nimmt ab) wird der Anteil des Beschleunigungsdruckverlustes größer. Insgesamt gesehen, ist er von Bedeutung, zumal der Gesamtdruckverlust in der gleichen Größenordnung wie der Systemdruck selbst liegt und sich Dampfdichte und -geschwindigkeit stark mit dem Druck ändern.

Wie Abb. 12 zeigt, bestätigen unsere Meßergebnisse weder die Korrelation von Lockhart-Martinelli, noch die von Chen-Kalish. Unsere Meßergebnisse können am besten durch folgende Gleichung, gültig für den Zweiphasenreibungsdruckverlust, angenähert werden.

$$\phi = 8,2 \cdot X_{LM}^{-0,55} \quad (4.9)$$

Diese Gleichung gilt, zumindest für die in unseren Versuchen verwendete Geometrie, sowohl für reine Ringströmung als auch Ring-Nebelströmung mit Natrium.

4.3 Filmstärken und Tröpfchenanteil

4.3.1 Überblick

Die bisher bekannten Arbeiten, welche sich eingehend mit den Austauschgrößen zwischen dem Film und dem Flüssigkeitströpfchen enthaltenden Gasstrom einer Zweiphasenströmung befassen, sind fast ausschließlich nichtmetallischen Flüssigkeiten gewidmet. Einige Arbeiten erscheinen jedoch wegen qualitativer Aussagen interessant.

Die Versuche von Alia et al. [11] mit Zweiphasengemischen von Wasser bzw. Äthylalkohol mit Argon (max. Systemdrücke von 22 bar, Umgebungstemperatur und Rohrdurchmesser von 15 und 25 mm) ergaben, daß auch der Gasgehalt des Flüssigkeitsfilms von Bedeutung sein kann. Die Filmstärken lagen zwischen 0,13 und 2 mm, im unteren Bereich damit etwa eine Größenordnung höher als die von uns gemessenen Werte (s.Tab. 1-6).

Biasi et al. [12] berechneten Filmstärken und Durchsätze der beiden Phasen mit Iterationsverfahren und verglichen sie mit Messungen aus Gas-Wasser-Gemischen. Auch hier liegen die Filmstärken über unserem Bereich,

Obwohl die Übertragbarkeit von Untersuchungen mit Wasser oder organischen Flüssigkeiten auf Natrium durch die Tatsache problematisch ist, daß wohl die hydraulischen, nicht aber die übrigen physikalischen Modellgesetze übereinstimmen, wurde das allgemein anerkannte Modell zur Ring-Nebelströmung von Levy [7] zur Nachrechnung und Darstellung unserer Versuchsergebnisse herangezogen.

4.3.2 Vergleich mit dem Zweiphasenmodell nach Levy [7]

Wegen der engen Verknüpfung zwischen der Schubspannung und der Strömungsform werden der Filmflüssigkeitsanteil, die Filmstärke und der Tropfenanteil aus Untersuchungen zur Schubspannung bestimmt. Die Dichte- und Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt des Films und der Kernströmung sowie die mittleren Werte sind in Abb. 16 dargestellt. Die Indizes beziehen sich auf die Flüssigkeit (L), den Film (F) und die Kernströmung (C).

Aus einer Bestimmungsgleichung für die Schubspannung an der Grenzfläche zwischen dem Film und dem Kern leitet Levy [7] folgende dimensionslose Funktion der relativen Filmstärke $(\frac{s}{D/2})$ ab:

$$F\left(\frac{s}{D/2}\right) = \sqrt{\frac{\tau_C}{\rho_C (u_C - u_F) (\rho_L - \rho_C)}} \quad (4.10)$$

Für die Bestimmung dieser F-Funktion wird eine Serie berechneter oder gemessener Werte des Druckgradienten sowie gemessener Filmstärken benötigt. Die Geschwindigkeiten von Film und Dampf berechnen sich zu

$$u_F = \frac{G_F}{\rho_L (1-\alpha)} \quad (4.11)$$

und
$$u_C = \frac{x_C \cdot v_2 \cdot \rho_e}{\rho_C \cdot x_C \cdot \alpha} \quad (4.12)$$

wobei x_C und ρ_C Dampfgehalt bzw. Dichte im Kern sind.

Der Massendurchsatz des Films G_F wird mit Hilfe der dimensionslosen, meist in der Einphasen-Grenzschichttheorie gebrauchten Größen u^+ bzw. y^+ berechnet (s. Abb. 30). Die hierzu benötigte Wandschubspannung τ_W wird mit Hilfe des iterativ berechneten Zweiphasen-Reibungsdruckverlustgradienten nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\tau_W = \frac{\Delta p_{2PhR}}{\Delta z} \cdot \frac{D}{4} \quad (4.13)$$

Der Volumenanteil α berechnet sich aus Gl.(4.8).

Die Schubspannung an der Phasengrenzfläche berechnet sich zu

$$\tau_C = \frac{\Delta p_{2PhR}}{\Delta z} \cdot \frac{D-2s}{4} \quad (4.14)$$

In den Gln.(4.13) und (4.14) bleiben die relativ sehr geringen statischen Höhendruckverluste des Films und des Dampfes unberücksichtigt.

Um die F-Funktion allgemein gültig zu machen, führt Levy eine Korrektur durch:

In Wirklichkeit sind die Geschwindigkeiten der Gasphase und der Flüssigkeitströpfchen nicht gleich, sondern es existiert ein Schlupf zwischen den beiden Phasen im Kern. Um dies zu berücksichtigen, schlägt Levy eine R-Funktion vor, die vom Dichteverhältnis (ρ_L / ρ_G) abhängt und mit der die F-Funktion multipliziert wird.

Die nach Levy allgemein gültige F-Funktion lautet demnach:

$$F' \left(\frac{s}{D/2} \right) = \sqrt{\frac{\tau_C}{u_C (\rho_L - \rho_G) (u_C - u_F)}} \cdot R \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right), \text{ für } \left| \frac{\Delta p_{ges}}{\Delta z} \right| \geq g \cdot \rho_L \quad (4.15)$$

Diese Funktion wurde von Levy unter Verwendung von Daten dargestellt, welche aus Versuchen mit Wasser und Alkohol als Testflüssigkeiten stammen [13]. Sie wurde auch von uns zur Nachrechnung unserer Versuchsergebnisse verwendet, jedoch konnte dazu die von Levy aufgestellte R-Funktion $R = (\rho_L / \rho_G)^{1/3}$ nicht übernommen werden (s.u.). Folgendes Verfahren zur Bestimmung der R-Korrekturfunktion mußte daher eingeführt werden:

Bei konstanten $s_r = s/(D/2)$ -Parametern wurden die nach Gl.(4.10) gerechneten F-Werte als Funktion der ρ_L / ρ_G -Dichteverhältnisse dargestellt (s.Abb.15). Unter der Annahme thermodynamischen Gleichgewichts ist dieses Verhältnis eine reine Funktion des örtlichen Druckes. Aus den Kurven der Abb. 15 wurde mit dem Ansatz $R = a + b \cdot \rho_L / \rho_G$ nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate jene R-Korrekturfunktion bestimmt, die eine vom Dichteverhältnis ρ_L / ρ_G möglichst unabhängige allgemeine Gültigkeit der F'-Funktion für unseren Meßbereich sicherte. Ein Potenzansatz lieferte demgegenüber kein brauchbares Ergebnis.

Die R-Funktion soll somit die weite Streuung der nach Gl. (4.10) berechneten F-Werte unter Elimination der Abhängigkeit vom Dichteverhältnis auf ein schmales Band reduzieren. Unter diesem Aspekt ist es daher zu verstehen, daß die Optimierungsrechnung eine kontinuierliche Reihe von Wertepaaren für a und b lieferte, die gleichermaßen eine minimale Streuung der F'-Werte ergaben.

Für unseren Meßbereich mit $1600 \leq \rho_L / \rho_G \leq 5000$ wurde die Funktion

$$R = 0,385 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_L / \rho_G + 0,059 \quad (4.16)$$

ausgewählt, die R-Faktoren von 0,68 bis 1,98 ergab.

Für unsere Meßergebnisse war die Bedingung $\left| \frac{\Delta p_{ges}}{\Delta z} \right| \geq g \cdot \rho_L$ immer erfüllt.

Die optimierte F'-Kurve, die aus den korrigierten Kurven der Abb. 15 direkt hervorging, ist in der Abb. 16 über der relativen Filmstärke s_r als kontinuierliche Linie dargestellt. Diese Kurve ist die beste Näherung der nach Gln.(4.15) und (4.16) gerechneten und ebenfalls in diesem Diagramm dargestellten Einzelwerte F' unserer Versuche. Außerdem wurde die von Levy gefundene Kurve $F' = f(s_r)$ mit aufgenommen. Nach Levy ist F' eine allgemeine Funktion zur Bestimmung der Filmstärke bei Ring-Nebelströmung. Sie ist jedoch in ihrer ursprünglichen Form auf unsere Na-Versuche nicht anwendbar. Die Ursache hierfür läßt sich ohne weitere, detaillierte Untersuchungen zur Zeit nicht angeben.

Zur Überprüfung unserer optimalen F'-Kurve wurden nun für alle Meßpunkte die Filmstärken berechnet und in Abb. 17 mit den gemessenen verglichen. In die Rechnung gingen die Parameter statischer Druck p_2 , Eintrittsgeschwindigkeit v_2 und spez. Wärmefluß q ein (s.Abb. 31). Mit der folgenden vereinfachten Gleichung

$$F' = \sqrt{\frac{(\Delta p / \Delta z)_{2PhR} \cdot D}{4 \rho_L}} \cdot \frac{\rho_G}{G_G} \cdot R \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right), \quad (4.17)$$

die auch Levy vorgeschlagen hat, wurden die F'-Werte und, über eine Näherungsfunktion $s_r = f(F')$ aus Abb. 16, die Filmstärke s berechnet. Der Zweiphasen-Reibungsdruckverlust in Gl.(4.17) wurde mit der Gl.(4.9) bestimmt.

Die gemessenen Filmstärken sind den mit den Näherungsfunktionen errechneten in Abb. 17 gegenübergestellt.

Mit einem Kreuz sind jene Werte bezeichnet, die sich aus dem arithmetischen Mittelwert beider Filmstärken ergeben, mit Stern diejenigen aus der unteren Filmstärkemessung. In diesen Fällen war das obere Signal durch pulsierendes Rückströmen flüssigen Natriums aus der darüber liegenden Kondensationskammer gestört. Die größte Streubreite ist erwartungsgemäß im Bereich kleiner Filmstärken zu beobachten, wo der im Meßverfahren begründete Meßfehler relativ am höchsten ist.

Bei der kritischen Betrachtung der Ergebnisse muß auch die Frage untersucht werden, welchen Einfluß die vereinbarte Annahme hat, daß die Flüssigkeitstropfen im Kern mit Gasgeschwindigkeit strömen, d.h. kein Schlupf besteht. Wie bereits in Abschnitt 4.1 erwähnt, bewegen sich die Flüssigkeitströpfchen in der Kernströmung mit einer Geschwindigkeit, deren Größe zwischen der des Films und der des Dampfes liegt. Die Energie, die zur Beschleunigung der Tröpfchen notwendig ist, wirkt sich in einer Erhöhung des Druckverlustes aus. Genau genommen, müßte dieser Umstand in der Bilanz der einzelnen Druckverlustkomponenten einer Zweiphasenströmung, Gln. (4.1a) bzw. (4.2), berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang wurde von Moeck und Stachievicz [14] zur Erfassung der Austauschvorgänge zwischen Film und Kern in einer Ring-Nebelströmung eine Rechenmethode ausgearbeitet, die sich auf Untersuchungen mit Wasser-Luft Zweikomponentengemischen abstützt. Um die Methode anwenden zu können, müssen die Stoffaustauschkoeffizienten zwischen Film und Kern sowie die maximale Tropfengröße oder die Geschwindigkeit des maximalen Tropfens bekannt sein. Diese experimentellen Werte sind für Natrium nicht verfügbar. Es können daher an dieser Stelle keine Rechnungen durchgeführt werden.

Eine Abschätzung des Schlupfs in der Kernströmung ist jedoch möglich und erforderlich. Er ist definiert als:

$$s_{LC} = \frac{u_{CG}}{u_{CL}} \quad (4.18)$$

und verknüpft Massen- und Volumenanteil des Dampfes folgendermaßen:

$$S_{LC} = \frac{x_C}{1-x_C} \cdot \frac{1-\alpha_C}{\alpha_C} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_G} \quad (4.19)$$

Die Größenordnung des Schlupfes kann daraus abgeschätzt werden, daß er nicht größer sein kann als das Maximum des Verhältnisses der Geschwindigkeiten Kern/Film, u_C/u_F . In unseren Messungen war dieses Verhältnis stets unter 100. Mit $S_{LC} = 100$ bekommt man aus Gl.(4.19) $1-\alpha_C = 0,033$, also max. 3,3 Vol.% Flüssigkeit im Kern. Das bedeutet, daß in den Berechnungsformeln für die F- bzw. F'-Funktion, Gl.(4.10) bzw. Gl.(4.15), die Annahme $\alpha = 0$ im Film und $\alpha = 1$ im Kern eine gute Näherung ist.

Aus den Gln. (4.11) und (4.12) wurde das Verhältnis der Dampf-zur Filmgeschwindigkeit bestimmt. Die gerechneten Werte sind in der Abb. 18 als Funktion des Lockhart-Martinelli-Parameters aufgetragen. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Lurie [10] bekamen wir um 1-2 Größenordnungen geringere Werte (s. ausgezogene Kurve).

Wallis [15] hat einen sog. "interfacial friction factor" bestimmt, der wie die Levy-Funktion eine Funktion der Filmstärke ist und jener stark ähnelt. Anstelle einer mittleren Filmgeschwindigkeit rechnet der Autor mit der Flüssigkeitgeschwindigkeit an der Grenzfläche zur Kernströmung. Außerdem verwenden er wie auch die oben erwähnten Autoren [14] statt einer mittleren Filmstärke eine Basisfilmstärke, d.h. die minimale Filmstärke, die von den unteren Halbwellen des örtlichen Filmprofils gebildet wird. Diese beiden Unterschiede stehen einem Vergleich der Versuchsergebnisse der genannten Autoren mit den unsrigen entgegen.

4.4 Vergleich mit reiner Ringströmung

Die reine Ringströmung kann als Sonderfall der Ring-Nebelströmung betrachtet werden. Sie läßt sich theoretisch verhältnismäßig einfach behandeln. Die beiden Phasen liegen getrennt voneinander vor. Diese idealisierte Annahme besagt, daß der Dampfvolumenteil α im Film gleich Null, im Core gleich 1 ist.

Die Filmstärke wurde von uns nach zwei Methoden berechnet (s. Abb. 32 u. 33) und zusammen mit den Meßwerten über der Dampfgeschwindigkeit aufgetragen (s. Abb. 19 bis 27). In beiden Fällen wurden die modifizierte Gl. (4.12), mit $\varphi_C = \varphi_G$ und $x_C = 1$, sowie Gl. (4.8) verwendet. Die Eingabedaten waren statischer Druck p_2 , Eintrittsgeschwindigkeit v_2 und spez. Wärmefluß q .

Im ersten Fall (s. Abb. 32) wurden der Dampfvolumenanteil α nach der von Levy in einer weiteren Arbeit [16] vorgeschlagenen Näherungsgleichung

$$1 - \alpha = \frac{1}{\phi} \quad (4.20)$$

und die Größe ϕ nach der unseren Versuchen entstammenden Gl. (4.9) bestimmt. Die auf diese Weise berechneten Filmstärken zweier Versuchsserien mit recht unterschiedlich hohen Wärmeflüssen ($q = 272$ und 629 W/cm^2) sind in Abb. 19 dargestellt. Der Vergleich zeigt geringe Abweichungen der gerechneten von den gemessenen Werten bei niedrigem Wärmefluß, jedoch große Abweichungen bei hohem Wärmefluß. Diese Erscheinung ergibt sich auch bei der zweiten, weiter unten beschriebenen Berechnungsmethode. Sie wird dort ausführlich diskutiert.

Wird statt der Gl. (4.9) die von Chen gefundene Korrelation, Gl. (4.7), auf unsere Meßergebnisse angewandt, so weichen die berechneten Filmstärken sowohl bei kleinem als bei großem Wärmefluß erheblich von den gemessenen Werten ab. Das war zu erwarten, da die Meßergebnisse von Chen und Kalish zum Zweiphasendruckverlust bereits stark von den unseren abwichen.

Im zweiten Fall (s. Abb. 33) wurde die Filmstärke, ausgehend von einem willkürlichen Wert, so lange iteriert, bis der Massendurchsatz des Films, der sich aus der radialen Geschwindigkeitsverteilung (vgl. Abschnitt 4.3.2) ergab, mit dem Durchsatz der flüssigen Phase übereinstimmte, der durch Anwendung von Energie- und Massenbilanz festgelegt wurde.

In den Abb. 20 bis 26 sind die Filmstärken für jeweils einen konstanten Wärmefluß aufgetragen. Der aufgebrachte Schutzgasdruck dient nur als Unterscheidungsparameter der einzelnen Versuchsserien. Er ist nicht charakteristisch, da sich der mittlere Druck in der Meßstrecke auch bei kon-

stantem Gasdruck abhängig vom Dampfgehalt änderte. In den Diagrammen sind auch die gemessenen Filmstärken als arithmetische Mittelwerte aus den zwei Meßwerten dargestellt. Zeigte die obere Filmstärkenmessung infolge pulsierender Rückströmung von Flüssigkeit aus der Kondensationskammer (re-entry), welche zu einer z.T. beträchtlichen Erhöhung des Mittelwertes der Filmstärke führte, große Schwankungen, wurde nur der untere Meßwert berücksichtigt. Besagte Schwankungen traten einmal zu Beginn einer Testserie auf, wo relativ große und damit auch instabile Filmstärken verzeichnet wurden, zum anderen am Ende einer Serie, wo hohe Dampfgeschwindigkeiten zu einem recht unruhigen Ablauf der Kondensation führten.

Den Diagrammen ist folgendes zu entnehmen: Für den Fall kleiner Wärmeflüsse ($q \lesssim 365 \text{ W/cm}^2$, Abb. 20 bis 22) stimmen die unter der Annahme reiner Ringströmung errechneten Werte in etwa überein, d.h. der Tropfengehalt des Kerns ist praktisch Null. Mit zunehmendem Wärmefluß wird der Unterschied zwischen den gerechneten und gemessenen Filmstärken immer größer, derart, daß die gemessenen Werte konsequent kleiner werden. Daraus folgt, daß die Flüssigkeitsmenge, die als Film an der Wand strömt, immer weniger, der in Form von Tropfen in der Kernströmung vorhandene Flüssigkeitsanteil aber immer größer wird. Die reine Ringströmung geht mehr und mehr in eine Ring-Nebelströmung über (s. Abb. 23 bis 26).

Der augenscheinliche Einfluß des Wärmeflusses auf die Strömungsform wird an Hand der Abb. 27 untersucht. Hier sind für 5 Heizleistungsstufen die gemessenen Filmstärken für den Druckbereich $p_m = 1,15 \dots 1,52 \text{ bar}$ als Funktion der Dampfgeschwindigkeit aufgetragen. Dieses Diagramm ist zugleich eine Zusammenfassung der Versuche mit Beschränkung auf einen möglichst schmalen Druckbereich. Weiterhin sind im Diagramm die Linien konstanten Dampfgehalts sowie die gerechneten Filmstärkekurven der beiden Versuchsserien mit $q = 272$ bzw. 629 W/cm^2 (aus Abb. 21 bzw. 25) eingezeichnet.

Wird eine Linie konstanter Dampfgeschwindigkeit betrachtet, welche als Maß für die an der Filmoberfläche angreifende Schubspannung gewertet werden kann, so ergibt sich eine Änderung der Strömungsform mit dem spezifischen Wärmefluß: Flüssigkeitsanteil $(1-x)$ und Filmdicke s_m nehmen mit steigendem Wärmefluß zu. Dicker werdende Flüssigkeitsfilme verlieren an Stabili-

tät. Diese Tendenz begünstigt den Übergang von der reinen Ringströmung zur Ring-Nebelströmung. Da Innendurchmesser und beheizte Länge der Teststrecke während der vorliegenden Versuche konstant blieben, kann zumindest eine Abhängigkeit der Strömungsform von der aufgebrauchten Gesamtleistung festgestellt, jedoch keine allgemein gültige Relation zwischen dem spezifischen Wärmefluß und der Strömungsform angegeben werden. Anders gesagt, es bleibt offen, ob und wie weit sich die Strömungsform beispielsweise bei Halbierung des spezifischen Wärmeflusses bei gleichzeitiger Verdopplung der beheizten Länge unter weitgehender Beibehaltung der Parameter (Gesamtdurchsatz, Druck, Temperatur usw.) ändert. Darüber können erst entsprechende zusätzliche Versuche Aufschluß geben. Über die Frage nach dem thermisch-hydraulischen Gleichgewicht sollte untersucht werden, welche Rolle die geheizte und welche die adiabate Strecke beim Entstehen der Ring-Nebelströmung spielt.

In Abschnitt 2.7 wurde der maximal mögliche Fehler bei der Filmstärkemessung berechnet. An dieser Stelle soll etwas über die Genauigkeit bei der Berechnung der Filmstärke ausgesagt werden. Diese Frage stellt sich z.B. bei der Betrachtung der gerechneten Filmstärken der Versuche mit niedrigen Wärmeflüssen (Abb. 20, 21 und 27), bei welchen die Rechenwerte z.T. etwas unter den Meßwerten liegen. Wie bei den Meßwerten handelt es sich bei den gerechneten Werten um mittlere Filmstärken, die unter Verwendung des Kármánschen turbulenten Profils erhalten wurden. Da bei den Filmstärken $s > 0,01$ mm die Bedingung $y^+ > 30$ erfüllt war, sollte diese Berechnungsmethode unter Einbeziehung einer gewissen Fehlerbandbreite Gültigkeit haben. Die mittlere gerechnete Filmstärke entspricht damit der Stärke eines Films mit glatter Oberfläche, in dem der Dampfvolumenteil $\alpha = 0$ ist. Filme mit glatten oder welligen Oberflächen ergeben den gleichen Film-Flüssigkeitsanteil.

4.5 Kritischer Wärmefluß

Bei Dryout oder bei Überschreiten des kritischen Wärmeflusses verschwindet der Flüssigkeitsfilm an der Wand. Bei reiner Ringströmung wäre der Dampfgehalt dann 100 %, eine Flüssigkeitsphase ist also nicht mehr vorhanden. Bei der Ring-Nebelströmung kann demgegenüber noch eine nennenswerte Flüssigkeitsmenge in Form von Tropfen im Kern strömen, wenn kein Film mehr an der Wand besteht. Dryout tritt hier bei Dampfgehalten $x < 100$ % ein.

Zur Analyse des kritischen Wärmeflusses hat Tippetts [17] die Stabilitätsbedingungen des Flüssigkeitsfilms mit welliger Oberfläche verwendet. Die in dieser Rechenmethode auftretenden experimentellen Konstanten sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Ein anderes analytisches Verfahren wurde von Biasi et al. veröffentlicht [18]. Hier wird die Ringströmung im beheizten Kanal unter Nicht-Gleichgewichtszuständen beschrieben. Ausgehend vom Gleichgewichtszustand werden die Wechselwirkungen zwischen Film und Kern betrachtet und die Bedingungen für einen burn-out bestimmt. Costa und Charlety [19] haben die kritischen Bedingungen mit einer graphischen Methode aus experimentellen Daten ermittelt.

Der Ort, an dem im Versuch Dryout auftritt, ist mit großer Wahrscheinlichkeit der Austritt der beheizten Strecke. Wegen verschiedener instationärer Vorgänge, so z.B. der welligen Oberfläche des Films, ist das völlige Verschwinden des Films ein statistisches Phänomen. Es ist daher nicht möglich, die Bedingungen für Dryout oder kritischen Wärmefluß mit großer Genauigkeit und Sicherheit zu bestimmen. Es kann lediglich ein Bereich angegeben werden. Als Ergänzung bzw. zur Überprüfung unserer Messungen wurde die kritische Eintrittsgeschwindigkeit v_2 auch berechnet (s. Abb. 34).

Eingabedaten waren der Wärmefluß und der Druck p_2 am Austritt der ungeheizten Strecke. Als Druck wurde jener Wert, der während der letzten (kritischen) Versuchsphase gemessen worden war, verwendet. Wie im Versuch wurde der Massendurchsatz in beliebig gewählten, am Anfang größeren, später kleineren Schritten reduziert. Bei jedem Schritt wurde die Filmstärke über die im Abschnitt 4.3.2 erwähnte Näherungsfunktion $s_f = f(F')$ aus Abb. 16 berechnet. Nach Erreichung eines gewissen minimalen Durchsatzes wurde der Massendurchsatz des Films grafisch auf Null extrapoliert. Wegen des nichtlinearen Verlaufs der Funktion $G_F = f(v_2)$ und wegen der Unstetigkeit in der Berechnung des Druckabfalls Δp_L beim Unterschreiten des Grenzwertes der Re-Zahl (hier: $Re_{kr} = 2000$, vgl. Gl. (4.6)) konnte nicht rechnerisch linear extrapoliert werden. Die auf diese Weise ermittelte Geschwindigkeit v_2 (s. Tab. 7, letzte Spalte) wurde als kritische Geschwindigkeit betrachtet.

Mit der umgeformten Gl. (4.5) wurde die kritische Geschwindigkeit auch unter der Annahme, daß alle Flüssigkeit verdampft, berechnet. Das ergab jene Geschwindigkeit v_2 , bei welcher der Dampfgehalt am Austritt der geheizten Strecke zu 100 % wird. Die gerechneten und die gemessenen v_2 -Werte sind in Tab. 7 zusammengefaßt. Bei den Meßwerten handelt es sich um die beiden letzten Geschwindigkeitsstufen einer jeden Testserie, bevor die Leistung infolge Überhitzung der Teststrecke abgeschaltet wurde.

Ein Teil der in der Tabelle aufgeführten kritischen Geschwindigkeiten ist in Abb. 28 als Funktion der Wärmeflußdichte aufgetragen. Das Kriterium für die Auswahl hierzu war der statische Druck p_2 in einer möglichst schmalen Bandbreite. Die gerechneten Werte sind jeweils durch Linien verbunden. Aus Abb. 28 wie auch aus Tab. 7 ist ersichtlich, daß die gemessenen Geschwindigkeiten während des Dryouts oft nur ganz wenig von den nach dem Modell der Ring-Nebelströmung berechneten Werten abweichen. Dazu ist zu beachten, daß zum einen bei den Rechenwerten durch die vorhin beschriebene Extrapolation sowie durch den flachen Verlauf der Kurve $F' = f(s_r)$ für kleine s_r Fehlermöglichkeiten bestehen, zum anderen die gemessenen Werte von einer mehr oder weniger feinen, letztlich jedoch willkürlichen Abstufung der Geschwindigkeit im Versuch herrühren. Wie bereits im Abschnitt 4.1 am Beispiel des Versuches Nr. 15/60 gezeigt wurde, hätte in einigen wenigen Versuchen der Durchsatz wahrscheinlich noch etwas weiter reduziert werden können, um ein spontanes und völliges Austrocknen des oberen Bereiches der beheizten Teststrecke herbeizuführen. Auf der anderen Seite, z.B. im Versuch Nr. 15/66, hätte möglicherweise auch eine etwas höher liegende Durchsatzgeschwindigkeit spontanen Dryout bewirkt. Unter Einbeziehung einer gewissen Toleranz nach oben hin kann daher die unter Annahme einer Ring-Nebelströmung berechnete Geschwindigkeit als unterer Grenzwert gelten.

Das Rechenverfahren nach Abb.34 ist nicht geeignet, Mikroerscheinungen zu untersuchen. So kann z.B. nicht festgestellt werden, ob ein Dryout in einem vorliegenden Fall auf quasi-stationäre oder dynamische Ursachen zurückzuführen ist. Die Rechenmethode ist aber verwendbar, um eine Grenzgeschwindigkeit oder Grenzdurchsatzmenge zu bestimmen, unterhalb der Dryout mit großer Wahrscheinlichkeit auftritt. Mit steigenden Wärmeflüssen liegen die gemessenen Durchsatzwerte zunehmend höher als die unter der Annahme vollständiger Verdampfung gerechneten Werte. Letztere Methode ist also nicht geeignet, die Dryout-Bedingungen bestimmen zu können.

In Abb. 29 sind die (konstanten) Wärmeflüsse über dem Dampfgehalt, der für die beiden letzten, gemessenen Geschwindigkeitsstufen der einzelnen Versuchsserien in der Mitte der Meßstrecke berechnet wurde, dargestellt. Parameter ist der Druck, unterteilt in 4 Bereiche. Versuchspunkte, bei denen aus dem Temperatursignal am Ende der beheizten Strecke (T_G oder T_F) nicht mit voller Sicherheit auf einen Dryout geschlossen werden kann, sind besonders gekennzeichnet. Die Kurven verbinden die nach dem Modell einer

Ring-Nebelströmung gerechneten Werte des Dampfgehaltes für den Fall, daß die Filmstärke am Ende der beheizten Strecke gerade verschwindet. Nach diesem Verfahren wurden bereits die in der Tab. 7 enthaltenen kritischen Geschwindigkeiten v_2 berechnet. Danach ist ersichtlich, daß bei konstantem Wärmefluß ein höherer Druck einen höheren Dampfgehalt, d.h. eine niedrigere Durchsatzgeschwindigkeit, zuläßt, bevor es zur Austrocknung der zu kühlenden Fläche kommt. Die Tatsache, daß die gemessenen Werte nicht streng diese Gesetzmäßigkeit erfüllen, liegt darin begründet, daß, wie schon erwähnt, die Abstufung der Geschwindigkeit im Versuch mehr oder weniger willkürlich geschah.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Resultate der Untersuchungen und die Schlußfolgerungen aus ihnen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Für die hier untersuchte Geometrie stellten sich, nach einer gewissen Anlaufstrecke im beheizten Teil der Teststrecke, die Strömungsformen reine Ringströmung und Ring-Nebelströmung als dominierend heraus. Der Vergleich mit der Rechnung nach dem Modell idealer Ringströmung läßt erkennen, daß bei niedrigen Wärmeflüssen nahezu reine Ringströmung, bei höheren Wärmeflüssen Ring-Nebelströmung vorlag.
2. Um Modelle zur Zweiphasenströmung zuverlässig anwenden zu können, ist eine genaue Kenntnis des Zweiphasendruckverlustes notwendig.
3. Eine allgemein gültige Vorhersage des Zweiphasendruckverlustes über einen weiten Bereich mit verschiedenartigen Geometrien, Drücken und Strömungsmedien scheint zur Zeit nicht möglich. Weder die Beziehungen von Lockhart und Martinelli [9] (aus Wasserversuchen) noch die von Chen und Kalish [8] (aus Versuchen mit Kalium) erwiesen sich als brauchbar für die Anwendung auf unsere Meßergebnisse. Im Falle des Natriums sind weitere Untersuchungen bei Veränderung der Teststreckengeometrie neben der anderer Parameter erforderlich. Eine naheliegende Möglichkeit wäre, bei gleichem Innendurchmesser der Teststrecke, die beheizte Länge wahlweise auf das Doppelte bzw. Dreifache zu erweitern. Diese zusätzlichen Experimente haben eine Verbesserung der Zweiphasenmodelle zum Ziel, indem sowohl der Einfluß der Geometrie als auch der der spezifischen physikalischen Eigenschaften des Strömungsmediums untersucht werden.

4. Die Grenzbedingungen für das Auftreten kritischen Wärmeflusses können mit bestehenden Modellen abgeschätzt werden, vorausgesetzt, daß der Zweiphasendruckverlust bekannt ist.

6. Nomenklatur

a	-	Konstante
b	-	Konstante
c_p	J/kg	Spezifische Wärme
D	mm	Innendurchmesser der Teststrecke
F, F'	-	Funktionen der relativen Filmstärke
G	kg/sm ²	Auf den Teststreckenquerschnitt bezogener Massendurchsatz
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
I	A	Stromstärke
L	m	Länge
p	bar	Druck
q	W/cm ²	Heizflächenleistung
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R	-	Funktion des Dichteverhältnisses
r	J/kg	Verdampfungsenthalpie
S	-	Schlupf
s_1, s_2	mm	Filmstärken
T	°C	Temperatur (Indizes bzw. Ort der Thermolemente s. Abb. 3)
U	V	Spannung
u	m/s	Phasengeschwindigkeit
u^+	-	Dimensionslose Geschwindigkeit
v_2	m/s	Natrium-Eintrittsgeschwindigkeit
X_{LM}	-	Lockhart-Martinelli-Parameter
x	-	Dampfgehalt
y^+	-	Dimensionsloser Wandabstand

z	-	Koordinate
α	-	Volumenanteil des Dampfes
δ	mm	Rohrwanddicke
μ	Ns/m ²	Dynamische Viskosität
ϱ	kg/m ³	Dichte
σ	A/Vm	Elektrische Leitfähigkeit
τ	N/m ²	Scherspannung
ϕ, ϕ'	-	Druckverlustmultiplikator bezüglich des Reibungs- bzw. des Gesamtdruckverlustes

Indizes

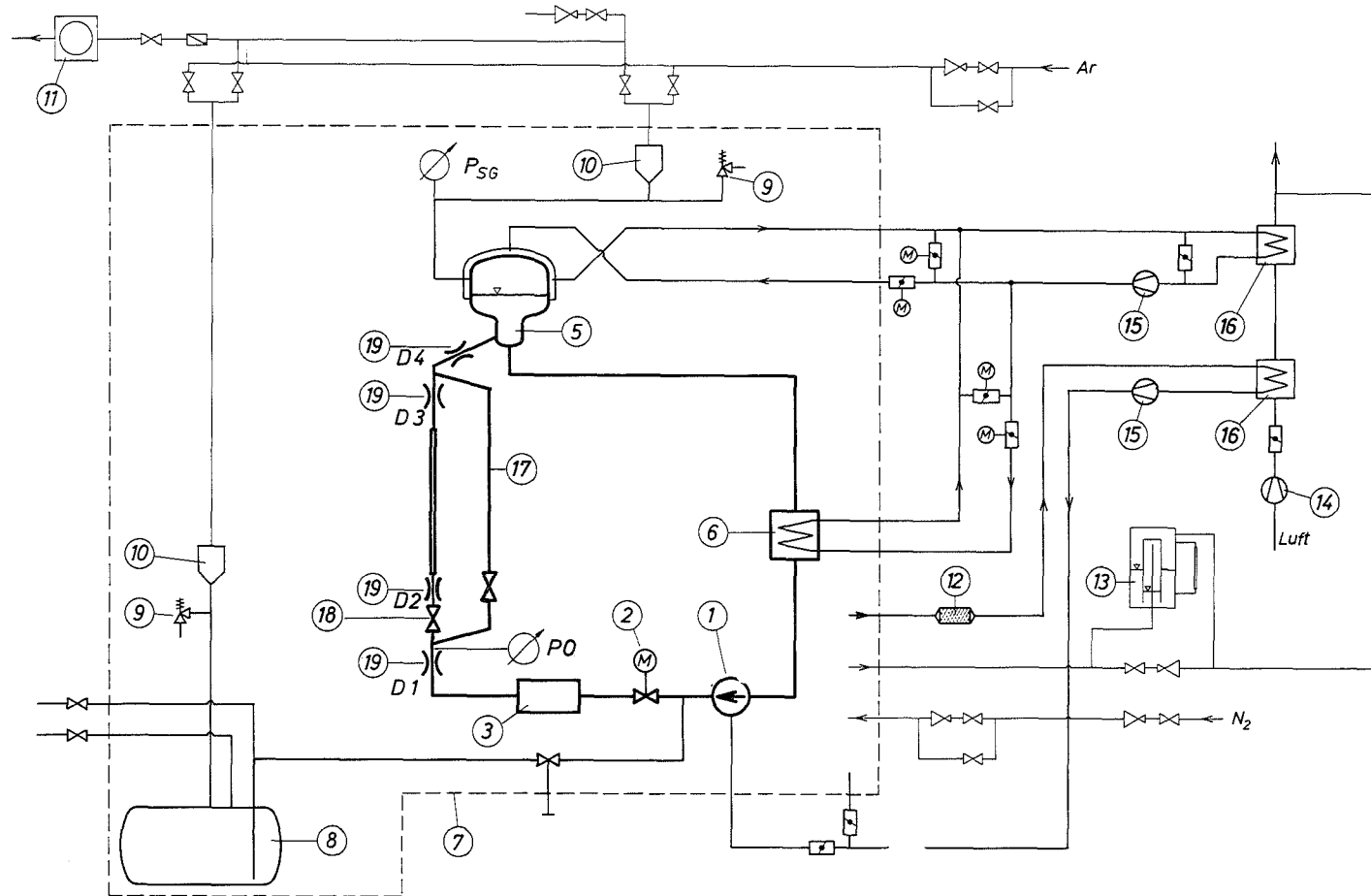
1 Ph	einphasig	L	Flüssigkeit
2 Ph	zweiphasig	ll	laminar-laminar
B	Beschleunigung	m	im Mittel
C	Kernströmung	Na	Natrium
E	Elektrode	R	Rohr
e	Eintritt	R	Reibung
eff	effektiv	RN	Ring-Nebelströmung
F	Film	RR	reine Ringströmung
G	Gas bzw. Dampf	r	relativ
ges	gesamt	SG	Schutzgas
H	Höhe	tt	turbulent-turbulent
h	beheizt	W	Wand
kr	kritisch		

7. Literaturverzeichnis

- [1] F.W.Peppler:
Experimentelle Untersuchungen der Siedevorgänge mit Natrium
in engen Kanälen und deren Anwendung auf schnelle Reaktoren.
KFK-Ext. 8/72-1 (Febr. 1972)
- [2] Das Institut für Reaktorentwicklung des Kernforschungszentrums
Karlsruhe. Ein Überblick. Zusammengestellt von W.Kramer,
KFK-Ext. 8/71-4 (März 1971)
- [3] A.Kaiser, W.Peppler, L.Vöröss:
Flow Pattern, Two-Phase Pressure Drop, and Critical Heat Flux
of Sodium under Forced Convection Conditions, Int. Meeting on
Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, Paper No. 41, Oktober 1973
- [4] A.Kaiser, W.Peppler, L.Vöröss:
Type of Flow, Pressure Drop, and Critical Heat Flux of a
Two-Phase Sodium Flow. Nuclear Engineering and Design; 30
(1974) , S. 305-315
- [5] M.Audoux, F.W.Katz , W.Olbrich, E.G.Schlechtendahl:
SEDAP, an Integrated System for Experimental Data Processing.
KFK 1594, EUR 4730e, Jan. 1973
- [6] O.A.Steen, G.B.Wallis:
The Transition from Annular to Annular-Mist Co-Current
Two-Phase Downflow. Interim Report NYO-3114-2, UC-38, 1964
- [7] S.Levy:
Prediction of Two-Phase Annular Flow with Liquid Entrainment.
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 9, 1966, S. 171-188
- [8] J.C.Chen, S.Kalish:
An Experimental Investigation of Two-Phase Pressure Drop for
Potassium with and without Net Vaporization. Heat Transfer
Conf., Paris-Versailles, Chapt. B 8.3, 1970

- [9] R.W.Lockhart, R.C. Martinelli.
Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase Two-
Component Flow in Pipes. Chem. Eng. Progress 45, 1949, S. 39-48.
- [10] H.Lurie:
Steady State Sodium Boiling and Hydrodynamics
NAA-SR-11586, 1966
- [11] P.Alia, L.Clavordo, A.Hassid, E.Pedrocchi:
Phase and Velocity Distribution in Two-Phase Adiabatic
Annular Dispersed Flow.
Energie Nuclear, Vol. 15, 1968
- [12] L.Biasi, G.C.Clerici, R.Sala, A.Tozzi:
Studies on Film Thickness and Velocity Distribution
of Two-Phase Annular Flow.
EUR 3765e, 1968
- [13] CISE Reports R 35 (1961), R 53 (1963), and R 73 (1963)
- [14] E.O.Moeck, J.W.Stachievicz:
A Droplet Interchange Model for Annular-Dispersed, Two-
Phase-Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15 (1972),
S. 637-653
- [15] G.B.Wallis:
Annular Two-Phase Flow, Teil I und II, Transaction of the
ASME, J. of Basic Eng., Vol. 92, Series D, No. 1 (1970),
S. 59-72 und 73-82
- [16] S.Levy:
Steam Slip - Theoretical Prediction from Momentum Model.
J. of Heat Transfer, Vol. 82 (1960), S. 113-124
- [17] F.E.Tippets:
Analysis of the Critical Heat-Flux Condition in
High-Pressure Boiling Water Flows.
J. of Heat Transfer, Febr. 1964, S. 23-37

- [18] L.Biasi, G.C.Clesici, R.Sala, A.Tozzi:
A Non-Equilibrium Description of Two-Phase Annular Flow.
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 12 (1969), S. 319-331
- [19] J.Costa, P.Charlety:
Critical Heat Experiments in a Forced Convection
Boiling Sodium Loop.
Int. Seminar Heat Transfer in Liquid Metal, Trogir, 1971



- 1 EM-Pumpe (3 at , 9 m³/h)
- 2 Pneum. Schnellschluß- und Regelventil
- 3 Vorheizer (18 kW)
- 4 Teststrecke
- 5 Ausdehnungsbehälter (300 Liter , 700°C , 10 atü)
- 6 Wärmetauscher Na - N₂ , A = 0,4 m² , $\theta_m = 540$ °C
- 7 Schutzbehälter

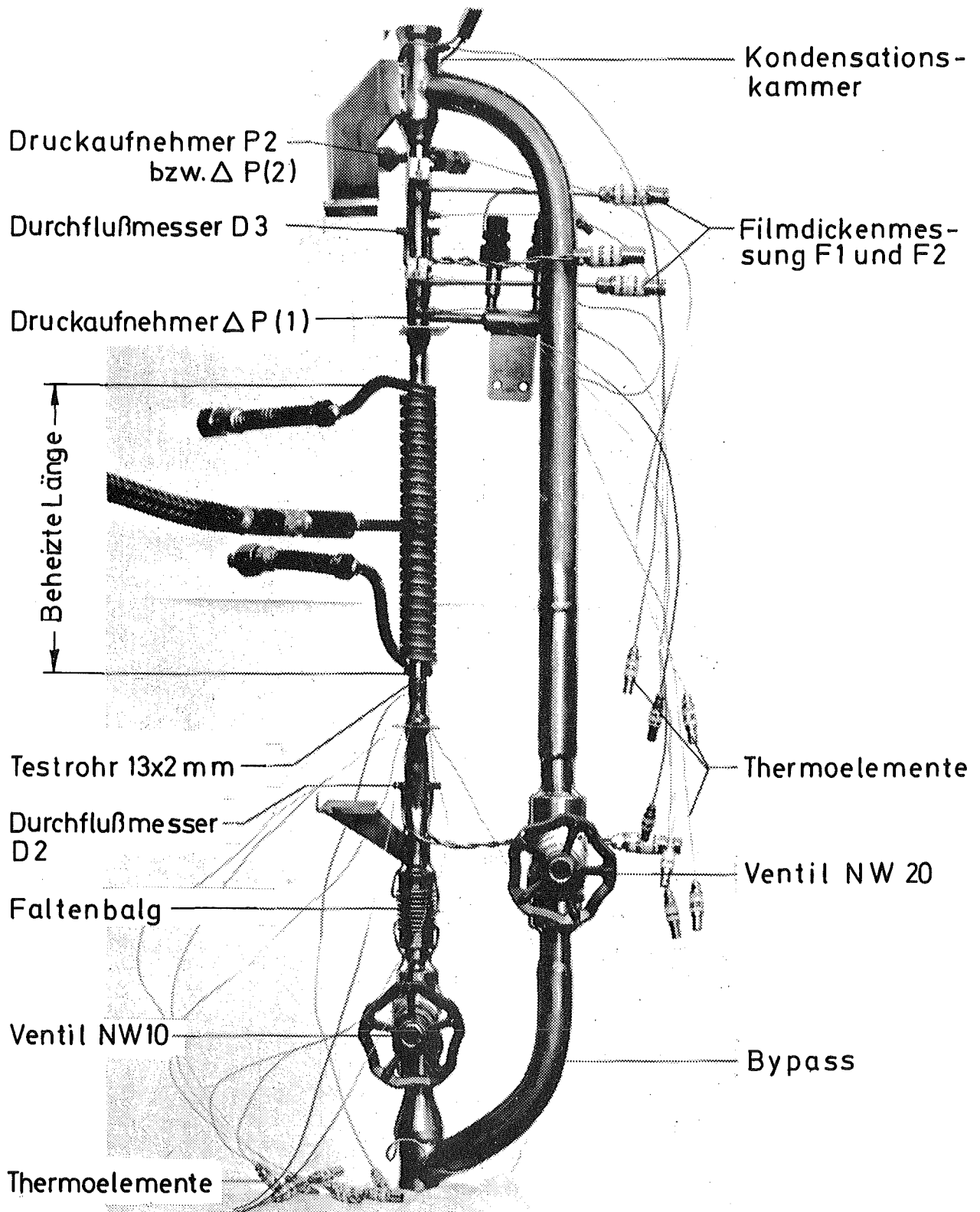
- 8 Abfalltank (370 Liter , 500°C , 2 atü)
- 9 Sicherheitsventil
- 10 Dampfalle
- 11 Vakuumpumpe
- 12 Filter
- 13 Abblas - System Schutzbehälter
- 14 Luftgebläse 1 (3500 m³/h , 80 kp/m²)

- 15 Stickstoffgebläse
- 16 Wärmetauscher N₂-Luft
- 17 Bypass
- 18 Drosselventil
- 19 Permanentmagnet-Durchflußmesser

GfK
IRE

Fließbild des Natriumsiedekreislaufs (NSK)

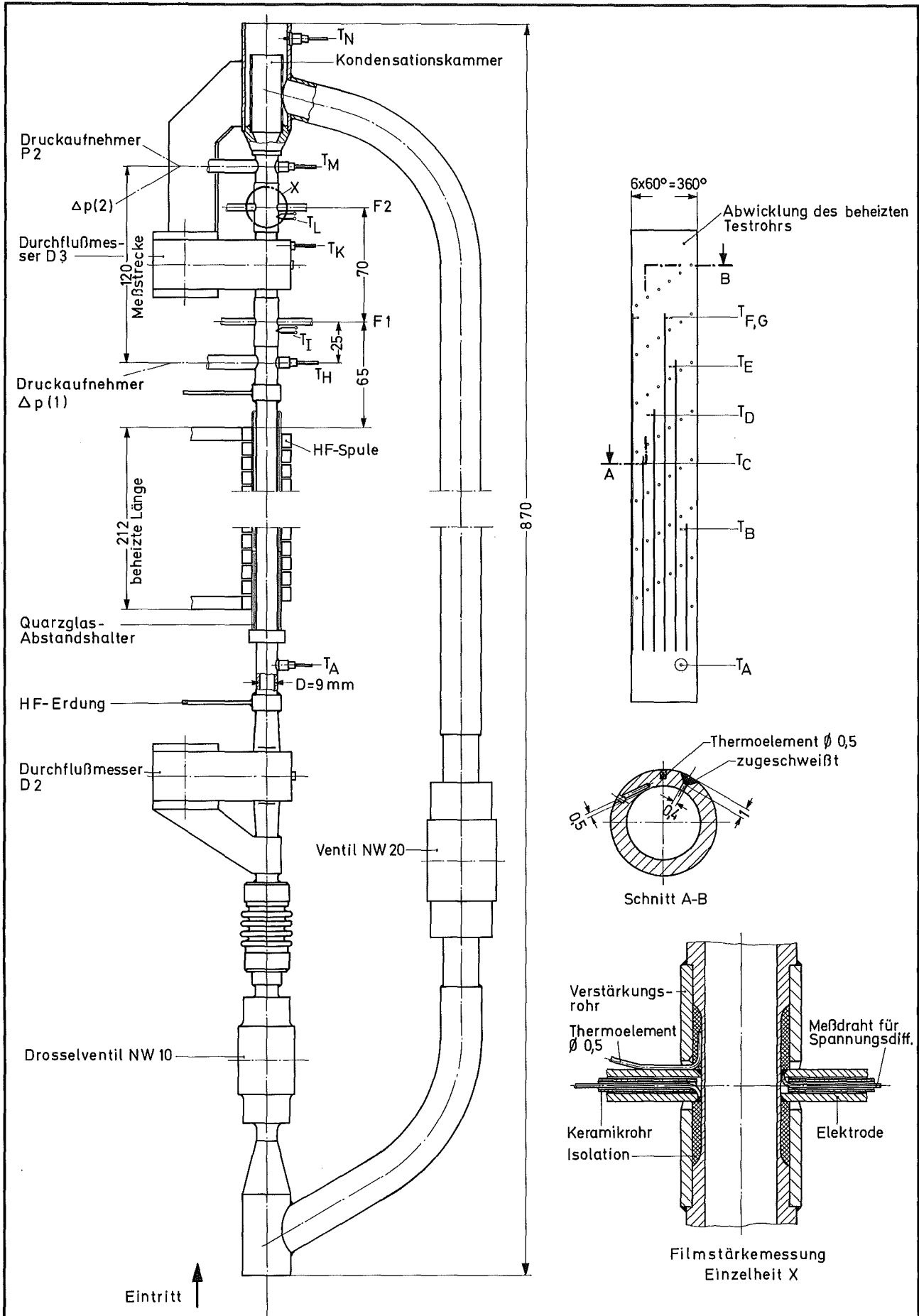
Abb. 1



GfK
IRE

Testanordnung

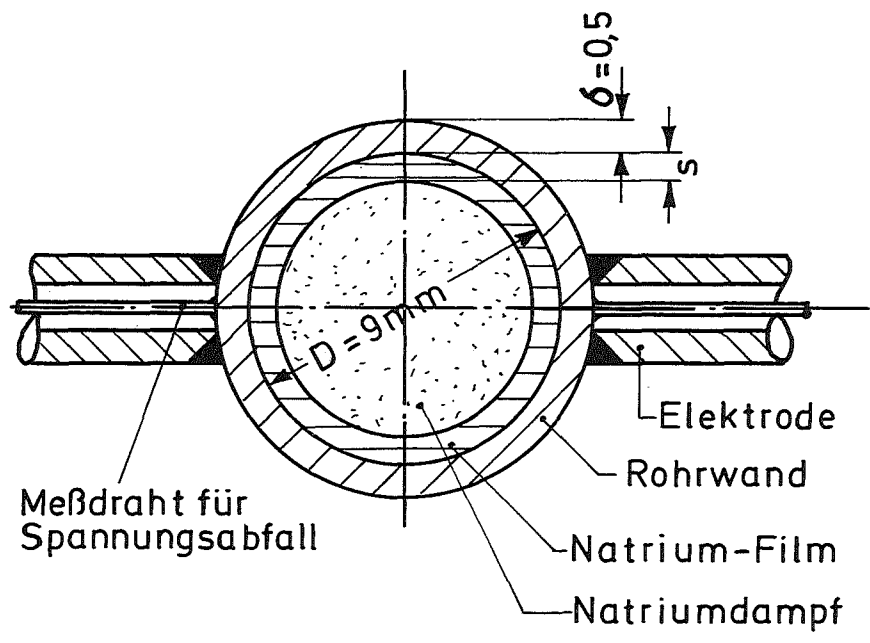
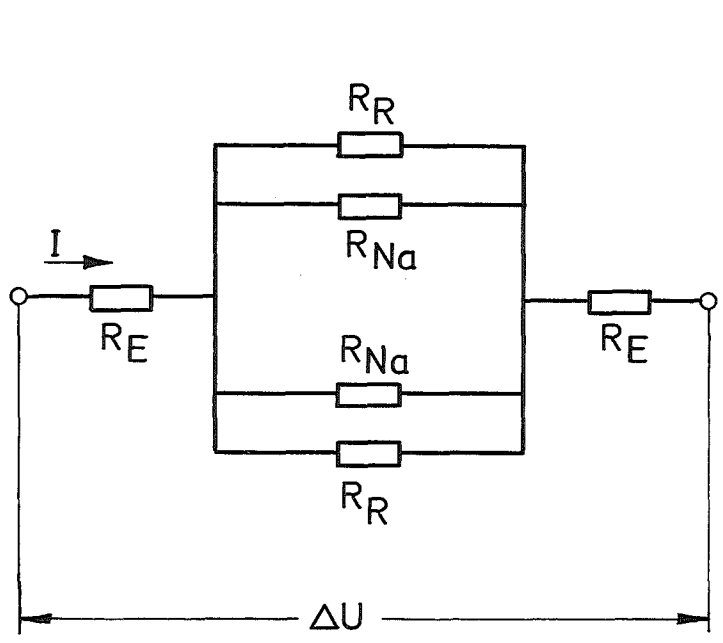
Abb. 2



GfK
IRE

Konstruktiver Aufbau der Testanordnung

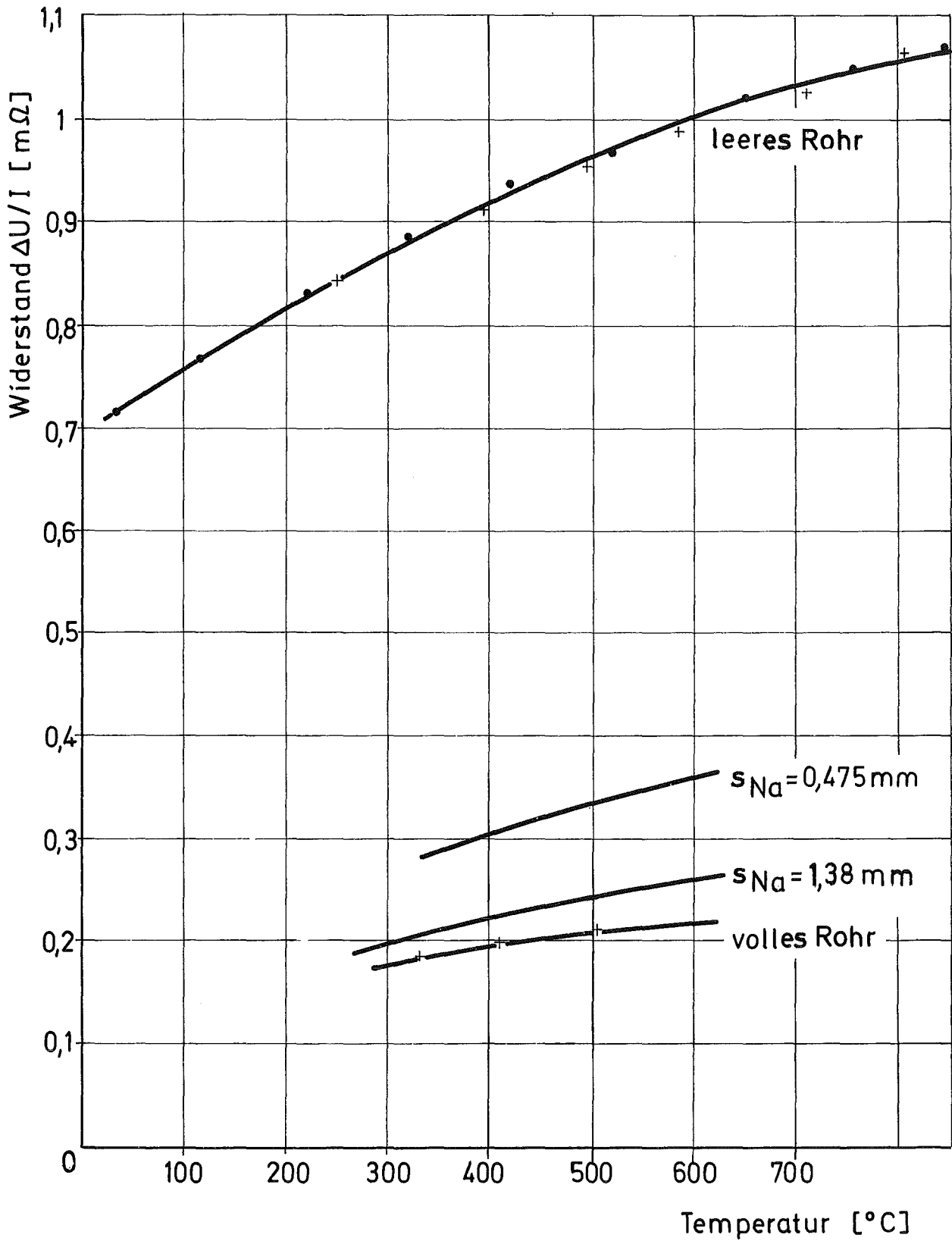
Abb. 3



GfK
IRE

Filmstärken-Meßanordnung

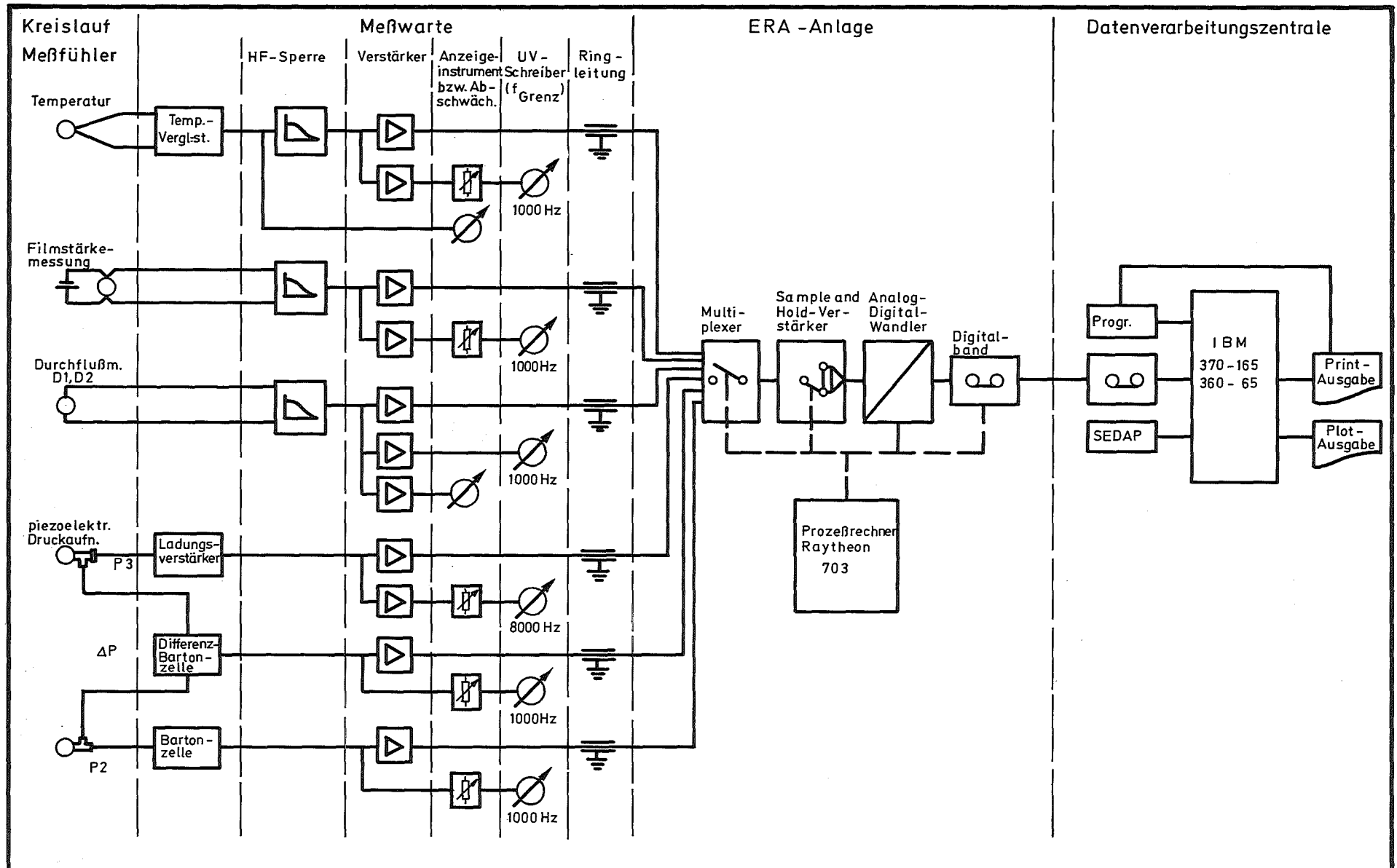
Abb. 4



GfK
IRE

Gemessener el. Widerstand R_{ges} bei
verschiedenen definierten Film-
stärken (Vorversuch)

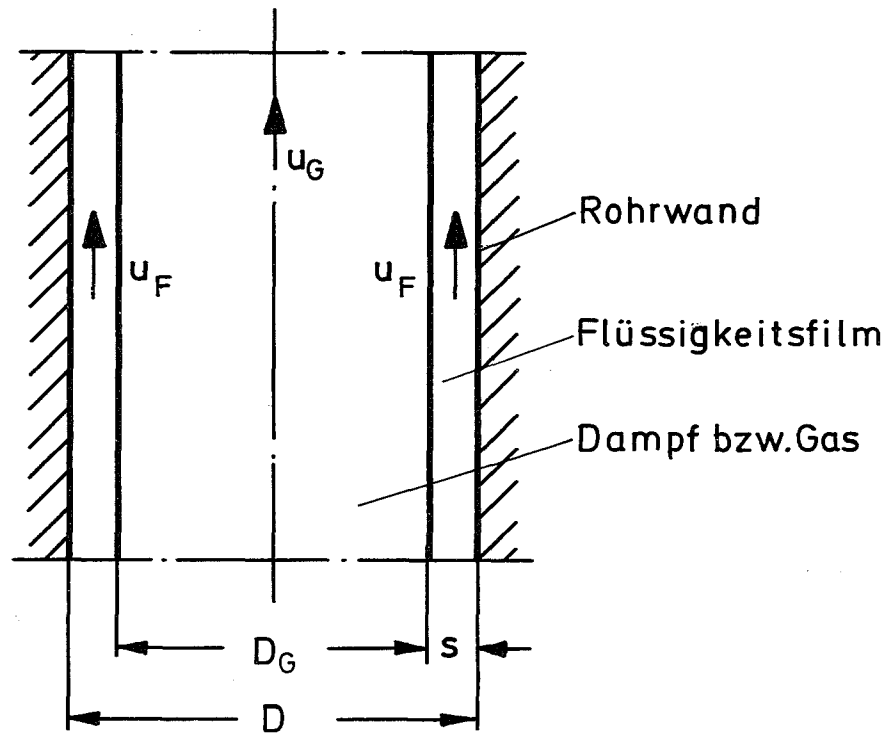
Abb. 5



GfK
IRE

Schema der Datenerfassung u.-verarbeitung

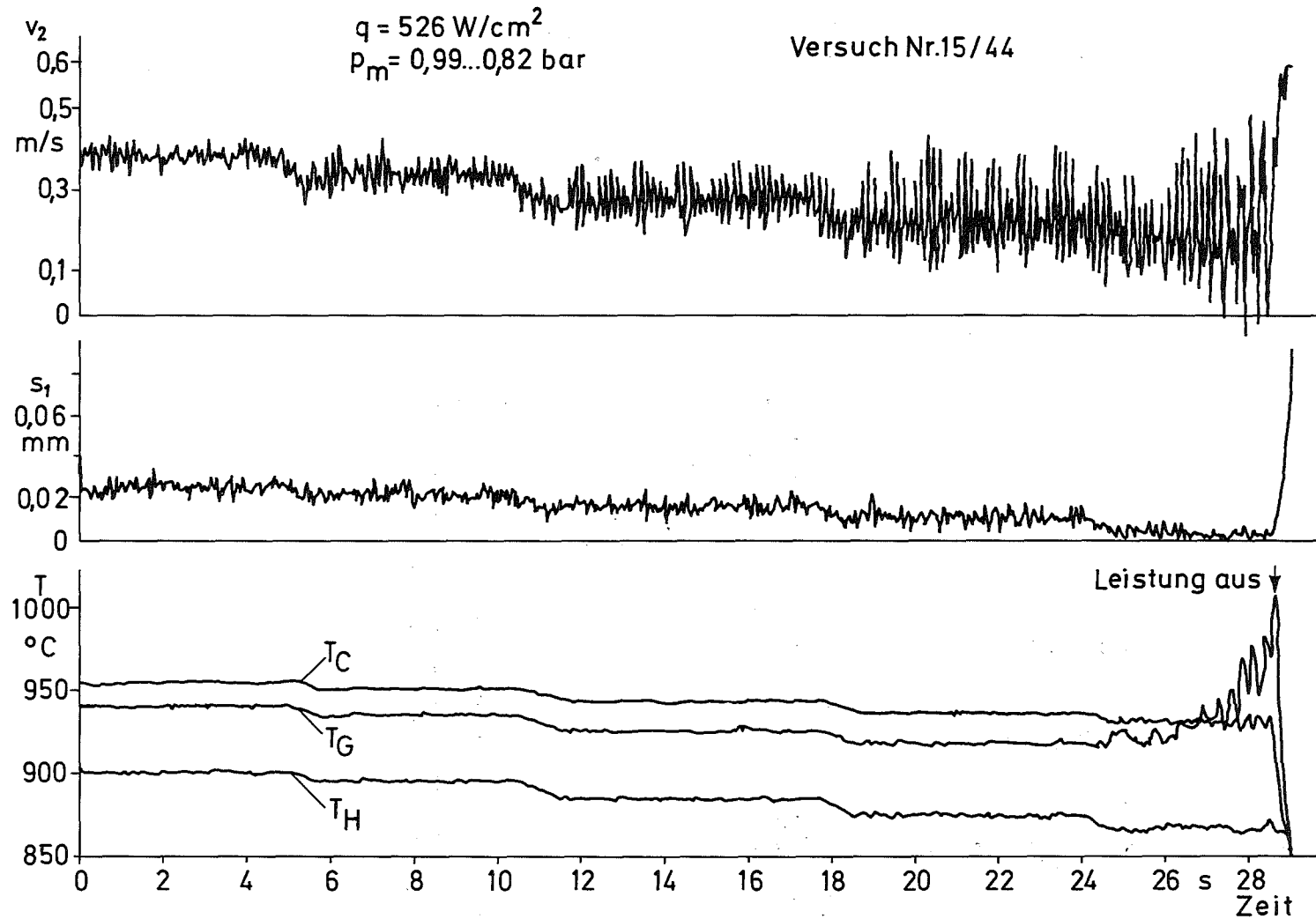
Abb. 6



GfK
IRE

Schematische Darstellung der Phasenbereiche
bei reiner Ringströmung

Abb. 7

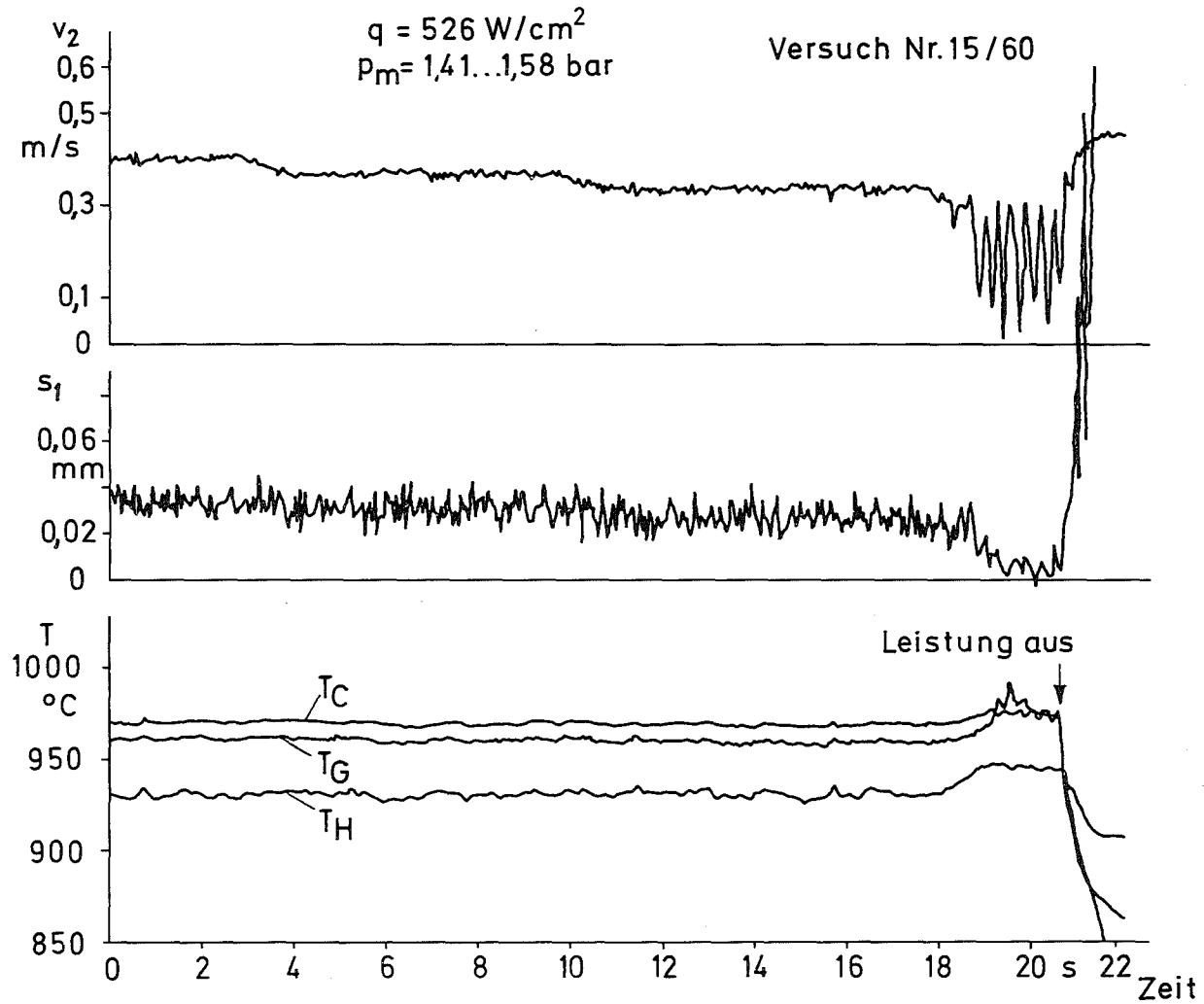


Meßwerte mit 45 Hz gefiltert

**G f K
I R E**

Eintrittsgeschwindigkeit, Filmdicke und
Temperaturen im Versuch Nr.15/44

Abb. 8

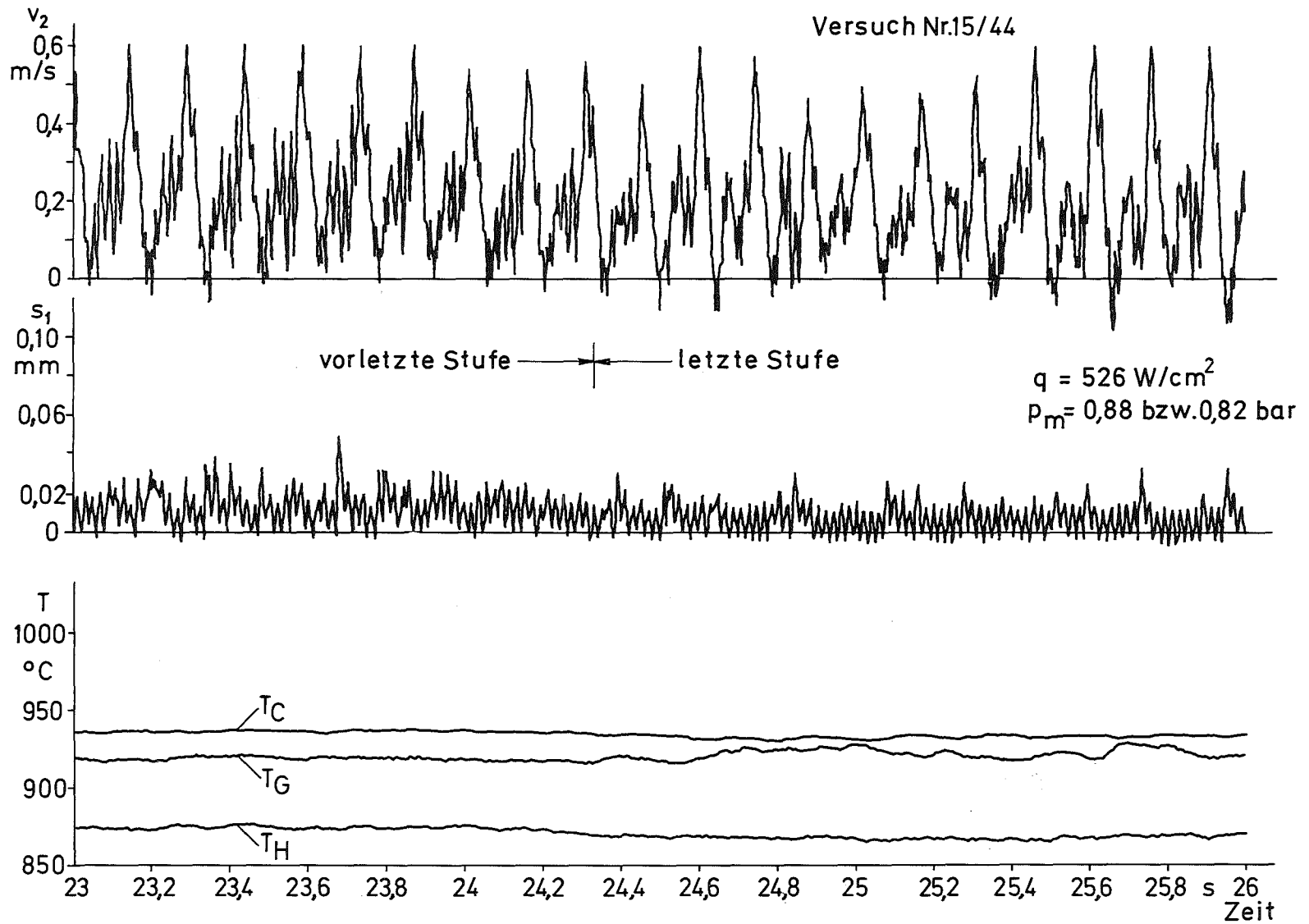


Meßwerte mit 45 Hz gefiltert

**G f K
I R E**

Eintrittsgeschwindigkeit, Filmdicke und
Temperaturen im Versuch Nr. 15/60

Abb. 9

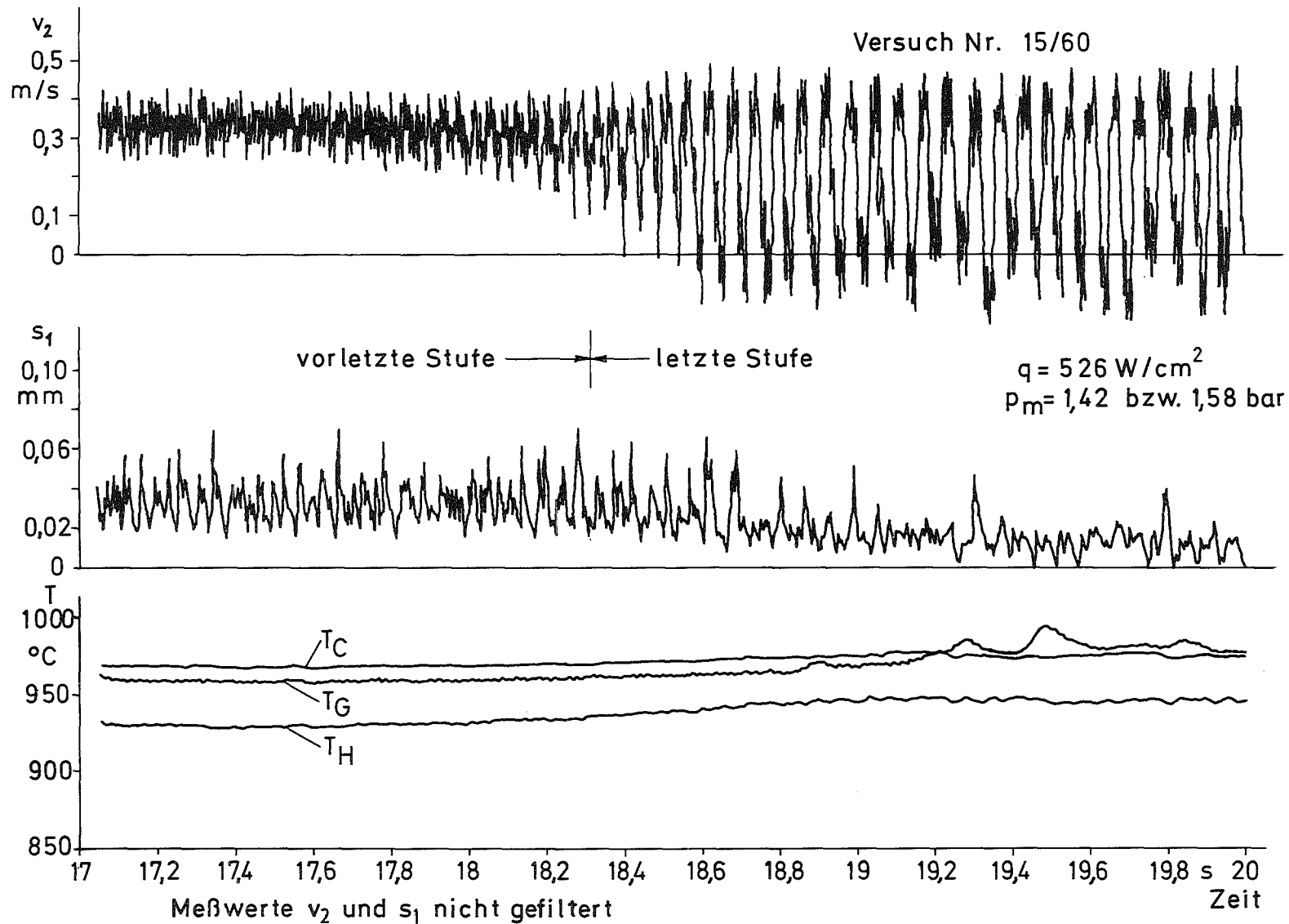


Meßwerte v_2 und s_1 nicht gefiltert

G f K
I R E

Letzte Versuchsphase bis zum Dryout
für Versuch Nr.15/44

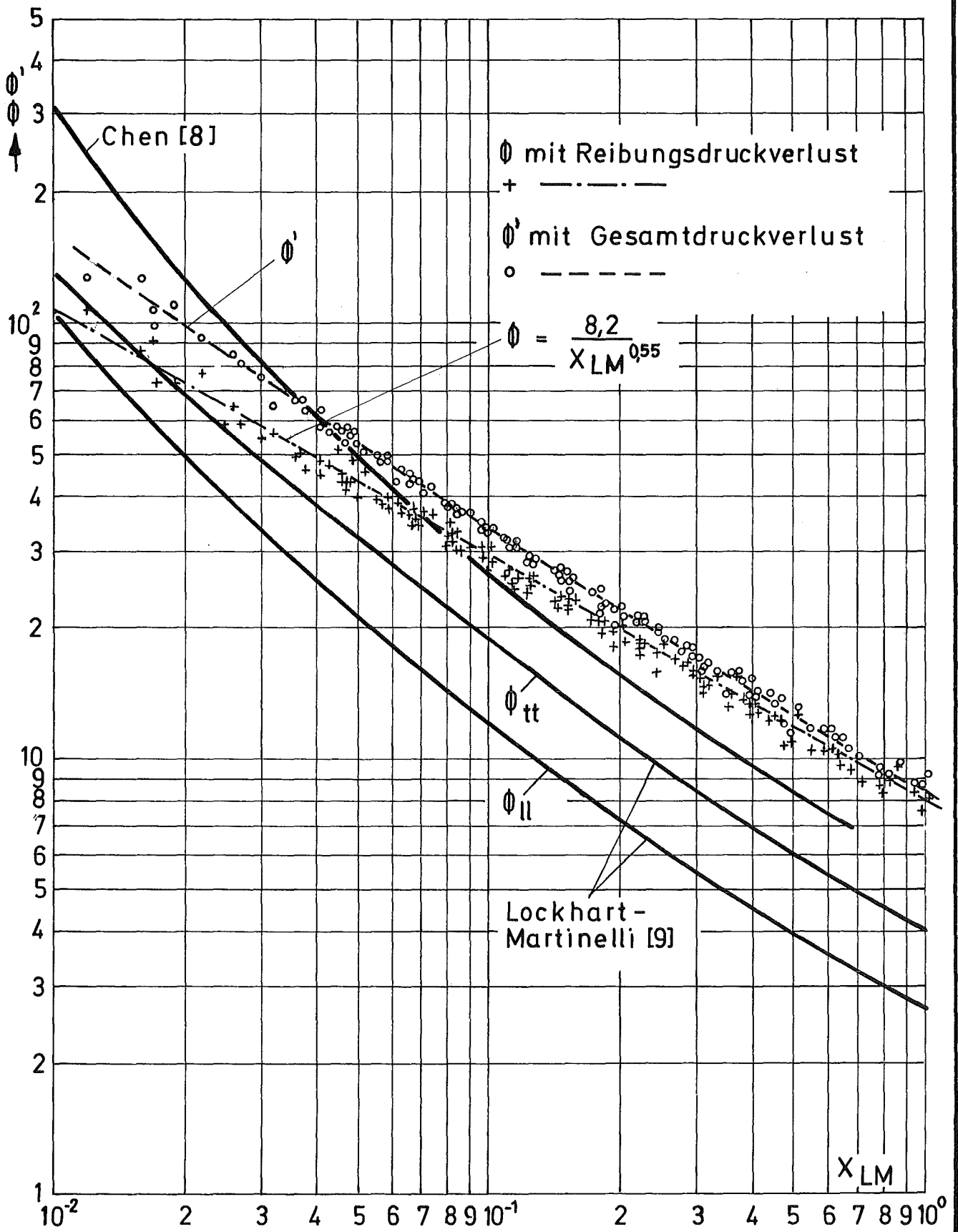
Abb.10



GfK
IRE

Letzte Versuchsphase bis zum Dryout
für Versuch Nr.15/60

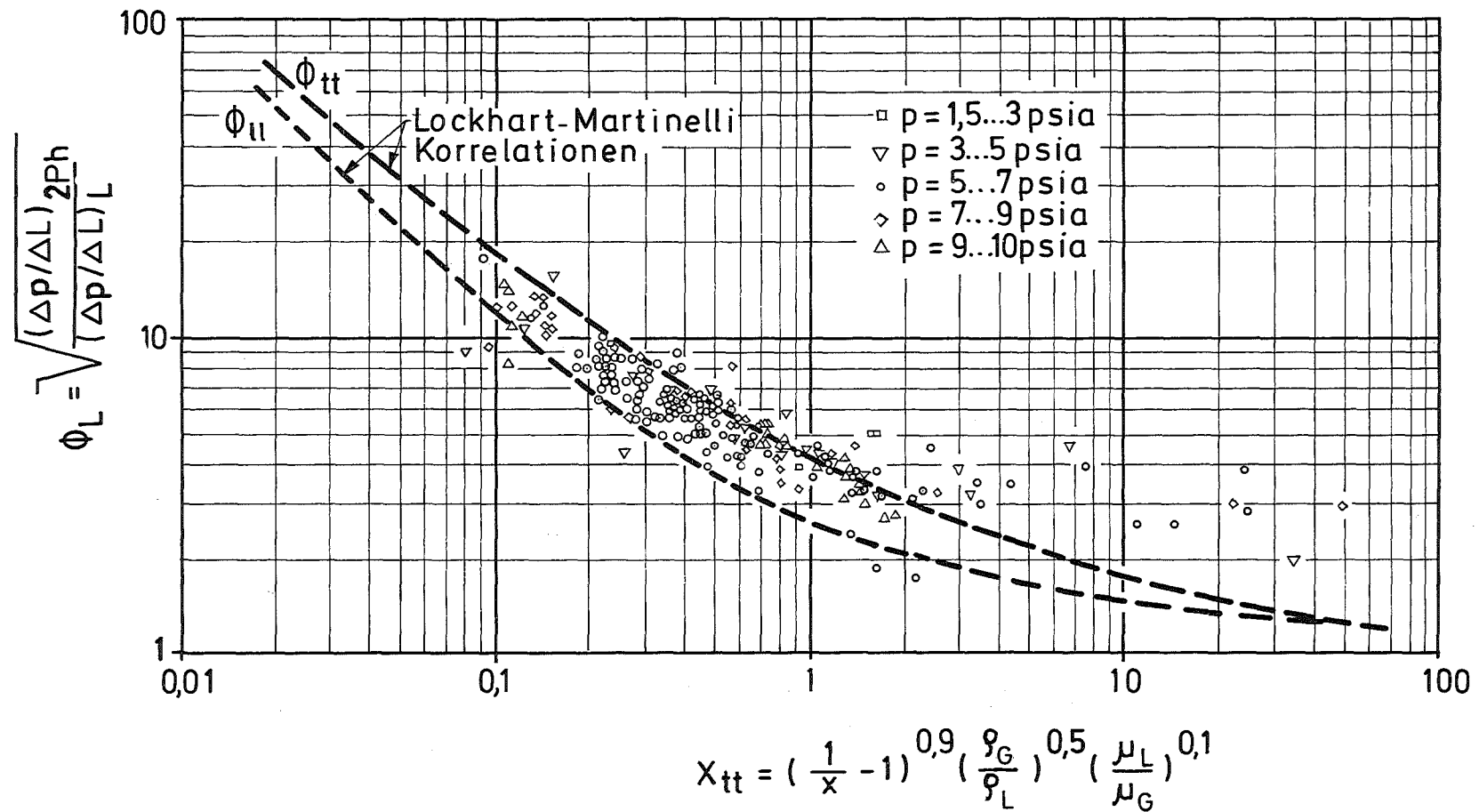
Abb. 11



GfK
IRE

Zweiphasen-Druckverlustmultiplikator ϕ_L als Fkt. des Lockhart-Martinelli-Parameters X_{LM}

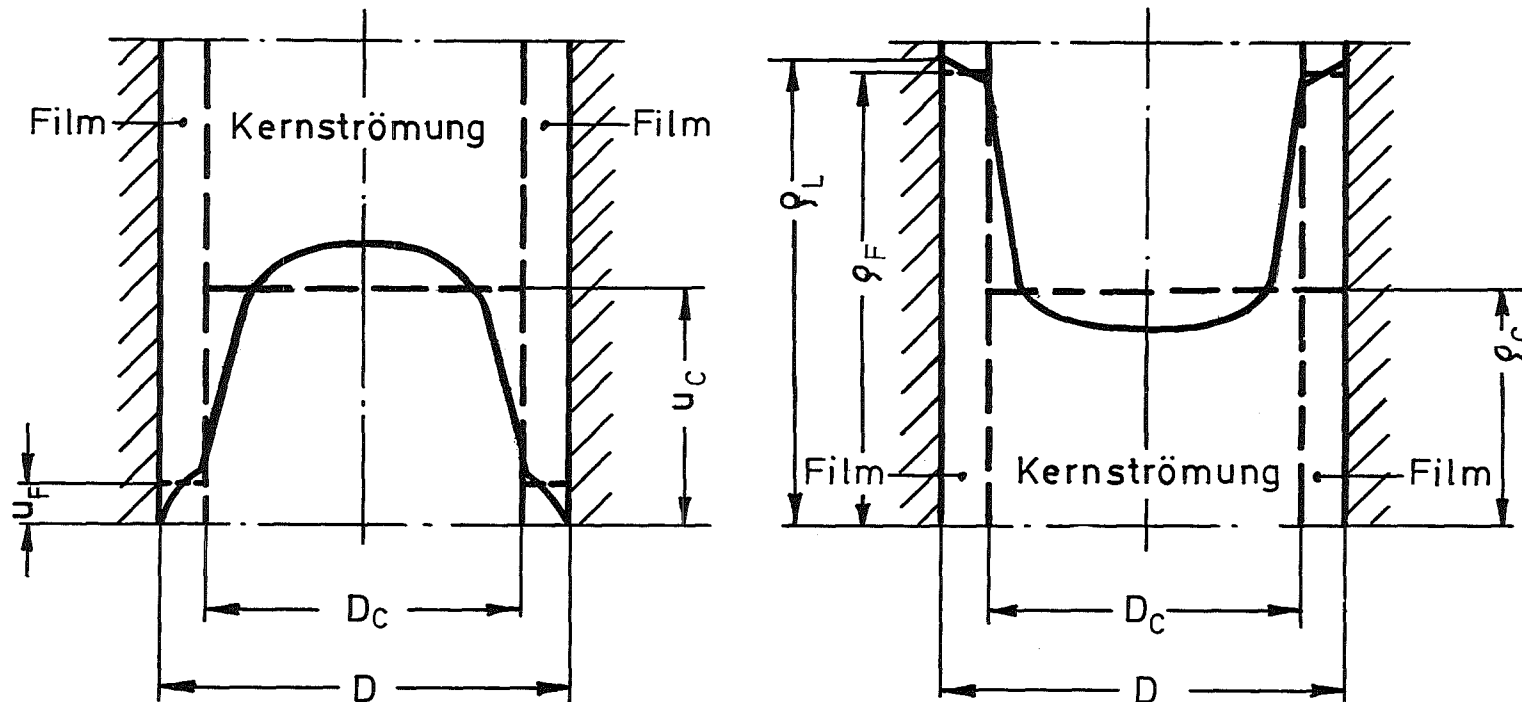
Abb. 12



GfK
IRE

Versuchsergebnisse von Lurie [10] mit
siedendem Natrium

Abb. 13



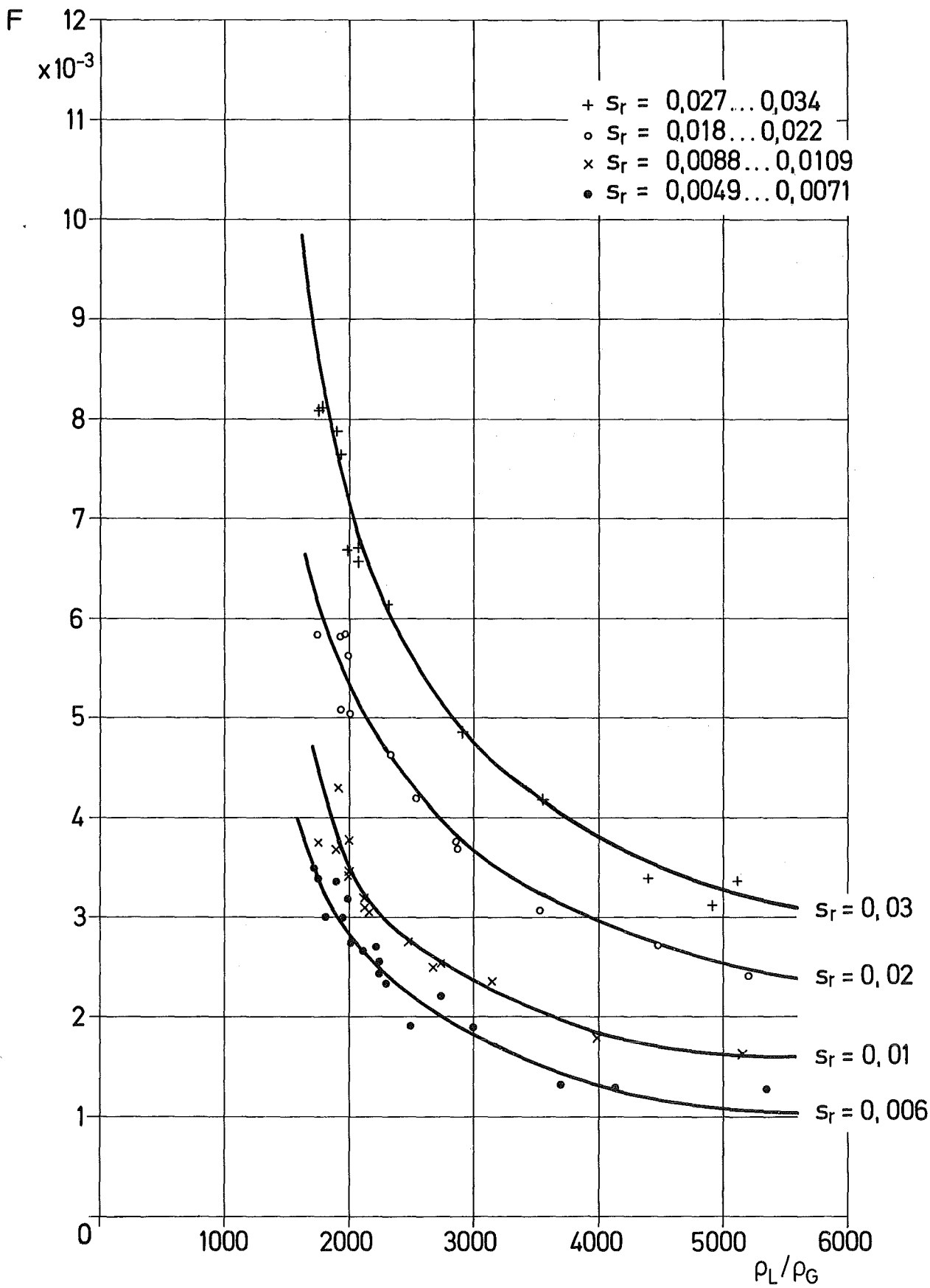
Geschwindigkeits-
verteilung

Dichteverteilung

GfK
IRE

Radiale Geschwindigkeits- und Dichtever-
teilung im Testrohr (Längsschnitt)

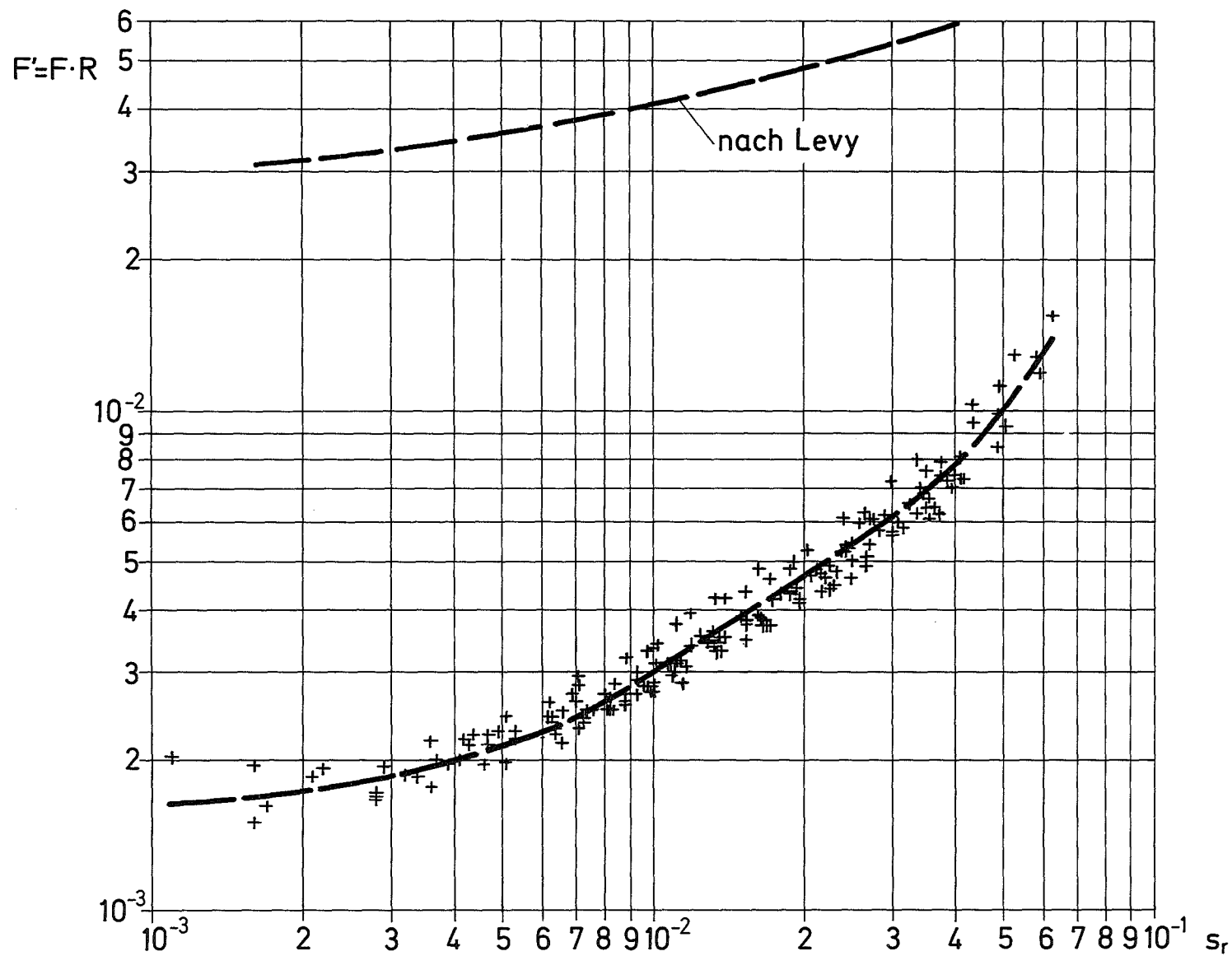
Abb. 14



GfK
IRE

F als Funktion des
Dichteverhältnisses

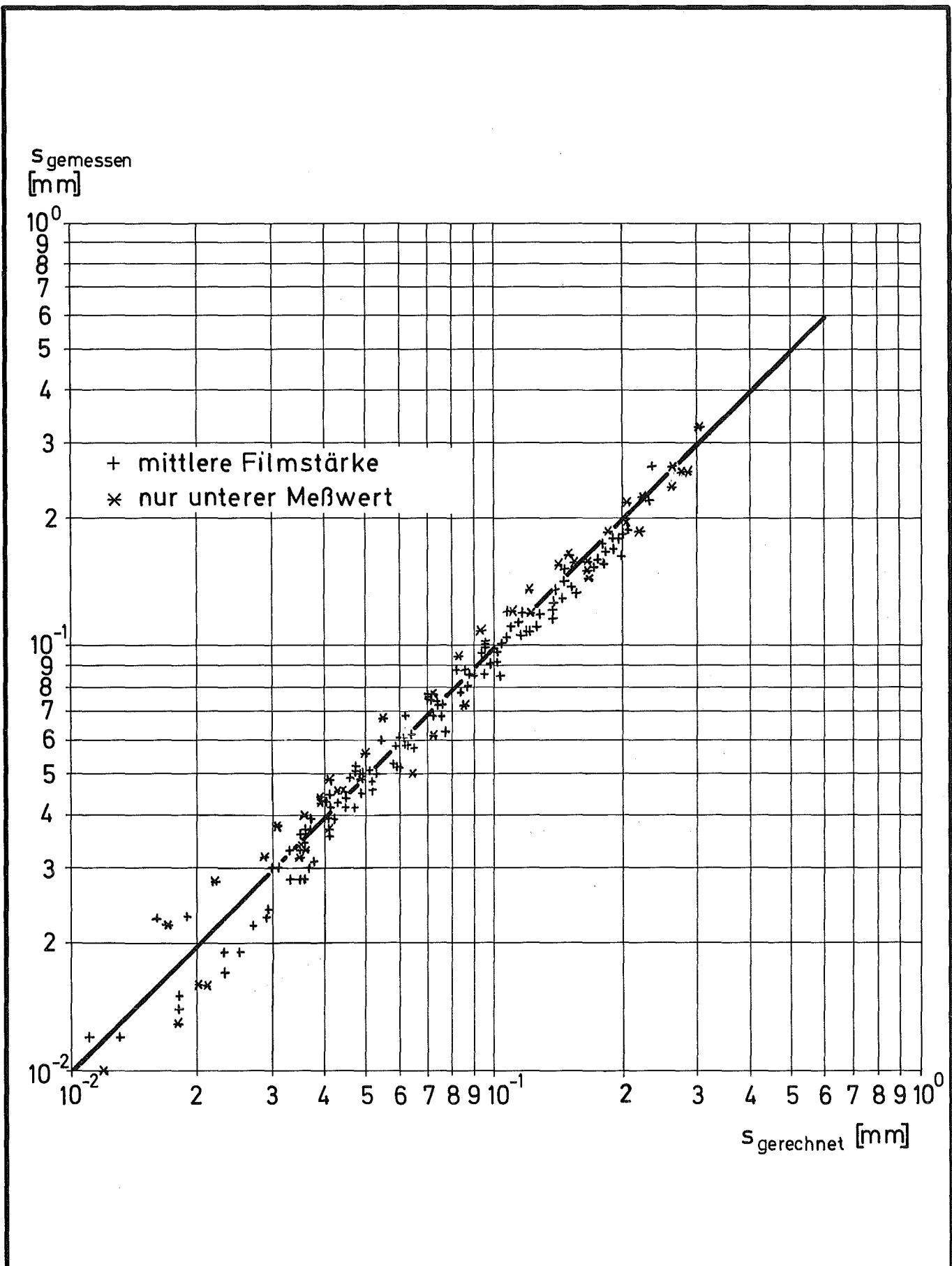
Abb.15



GfK
IRE

F' als Funktion der relativen Filmstärke s_r

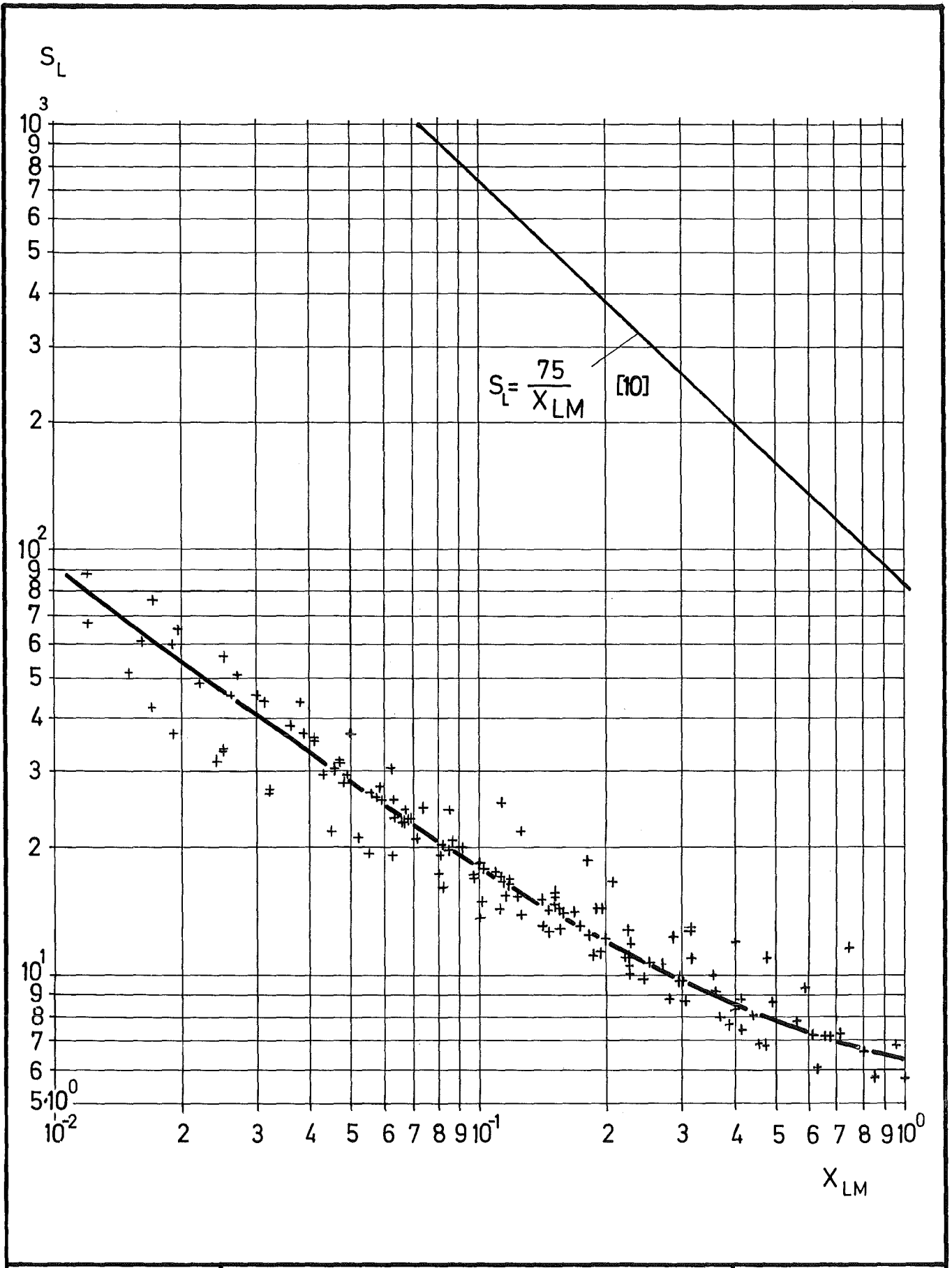
Abb. 16



Gf K
IRE

Vergleich der gemessenen und der nach Gl.(4.17) berechneten Filmstärken

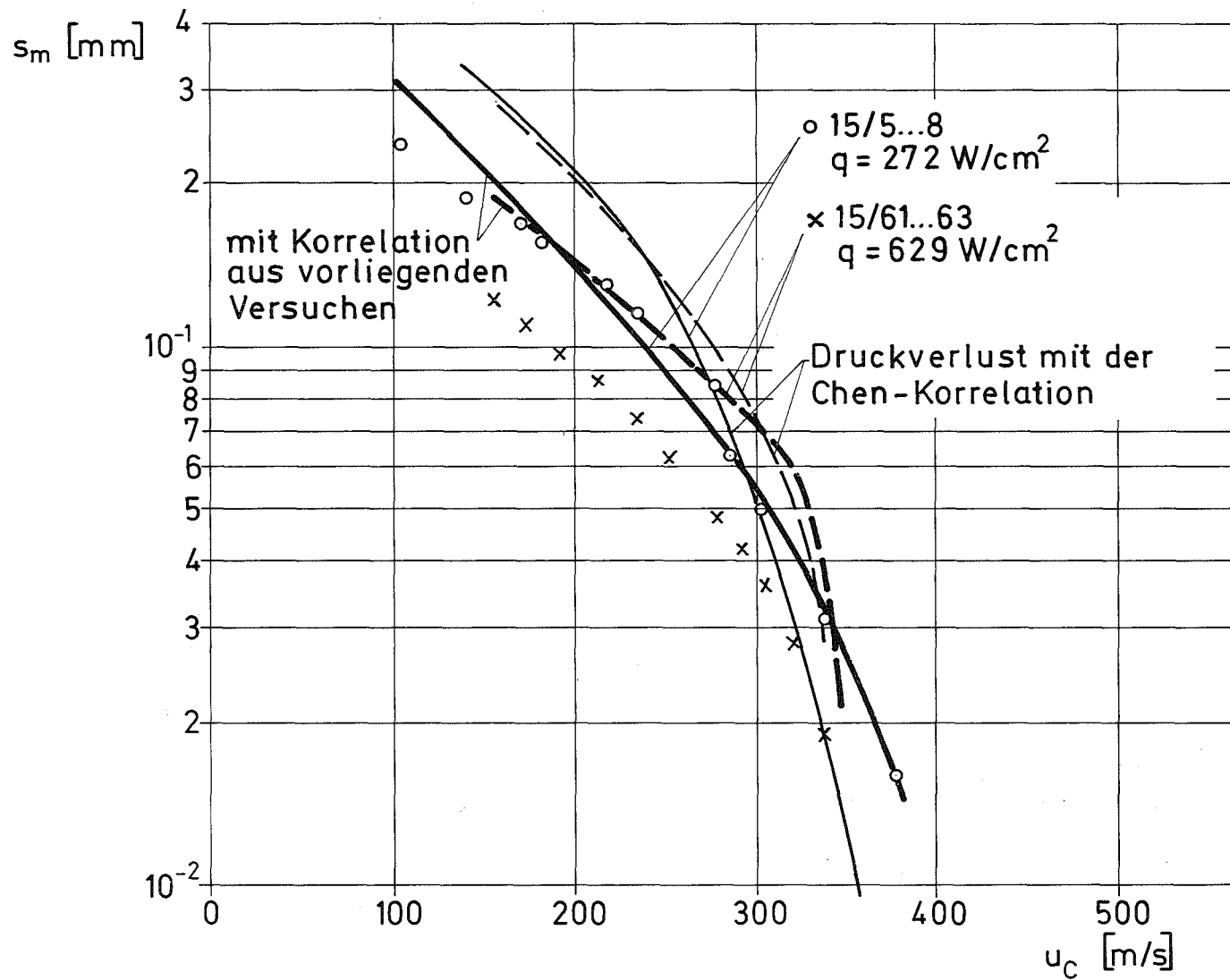
Abb.17



GfK
IRE

Schlupf in der Zweiphasenströmung $S_L = u_C / u_F$

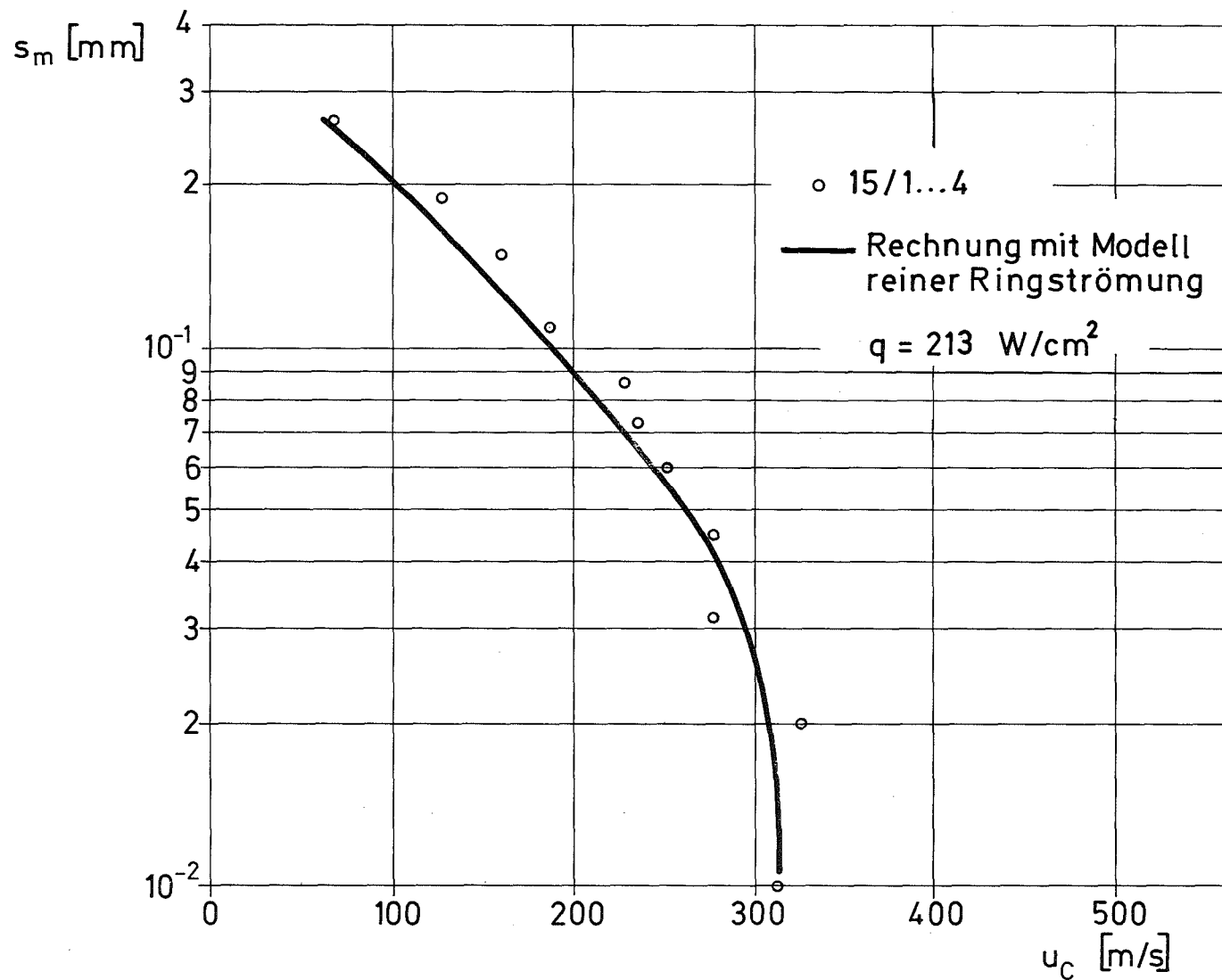
Abb. 18



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken unter Verwendung
von $\phi = f(X_{LM})$

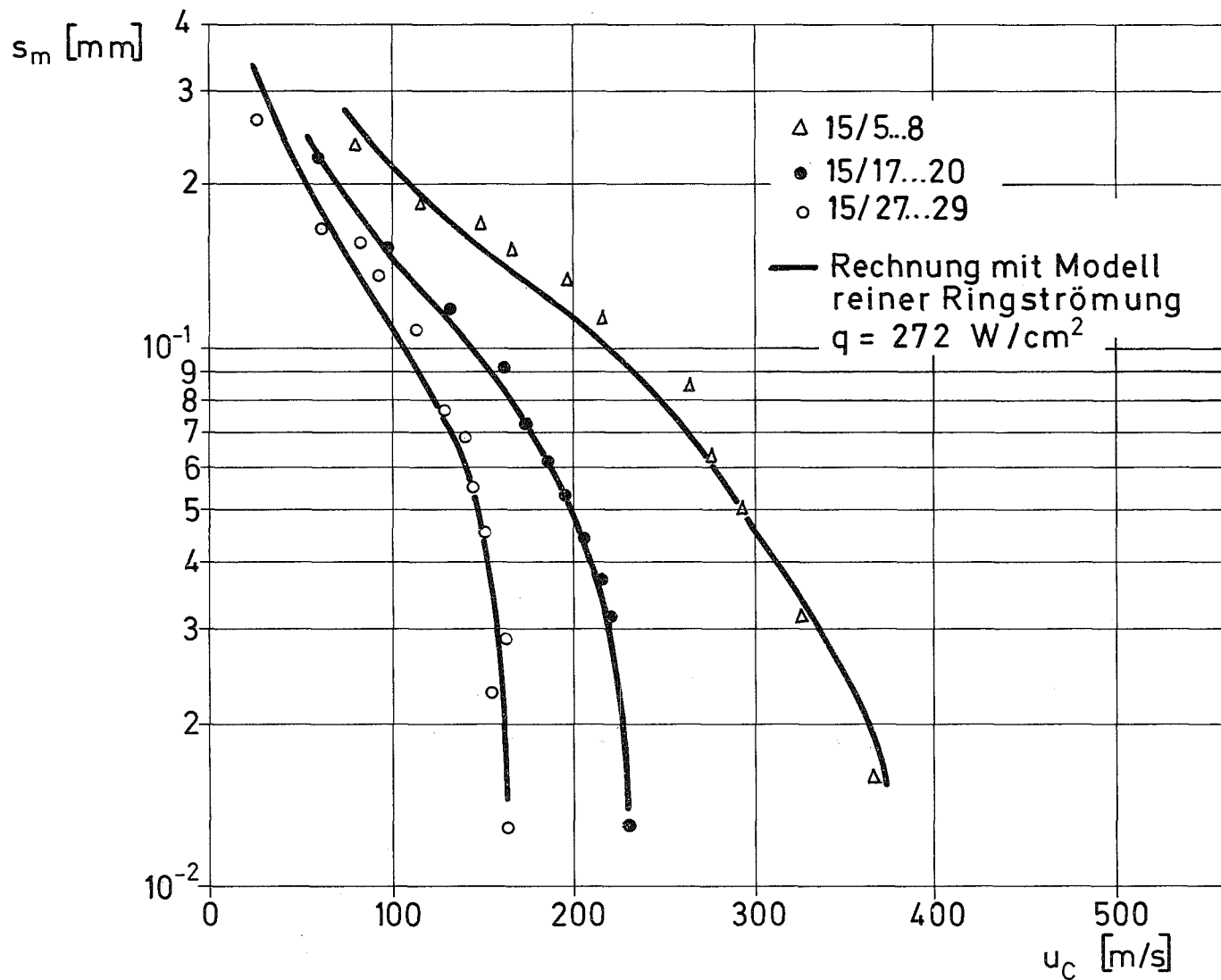
Abb. 19



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der
Dampfgeschwindigkeit

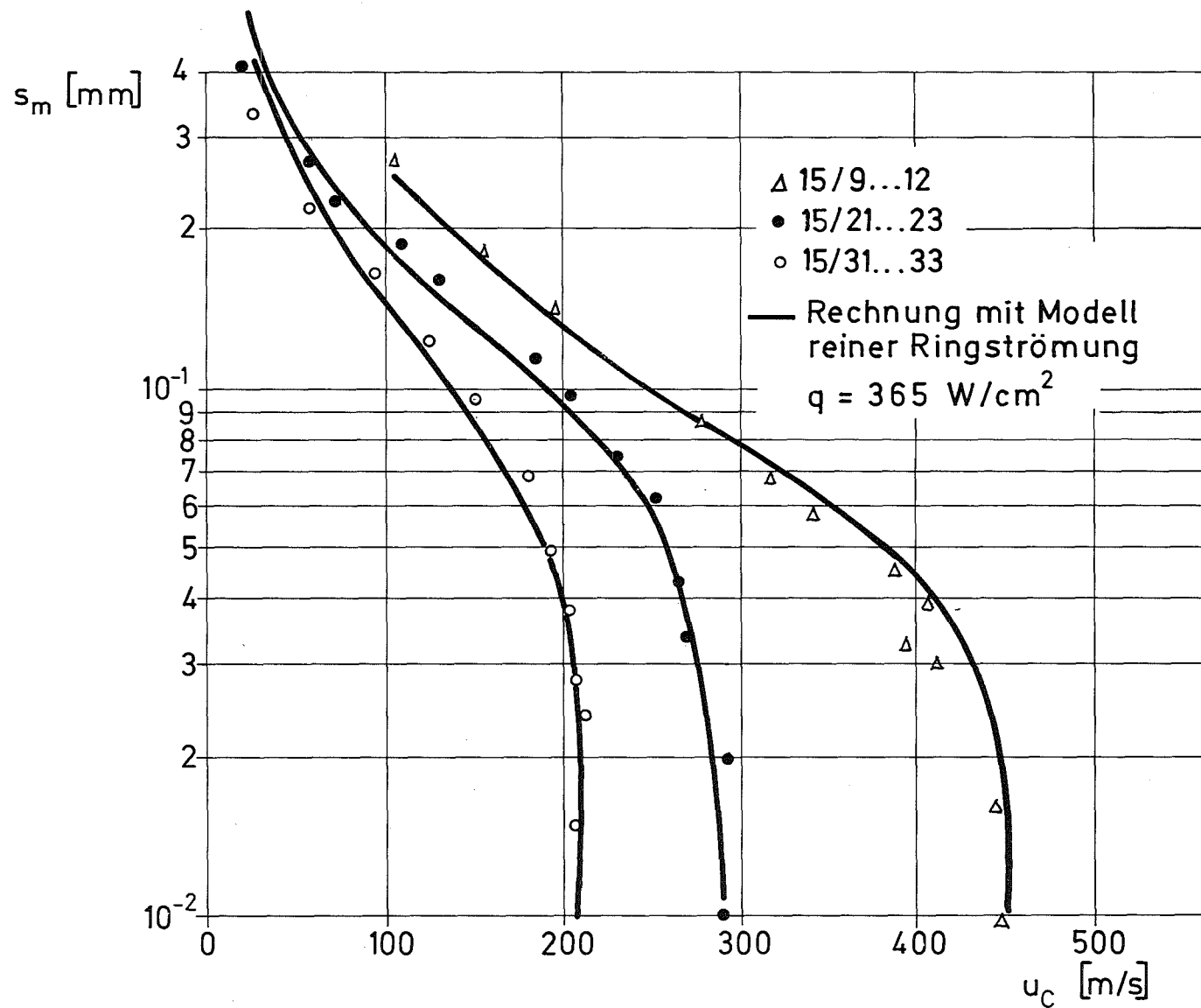
Abb. 20



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der
Dampfgeschwindigkeit

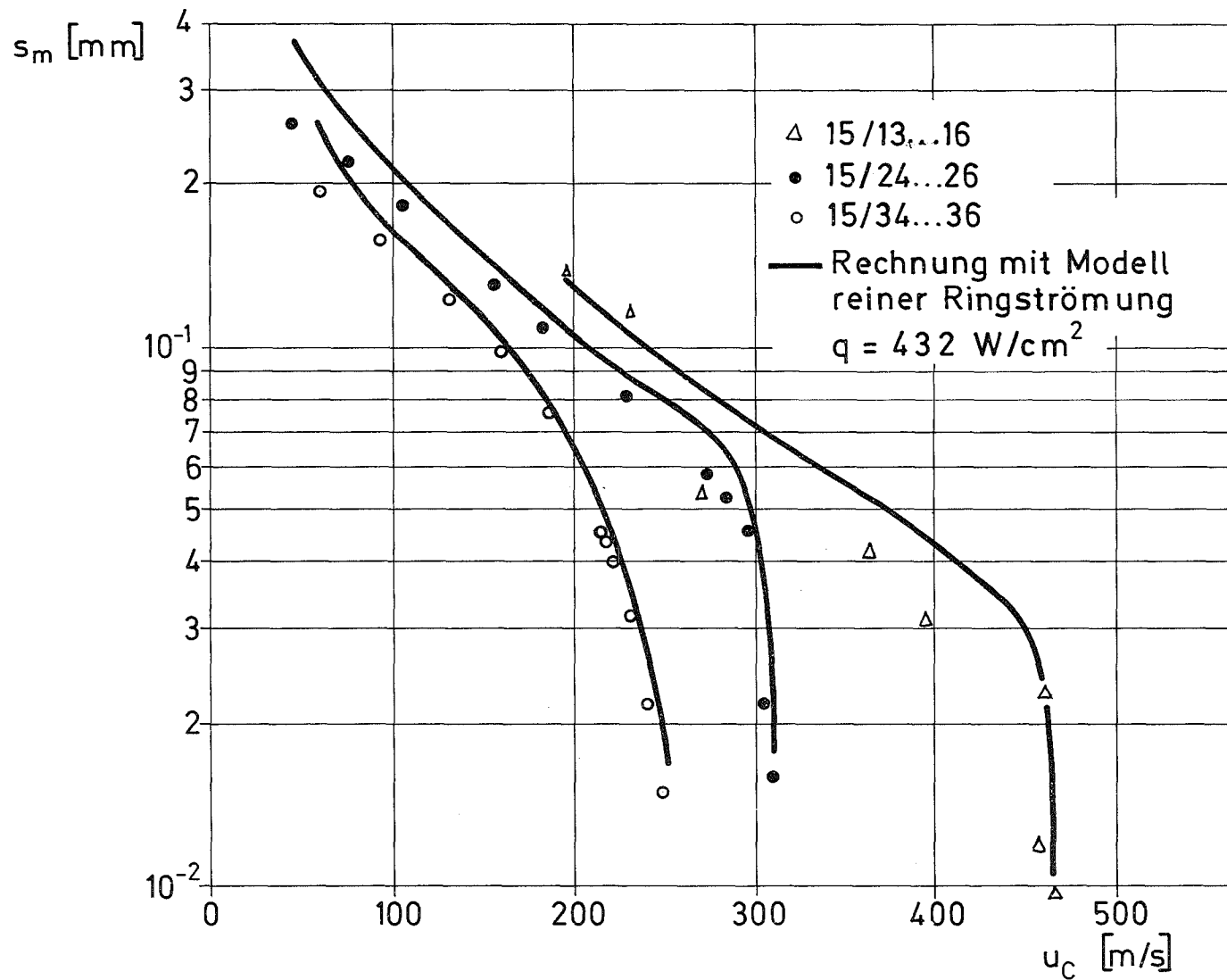
Abb. 21



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der
Dampfgeschwindigkeit

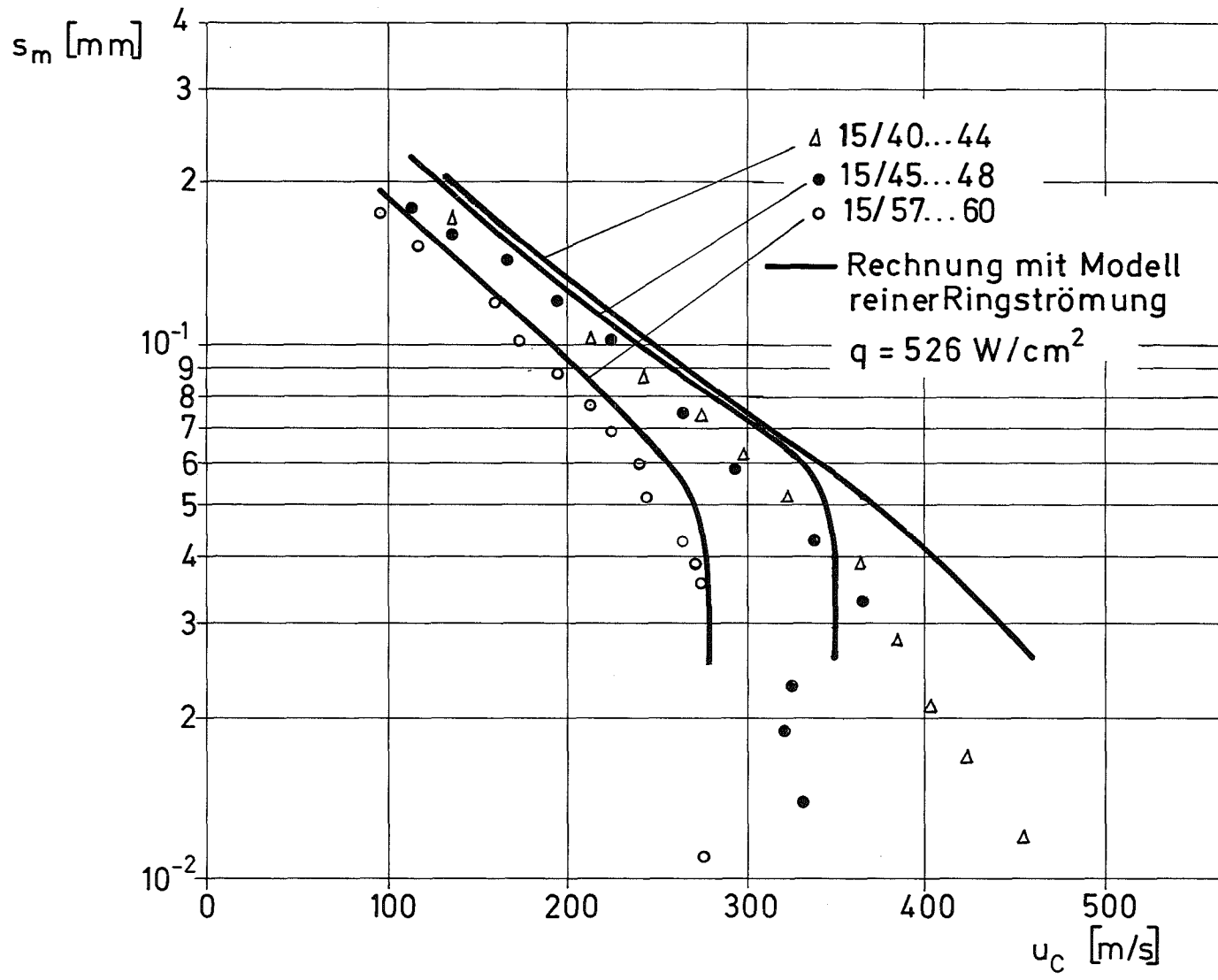
Abb. 22



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der
Dampfgeschwindigkeit

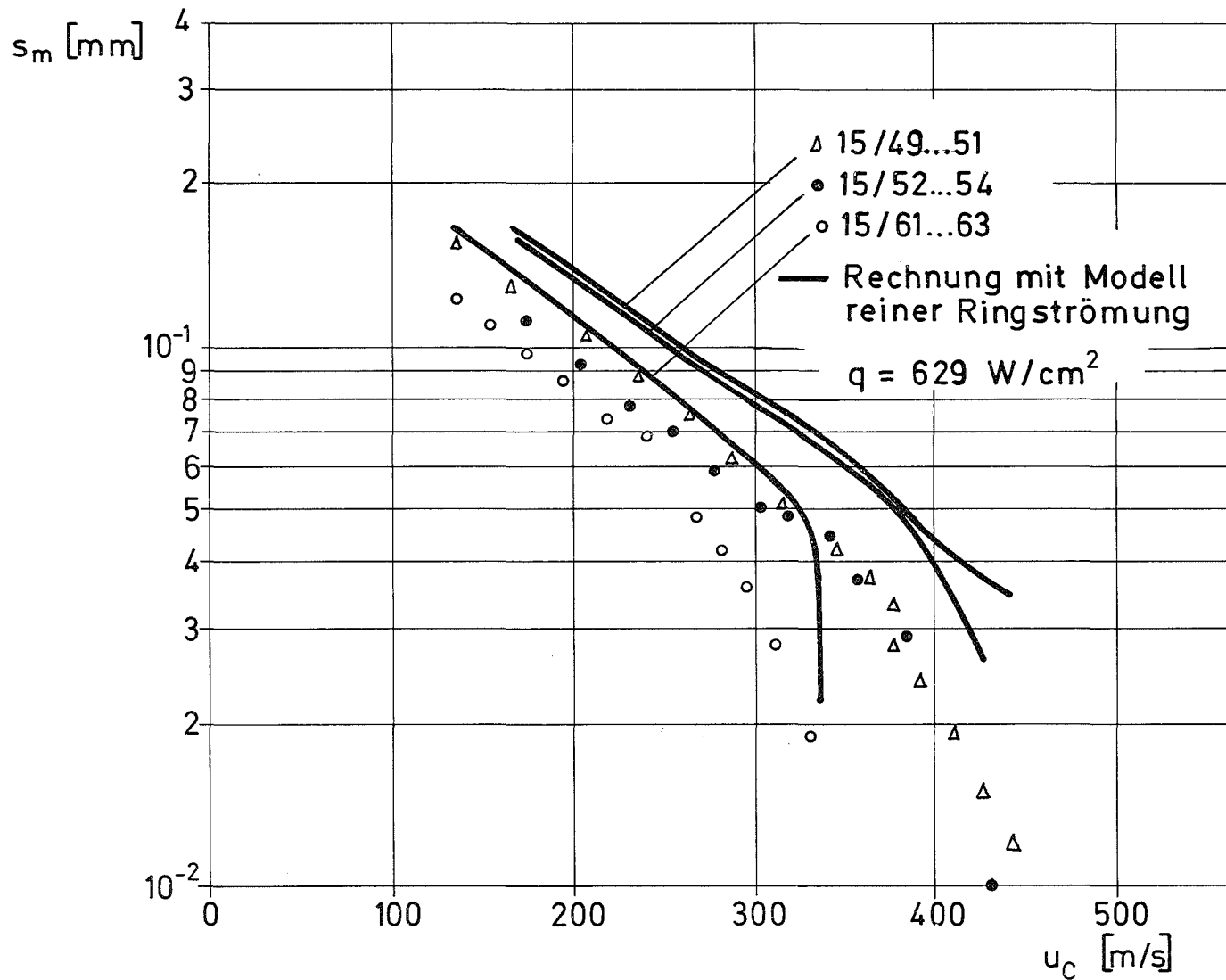
Abb. 23



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der
Dampfgeschwindigkeit

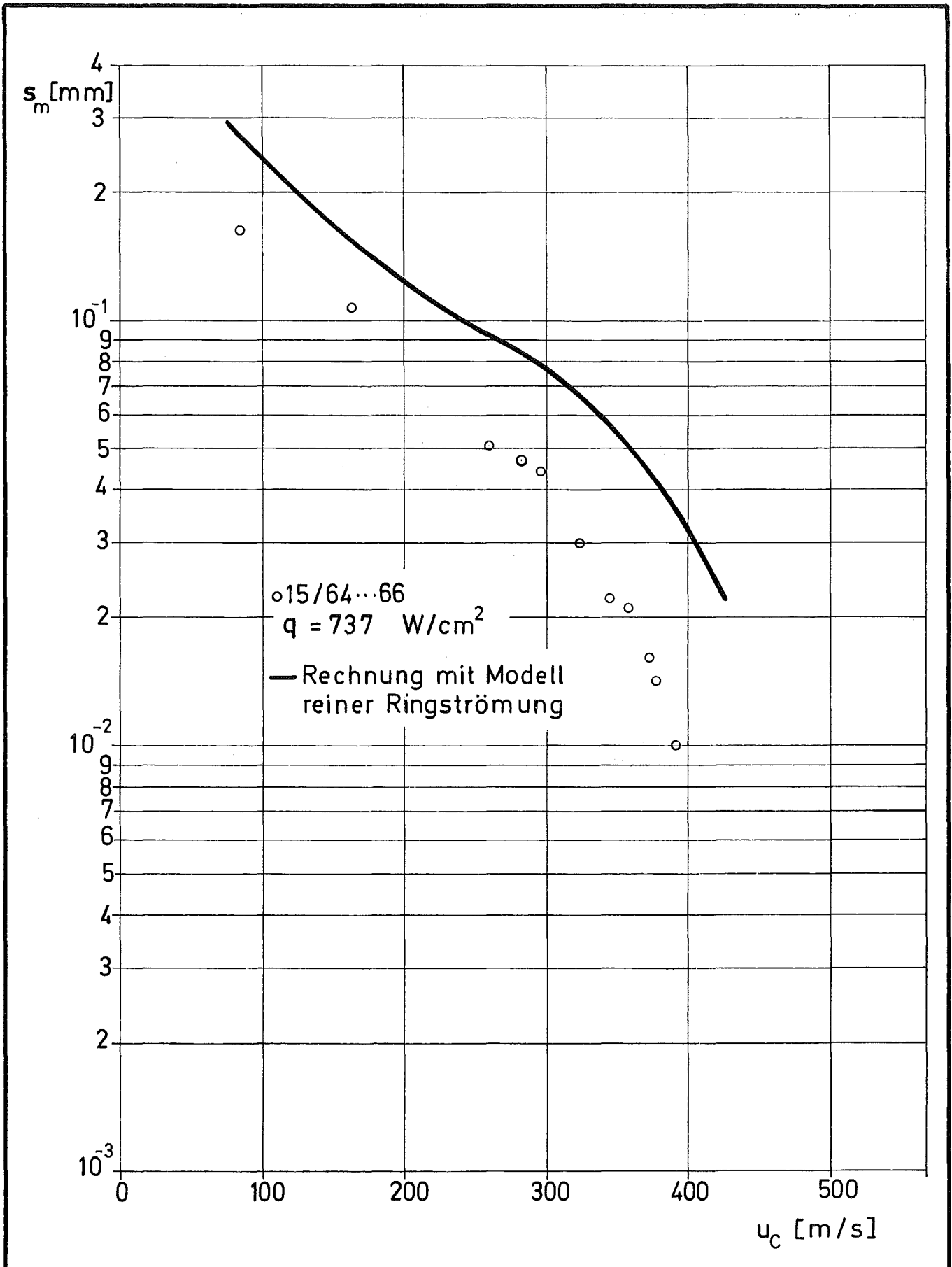
Abb. 24



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der
Dampfgeschwindigkeit

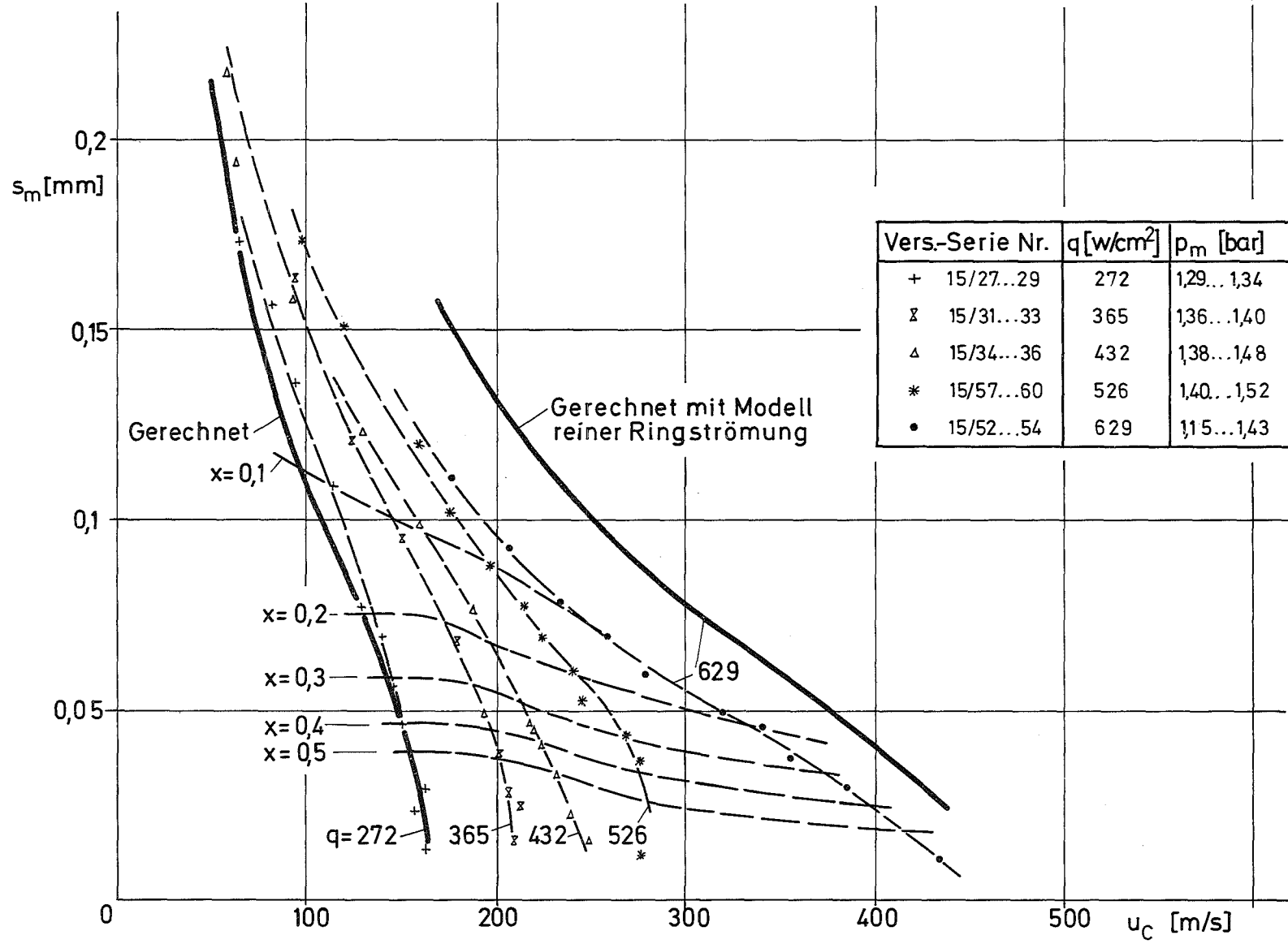
Abb. 25



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion der Dampfgeschwindigkeit

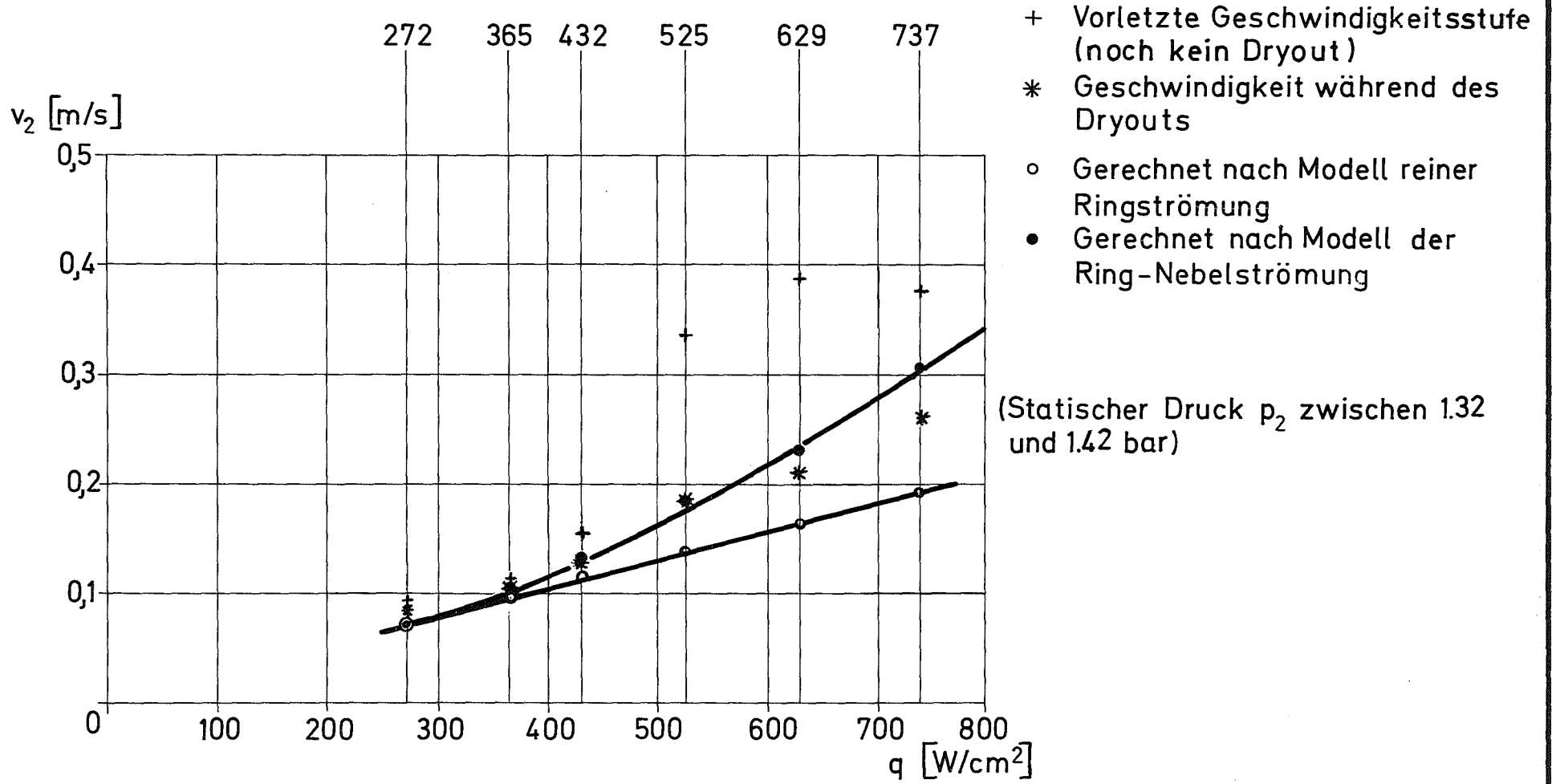
Abb. 26



GfK
IRE

Gemittelte Filmstärken als Funktion
der Dampfgeschwindigkeit (Zusammenstellung)

Abb. 27

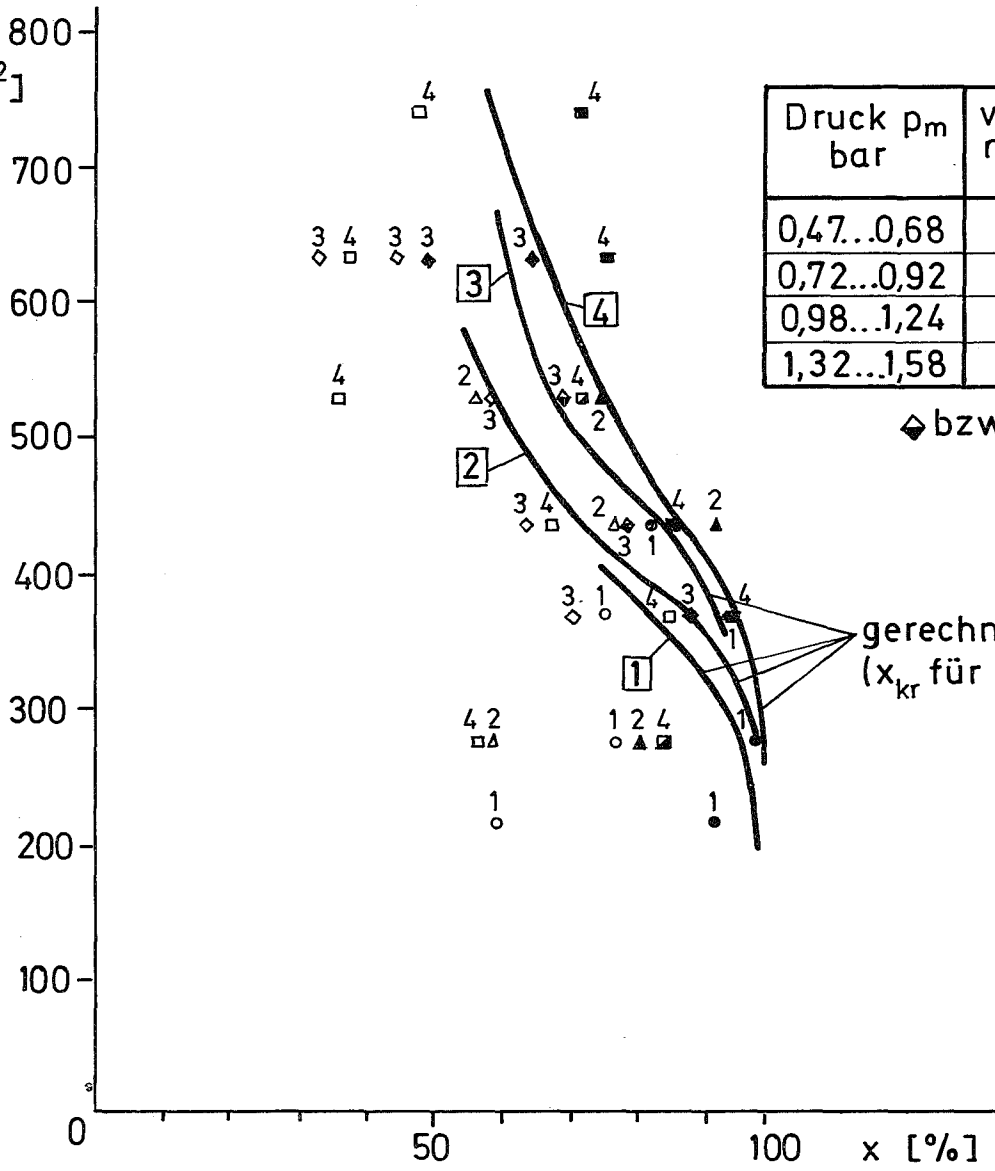


G f K
I R E

Eintrittsgeschwindigkeiten vor und während
des Dryouts

Abb. 28

q_{kr} [W/cm²]



Druck p_m bar	vorletzte Stufe, noch kein Dry- out	Dryout- Phase
0,47...0,68	○1	●1
0,72...0,92	△2	▲2
0,98...1,24	◇3	◆3
1,32...1,58	□4	■4

◇ bzw. ■: Dryout unsicher

gerechnet als Ring-Nebelströmung
(x_{kr} für $G_F \rightarrow 0$, vergl. Abb.34)

GfK
IRE

Kritischer Wärmefluß als Funktion des
Dampfgehaltes

Abb.29

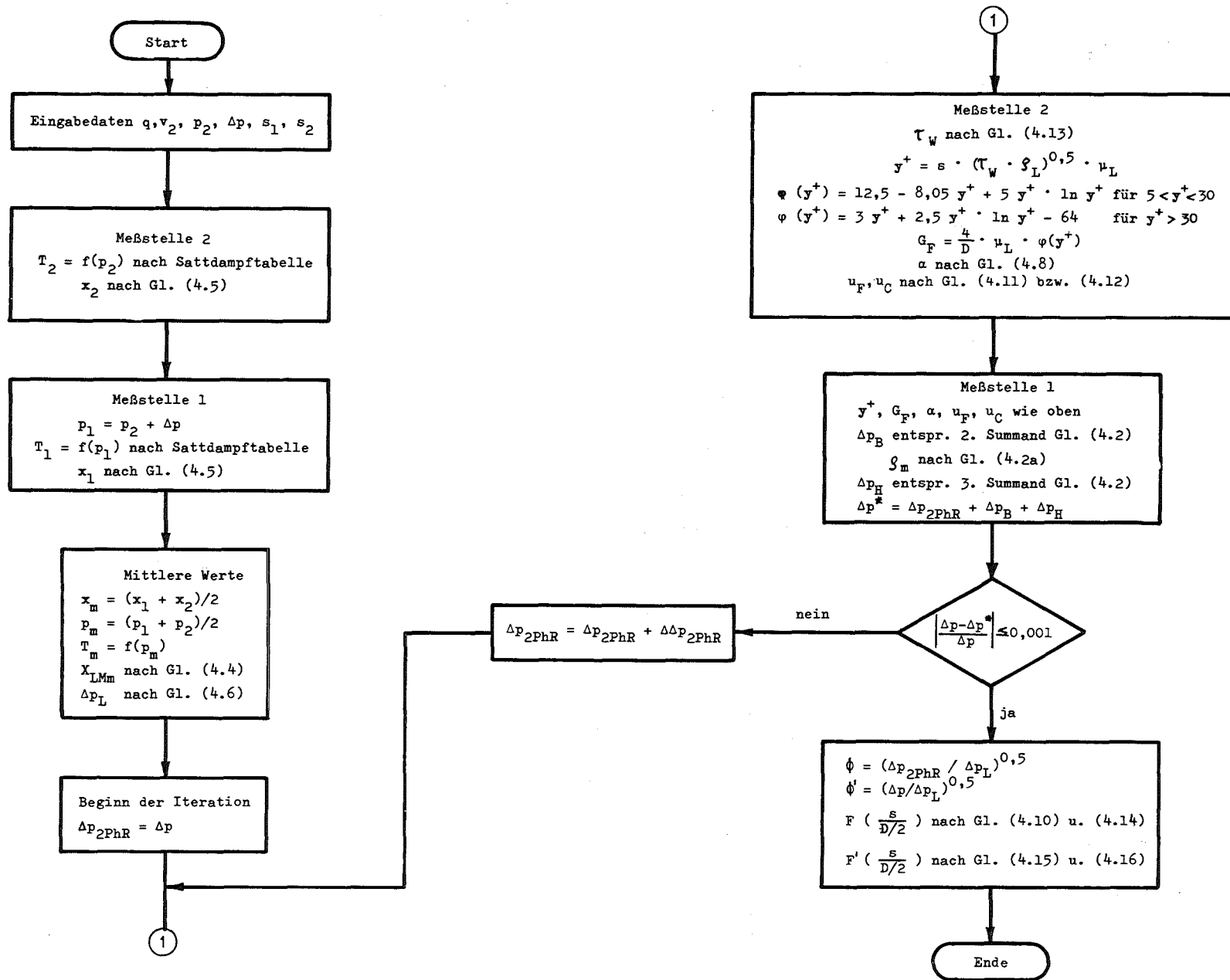


ABB. 30: FLUSSDIAGRAMM ZUR BERECHNUNG DES DRUCKVERLUST-MULTIPLIKATORS ϕ SOWIE DER FUNKTIONEN F UND F'

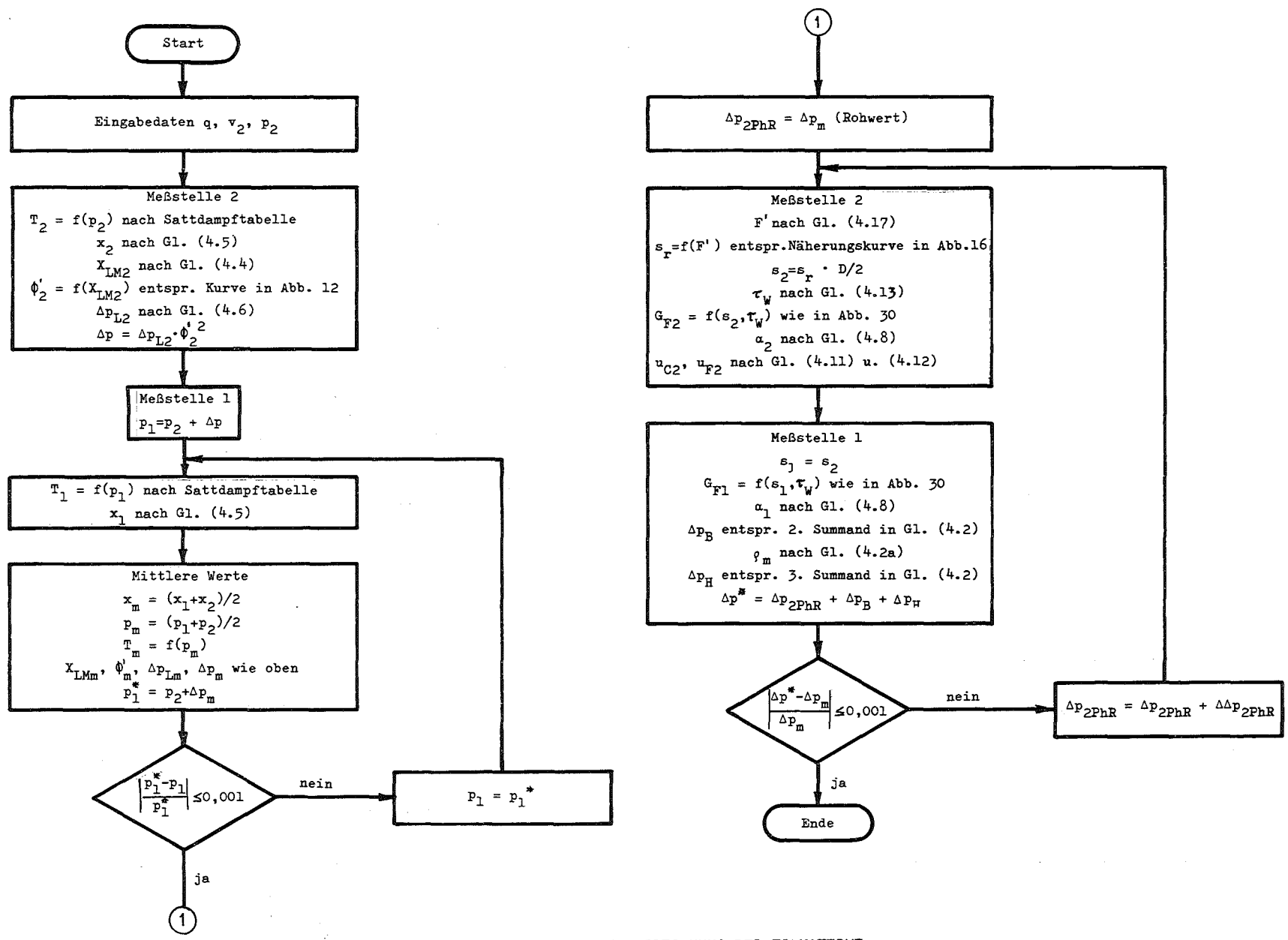


ABB. 31: FLUSSDIAGRAMM ZUR BERECHNUNG DER FILMSTÄRKE NACH DEM MODELL DER RING-NEBELSTROMUNG

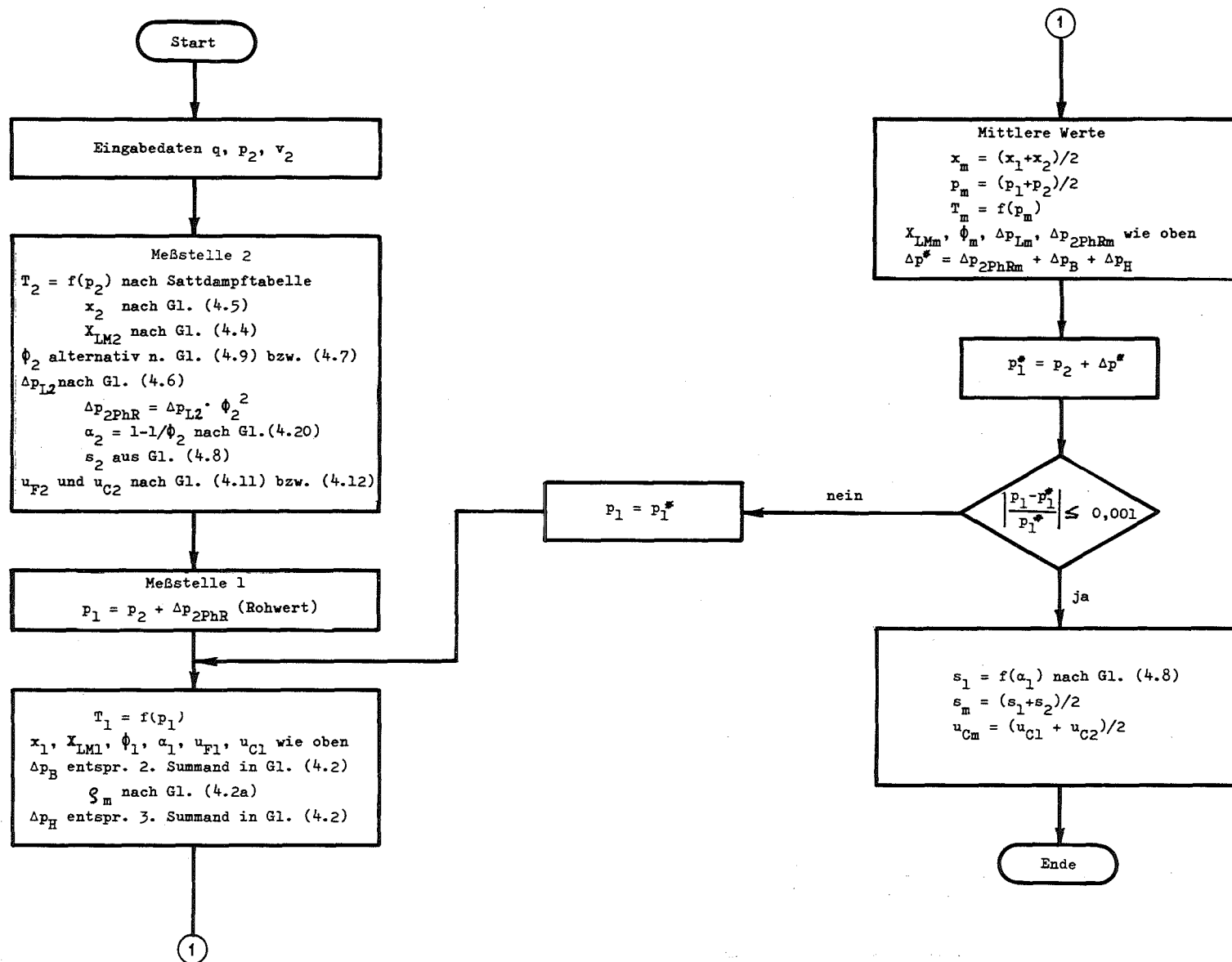


ABB. 32: FLUSSDIAGRAMM ZUR BERECHNUNG DER FILMSTARKE NACH DEM MODELL REINER RINGSTROMUNG (1.METHODE MIT $\alpha = 1 - 1/\phi$)

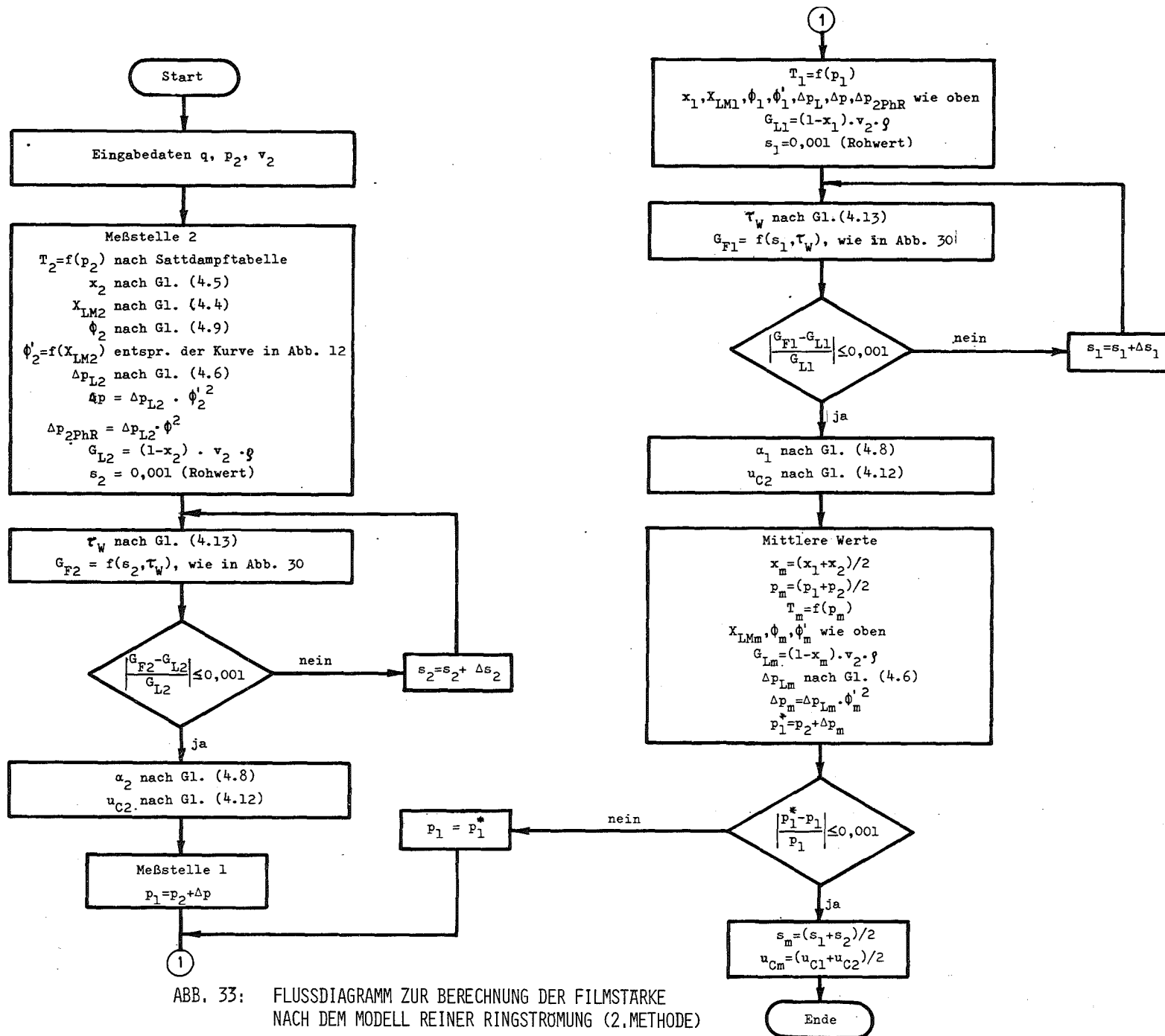


ABB. 33: FLUSSDIAGRAMM ZUR BERECHNUNG DER FILMSTÄRKE NACH DEM MODELL REINER RINGSTROMUNG (2. METHODE)

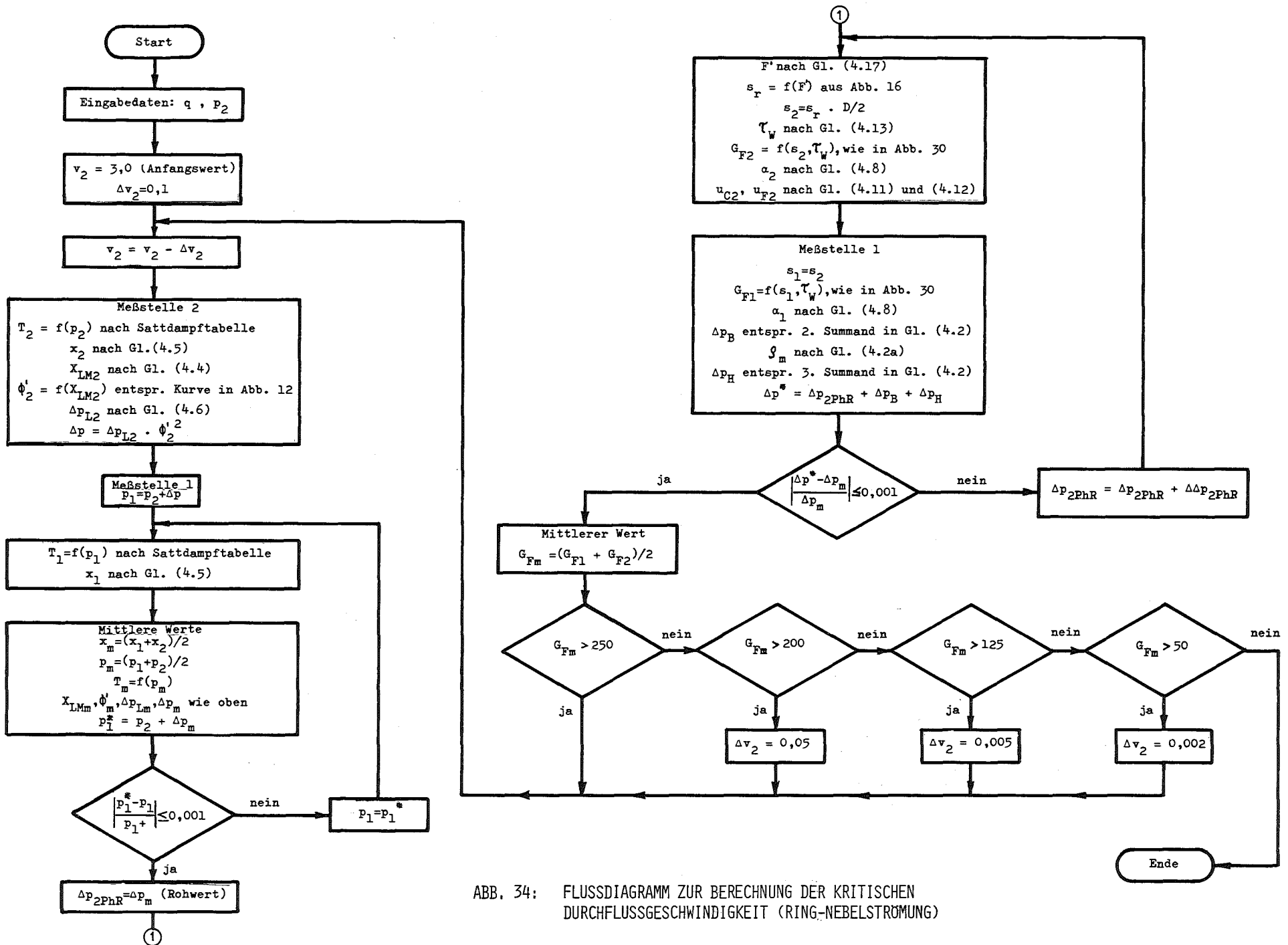


ABB. 34: FLUSSDIAGRAMM ZUR BERECHNUNG DER KRITISCHEN DURCHFLUSSGESCHWINDIGKEIT (RING-NEBELSTRÖMUNG)

Versuch Nr.	gemessen					gerechnet								
	v_2 [m/s]	p_2 [bar]	Δp [bar]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	p_m [bar]	x_m -	Δp_R [bar]	ϕ -	x_{LM} -	s_{RR} [mm]	$u_{C RR}$ [m/s]	s_{RN} [mm]	
5...8 $P_{SG} = 0,392 \text{ bar}$	1,820	0,51	0,050	0,474	(0,718)	0,535	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	1,630	0,53	0,075	0,385	(0,644)	0,568	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	1,206	0,57	0,160	0,236	(0,390)	0,650	1,3	-	-	-	0,259	78,7	0,265	
	1,046	0,55	0,217	0,187	0,206	0,658	2,2	0,1686	10,3	0,590	0,193	114,5	0,220	
	0,879	0,52	0,228	0,166	0,172	0,634	3,4	0,1855	12,7	0,397	0,153	147,1	0,192	
	0,769	0,55	0,238	0,149	0,158	0,669	4,4	0,1903	14,6	0,314	0,133	160,5	0,172	
	0,724	0,48	0,265	0,131	0,135	0,682	4,8	0,2193	16,5	0,287	0,119	197,6	0,156	
	0,639	0,48	0,278	0,114	0,117	0,619	6,5	0,2141	18,5	0,207	0,105	216,5	0,138	
	0,468	0,47	0,282	0,082	0,087	0,611	10,8	0,2043	24,8	0,125	0,079	263,4	0,103	
	0,313	0,53	0,251	0,061	0,064	0,655	18,5	0,1888	36,5	0,074	0,060	275,6	0,077	
	0,234	0,54	0,223	0,050	0,059	0,651	26,5	0,1679	48,6	0,049	0,048	291,4	0,064	
	0,145	0,53	0,153	0,032	(xxx)	0,606	46,1	0,1080	77,6	0,022	0,033	324,2	0,044	
	0,090	0,51	0,105	0,016	(xxx)	0,562	77,5	0,0686	203,2	0,006	0,020	363,5	0,021	
	0,072	0,49	0,090	0,007	(xxx)	0,535	98,2	0,0555	722,8	0,000	0,004	339,6	-	
	17...20 $P_{SG} = 0,784 \text{ bar}$	1,19	0,87	0,033	0,364	0,450	0,887	≈ 0	-	-	-	-	-	-
0,91		0,90	0,108	0,221	(0,278)	0,954	1,8	-	-	-	0,230	55,7	0,236	
0,68		0,90	0,184	0,151	(0,188)	0,992	4,5	-	-	-	0,144	98,4	0,168	
0,54		0,87	0,206	0,116	0,122	0,973	7,4	0,1832	20,0	0,227	0,110	130,6	0,128	
0,41		0,86	0,220	0,088	0,094	0,970	11,9	0,1931	27,2	0,142	0,085	158,5	0,098	
0,35		0,85	0,225	0,073	(0,091)	0,962	15,0	-	-	-	0,074	172,9	0,085	
0,28		0,87	0,195	0,062	(0,139)	0,968	20,4	-	-	-	0,062	184,3	0,071	
0,22		0,88	0,185	0,053	(0,085)	0,972	27,7	-	-	-	0,052	195,1	0,060	
0,17		0,88	0,131	0,049	(0,139)	0,964	38,0	-	-	-	0,042	206,6	0,049	
0,14		0,88	0,104	0,037	(0,129)	0,932	47,6	-	-	-	0,036	213,8	0,041	
0,118		0,88	0,080	0,032	(0,124)	0,920	57,4	-	-	-	0,030	218,7	0,035	
0,086		0,87	0,060	0,013	(0,120)	0,900	81,4	-	-	-	0,019	230,2	0,022	
27...29 $P_{SG} = 1,176 \text{ bar}$		1,23	1,27	0,000	0,682	1,11	1,270	≈ 0	-	-	-	-	-	-
		1,08	1,27	0,026	0,391	0,434	1,283	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	0,93	1,29	0,052	0,262	(0,333)	1,316	1,2	-	-	-	0,316	27,0	0,266	
	0,70	1,27	0,077	0,167	0,180	1,308	3,7	0,0741	9,8	0,503	0,173	62,4	0,181	
	0,59	1,26	0,135	0,157	0,158	1,327	5,7	0,1297	15,4	0,0337	0,137	81,3	0,143	
	0,51	1,27	0,144	0,136	(0,147)	1,342	7,7	-	-	-	0,117	93,5	0,121	
	0,40	1,25	0,175	0,109	(0,131)	1,337	11,9	-	-	-	0,092	113,2	0,094	
	0,30	1,26	0,180	0,077	(0,110)	1,350	18,1	-	-	-	0,073	127,8	0,072	
	0,25	1,23	0,180	0,069	(0,093)	1,320	23,2	-	-	-	0,063	139,4	0,062	
	0,19	1,27	0,138	0,056	(0,082)	1,339	32,7	-	-	-	0,051	145,1	0,050	
	0,16	1,27	0,093	0,046	(0,098)	1,316	40,1	-	-	-	0,044	150,0	0,043	
	0,118	1,29	0,070	0,023	(0,148)	1,325	57,1	-	-	-	0,033	155,9	0,033	
	0,083	1,29	0,054	0,013	(0,140)	1,317	84,6	-	-	-	0,019	162,3	0,019	

Anm.: Zahlen in (): Störung durch re-entry

(xxx): Meßeinrichtung ausgefallen.

Tabelle 1: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte. Heizflächenleistung $q = 272 \text{ W/cm}^2$

Versuch Nr.	gemessen					gerechnet							
	v_2 [m/s]	P_2 [bar]	Δp [bar]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	P_m [bar]	x_m -	Δp_R [bar]	ϕ -	X_{LM} -	s_{RR} [mm]	$u_{C RR}$ [m/s]	s_{RN} [mm]
9 ... 12 $P_{SG} = 0,392 \text{ bar}$	2,63	0,45	0,015	0,706	0,995	0,458	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	1,94	0,56	0,090	0,409	0,477	0,605	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	1,46	0,62	0,180	0,248	0,283	0,710	1,8	0,1200	6,5	0,747	0,248	105,8	0,239
	1,20	0,60	0,293	0,174	0,181	0,746	3,0	0,2270	10,7	0,475	0,175	153,7	0,193
	0,98	0,60	0,348	0,137	0,138	0,774	4,8	0,2712	14,1	0,312	0,134	196,4	0,153
	0,80	0,60	0,380	(xxx)	(xxx)	0,790	7,0	-	-	-	0,108	233,9	0,121
	0,63	0,58	0,395	0,086	0,085	0,777	10,5	0,2842	22,5	0,144	0,086	277,9	0,095
	0,50	0,56	0,382	0,069	0,069	0,751	14,8	0,2568	27,3	0,100	0,070	317,2	0,075
	0,43	0,55	0,367	0,058	0,058	0,733	18,1	0,2369	31,0	0,080	0,062	339,8	0,065
	0,32	0,52	0,338	0,045	0,046	0,689	26,7	0,1926	39,9	0,050	0,048	386,5	0,049
	0,27	0,51	0,310	0,039	0,040	0,665	32,4	0,1665	46,2	0,038	0,042	405,1	0,042
	0,21	0,56	0,275	0,032	0,035	0,697	42,9	0,1578	64,8	0,026	0,035	394,2	0,036
	0,18	0,55	0,222	0,028	0,031	0,661	51,0	0,1172	73,0	0,019	0,030	411,0	0,030
	0,124	0,56	0,165	0,014	0,018	0,642	76,3	0,0822	159,8	0,007	0,022	445,9	-
	0,101	0,53	0,160	0,005	0,010	0,610	94,7	0,0710	404,5	0,001	0,008	446,4	0,012
	21 ... 23 $P_{SG} = 0,784 \text{ bar}$	1,52	0,87	0,055	0,373	0,432	0,897	0,4	0,0368	3,4	3,156	0,526	23,4
1,30		0,93	0,110	0,264	(0,315)	0,985	1,2	-	-	-	0,299	50,0	0,266
1,19		0,90	0,155	0,226	(0,248)	0,977	2,0	-	-	-	0,230	74,5	0,226
1,03		0,88	0,200	0,187	(0,205)	0,980	3,3	-	-	-	0,174	107,3	0,187
0,89		0,90	0,225	0,159	(0,176)	1,012	4,7	-	-	-	0,143	129,6	0,156
0,68		0,83	0,265	0,111	0,112	0,962	8,5	0,2232	18,2	0,195	0,103	186,7	0,110
0,58		0,83	0,285	0,096	0,098	0,972	11,1	0,2347	22,0	0,152	0,089	205,2	0,094
0,43		0,85	0,285	0,074	0,076	0,992	17,2	0,2319	30,3	0,097	0,069	231,4	0,071
0,35		0,84	0,267	0,061	0,061	0,973	22,5	0,2156	37,0	0,071	0,059	251,2	0,060
0,21		0,91	0,215	0,043	(0,102)	1,017	41,8	-	-	-	0,039	264,5	0,039
0,18		0,92	0,18	0,034	(0,093)	1,010	49,7	-	-	-	0,034	269,1	0,035
0,13		0,92	0,155	0,020	(0,087)	0,997	71,5	-	-	-	0,030	291,3	-
0,106		0,92	0,115	0,010	(0,085)	0,978	89,1	-	-	-	0,014	289,5	0,013
31 ... 33 $P_{SG} = 1,176 \text{ bar}$		1,67	1,27	0,016	-	-	1,278	≈ 0	-	-	-	-	-
	1,43	1,26	0,021	0,492	(0,583)	1,271	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	1,29	1,29	0,046	0,329	(0,391)	1,313	0,8	-	-	-	0,417	23,0	0,307
	1,05	1,32	0,125	0,219	(0,274)	1,382	2,4	-	-	-	0,223	57,4	0,207
	0,84	1,29	0,198	0,164	(0,201)	1,389	4,8	-	-	-	0,152	93,3	0,151
	0,66	1,28	0,257	0,121	(0,169)	1,408	8,2	-	-	-	0,115	123,3	0,111
	0,50	1,27	0,289	0,095	(0,162)	1,414	13,1	-	-	-	0,088	149,8	0,083
	0,32	1,29	0,275	0,068	(0,139)	1,427	24,6	-	-	-	0,061	177,9	0,054
	0,23	1,29	0,215	0,049	(0,109)	1,397	37,3	-	-	-	0,046	193,2	0,041
	0,17	1,38	0,196	0,038	(0,122)	1,408	53,1	-	-	-	0,035	201,3	0,031
	0,14	1,32	0,175	0,028	(0,124)	1,407	65,9	-	-	-	0,028	205,9	0,022
	0,11	1,32	0,140	0,024	(0,124)	1,390	86,0	-	-	-	0,018	212,3	-
	0,10	1,33	0,135	0,015	(0,124)	1,398	95,2	-	-	-	0,009	209,2	0,018

Anm.: Zahlen in (): Störung durch re-entry

(xxx): Meßeinrichtung ausgefallen

Tabelle 2: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte. Heizflachenleistung $q = 365 \text{ W/cm}^2$

Versuch Nr.	gemessen					gerechnet								
	v_2 [m/s]	P_2 [bar]	Δp [bar]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	P_m [bar]	x_m -	Δp_R [bar]	ϕ -	X_{LM} -	s_{RR} [mm]	$u_{C RR}$ [m/s]	s_{RN} [mm]	
13 ... 16 $P_{SG} = 0,392 \text{ bar}$	3,14	0,47	0,035	0,595	0,808	0,488	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	2,51	0,57	0,098	0,463	0,543	0,619	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	2,08	0,63	0,175	0,306	0,345	0,718	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	1,08	0,73	0,434	0,135	0,135	0,947	5,1	0,3463	14,7	0,319	0,134	196,5	0,141	
	0,89	0,73	0,464	0,114	0,111	0,962	7,5	0,3662	18,3	0,225	0,109	230,6	0,113	
	0,70	0,72	0,487	0,085	0,084	0,963	11,1	0,3649	23,4	0,151	0,087	270,1	0,086	
	0,50	0,68	0,470	(xxx)	(xxx)	0,915	18,3	-	-	-	0,065	328,1	0,059	
	0,39	0,66	0,435	0,042	0,042	0,877	25,2	0,2776	39,5	0,059	0,053	362,5	0,047	
	0,31	0,63	0,393	0,031	0,032	0,826	33,2	0,2280	48,4	0,04	0,043	395,1	0,038	
	0,207	0,57	0,318	0,018	0,023	0,729	52,7	0,1405	73,1	0,019	0,029	461,2	0,019	
	0,19	0,59	0,305	0,022	0,024	0,742	57,4	0,1439	87,2	0,016	0,027	454,2	0,016	
	0,144	0,65	0,210	0,011	0,014	0,755	77,3	0,1035	163,4	0,007	0,023	459,8	-	
	0,136	0,54	0,270	0,005	0,010	0,675	82,9	0,0947	211,8	0,005	0,017	532,6	-	
	0,122	0,62	0,195	0,005	0,009	0,717	92,4	0,0852	335,4	0,002	0,010	465,2	-	
	24 ... 26 $P_{SG} = 0,784 \text{ bar}$	1,85	0,97	0,11	0,321	0,367	1,025	-	-	-	-	-	-	-
1,65		1,00	0,17	0,256	(0,304)	1,085	0,8	-	-	-	0,371	43,7	0,286	
1,50		0,96	0,23	0,205	0,234	1,075	1,6	0,1768	7,6	0,996	0,260	74,8	0,232	
1,37		0,92	0,28	0,176	0,193	1,060	2,5	0,2252	9,4	0,674	0,208	103,0	0,202	
1,07		0,90	0,385	0,127	0,134	1,092	4,9	0,3170	14,2	0,360	0,143	157,2	0,146	
0,92		0,90	0,410	0,107	0,112	1,105	6,7	0,3359	16,9	0,268	0,120	182,4	0,122	
0,68		0,88	0,428	0,079	0,083	1,094	11,4	0,3378	23,1	0,157	0,089	229,7	0,087	
0,52		0,84	0,411	0,058	0,061	1,045	17,1	0,3095	29,7	0,100	0,070	272,6	0,063	
0,46		0,84	0,392	0,052	0,055	1,036	20,1	0,2914	33,1	0,083	0,063	284,7	0,058	
0,40		0,84	0,365	0,044	0,048	1,022	24,1	0,2658	37,4	0,067	0,057	296,5	0,052	
0,19		0,98	0,276	0,022	(0,065)	1,118	57,3	-	-	-	0,030	304,4	0,027	
0,17		0,99	0,235	0,016	(0,057)	1,107	64,7	-	-	-	0,027	307,5	0,020	
0,141		1,00	0,210	0,006	(0,055)	1,105	79,4	-	-	-	0,024	320,1	-	
34 ... 36 $P_{SG} = 1,176 \text{ bar}$		1,92	1,27	0,000	-	-	1,270	≈ 0	-	-	-	-	-	-
		1,67	1,28	0,052	0,373	0,436	1,306	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	1,24	1,36	0,206	0,195	(0,250)	1,463	2,2	-	-	-	0,234	61,6	0,207	
	1,06	1,34	0,270	0,158	(0,183)	1,475	3,9	-	-	-	0,173	91,6	0,166	
	0,85	1,29	0,350	0,123	(0,135)	1,465	6,6	-	-	-	0,128	129,0	0,120	
	0,70	1,24	0,323	0,098	0,100	1,401	9,9	0,2864	20,4	0,202	0,103	158,8	0,095	
	0,53	1,24	0,295	0,075	0,077	1,387	15,5	0,2566	26,1	0,127	0,080	186,8	0,070	
	0,32	1,28	0,345	0,046	(0,116)	1,452	30,4	-	-	-	0,053	217,2	0,044	
	0,28	1,31	0,340	0,044	(0,112)	1,480	35,7	-	-	-	0,047	219,4	0,039	
	0,25	1,32	0,328	0,040	(0,105)	1,484	40,8	-	-	-	0,043	223,3	0,036	
	0,20	1,33	0,298	0,032	(0,110)	1,479	53,1	-	-	-	0,035	231,2	0,029	
	0,156	1,34	0,262	0,022	(0,108)	1,471	68,4	-	-	-	0,027	238,6	0,017	
	0,13	1,33	0,228	0,015	(0,105)	1,444	86,0	-	-	-	0,019	248,2	-	

Anm.: Zahlen in (): Störung durch re-entry
(xxx): Meßeinrichtung ausgefallen.

Tabelle 3: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte. Heizflächenleistung $q = 432 \text{ W/cm}^2$

Versuch Nr.	gemessen					gerechnet								
	v_2 [m/s]	P_2 [bar]	Δp [bar]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	P_m [bar]	x_m -	Δp_R [bar]	\emptyset -	X_{LM} -	s_{RR} [mm]	$u_{C RR}$ [m/s]	s_{RN} [mm]	
40 ... 44 $P_{SG} = 0,392 \text{ bar}$	3,60	0,58	0,055	0,578	0,789	0,608	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	3,35	0,65	0,072	(xxx)	(xxx)	0,686	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	3,10	0,68	0,116	0,528	0,673	0,738	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
	1,59	0,90	0,450	0,163	0,173	1,125	2,8	0,3583	10,5	0,612	0,197	137,4	0,185	
	1,20	0,92	0,540	(xxx)	(xxx)	1,190	5,6	-	-	-	0,135	193,6	0,125	
	1,05	0,92	0,565	0,101	0,102	1,202	7,4	0,4477	17,5	0,254	0,117	218,8	0,105	
	0,92	0,91	0,575	0,087	0,086	1,197	9,3	0,4495	20,1	0,200	0,102	242,7	0,089	
	0,77	0,87	0,575	0,072	0,074	1,157	12,2	0,4235	23,4	0,150	0,087	274,3	0,074	
	0,66	0,86	0,567	0,060	0,062	1,143	15,4	0,4051	27,0	0,117	0,076	298,5	0,061	
	0,57	0,84	0,545	0,050	0,052	1,112	19,1	0,3716	30,6	0,091	0,066	325,6	0,051	
	0,46	0,79	0,504	0,039	0,040	1,042	25,5	0,315	36,5	0,063	0,054	366,4	0,041	
	0,38	0,78	0,465	0,027	0,030	1,012	32,1	0,2745	43,7	0,047	0,046	386,5	0,035	
	0,33	0,77	0,435	0,019	0,023	0,987	37,9	0,2451	50,5	0,037	0,041	402,9	0,030	
	0,28	0,75	0,375	0,016	0,019	0,937	45,9	0,1935	58,4	0,027	0,035	425,5	0,023	
	0,231	0,725	0,322	0,011	0,014	0,881	57,1	0,1447	73,1	0,017	0,028	456,4	0,011	
	0,179	0,68	0,282	0,003	0,006	0,821	75,6	0,1025	125,7	0,008	0,026	533,5	-	
	45 ... 48 $P_{SG} = 0,784 \text{ bar}$	2,93	0,86	0,000	0,600	0,830	0,86	≈ 0	-	-	-	-	-	-
2,50		0,92	0,100	0,412	0,485	0,97	≈ 0	-	-	-	-	-	-	
1,67		0,95	0,362	0,170	0,189	1,131	2,4	0,2777	8,8	0,712	0,220	116,4	0,197	
1,52		0,97	0,411	0,153	0,166	1,175	3,2	0,3232	10,4	0,557	0,188	136,0	0,178	
1,34		0,97	0,466	0,139	0,146	1,203	4,4	0,3722	12,6	0,413	0,156	164,0	0,146	
1,14		0,97	0,512	0,119	0,121	1,226	6,3	0,4126	15,5	0,298	0,128	195,5	0,117	
0,98		0,95	0,530	0,100	0,103	1,215	8,4	0,4098	18,0	0,222	0,109	226,1	0,096	
0,80		0,93	0,557	0,073	0,075	1,208	12,1	0,4152	22,5	0,154	0,088	265,1	0,074	
0,65		0,92	0,537	0,059	0,060	1,188	16,4	0,3899	27,2	0,112	0,074	293,2	0,058	
0,48		0,88	0,484	0,043	0,044	1,122	24,9	0,3251	35,5	0,068	0,057	338,3	0,043	
0,375		0,86	0,432	0,032	0,034	1,076	33,4	0,2719	44,9	0,046	0,046	365,6	0,035	
0,285		1,06	0,408	0,023	(0,038)	1,259	45,0	-	-	-	0,038	322,1	0,029	
0,253		1,07	0,378	0,019	(0,049)	1,230	51,5	-	-	-	0,034	329,4	0,025	
0,224		1,07	0,320	0,014	(0,047)	1,230	59,0	-	-	-	0,029	336,9	0,018	
0,192		1,07	0,290	0,005	(0,045)	1,215	70,1	-	-	-	0,024	347,1	0,009	
57 ... 60 $P_{SG} = 1,176 \text{ bar}$		3,78	1,28	0,000	-	-	1,280	≈ 0	-	-	-	-	-	-
		1,98	1,28	0,062	0,419	0,481	1,211	0,6	-	-	-	-	-	-
	1,37	1,27	0,315	0,166	0,181	1,427	3,1	0,2628	10,2	0,632	0,197	97,2	0,181	
	1,21	1,29	0,360	0,147	0,155	1,470	4,4	0,3102	12,5	0,456	0,163	119,4	0,147	
	0,98	1,27	0,406	0,118	0,122	1,473	7,3	0,3488	16,3	0,281	0,124	158,8	0,108	
	0,88	1,26	0,407	0,102	0,103	1,463	9,0	0,3516	18,3	0,227	0,110	175,4	0,094	
	0,80	1,23	0,435	0,088	0,089	1,447	11,0	0,3681	20,8	0,185	0,098	196,3	0,082	
	0,70	1,22	0,423	0,077	0,077	1,431	13,7	0,3544	23,6	0,147	0,087	213,9	0,070	
	0,63	1,23	0,413	0,069	0,070	1,436	16,0	0,3414	26,0	0,125	0,079	224,2	0,062	
	0,55	1,22	0,425	0,060	0,060	1,432	19,5	0,3492	30,7	0,101	0,070	240,0	0,053	
	0,48	1,26	0,400	0,052	0,053	1,460	23,3	0,3274	35,0	0,082	0,063	245,4	0,047	
	0,41	1,22	0,385	0,043	0,043	1,412	29,2	0,3078	41,8	0,062	0,054	268,1	0,040	
	0,37	1,24	0,347	0,039	0,040	1,413	33,1	0,2749	45,4	0,052	0,050	271,0	0,037	
	0,337	1,25	0,340	0,036	0,037	1,420	37,0	0,2694	51,4	0,045	0,046	274,9	0,035	
	0,187	1,42	0,306	0,011	(0,075)	1,575	72,4	-	-	-	0,025	275,7	0,008	

Anm.: Zahlen in (): Störung durch re-entry

(xxx): Meßeinrichtung ausgefallen

Tabelle 4: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte. Heizflächenleistung $q = 526 \text{ W/cm}^2$

Versuch Nr.	gemessen					gerechnet							
	v_2 [m/s]	p_2 [bar]	Δp [bar]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	P_m [bar]	x_m -	Δp_R [bar]	ϕ -	X_{LM}	s_{RR} [mm]	$u_{C,RR}$ [m/s]	s_{RN} [mm]
49 ... 51 $P_{SG} = 0,392 \text{ bar}$	1,78	1,02	0,494	0,146	0,165	1,267	2,7	0,3716	9,6	0,656	0,207	135,1	0,182
	1,51	1,06	0,568	0,122	0,132	1,344	4,3	0,4431	12,3	0,445	0,162	167,6	0,139
	1,26	1,07	0,620	0,102	0,107	1,380	6,6	0,4832	15,4	0,301	0,129	206,3	0,106
	1,08	1,07	0,648	0,088	0,089	1,392	8,9	0,5007	18,3	0,225	0,109	235,4	0,086
	0,94	1,04	0,653	0,075	0,075	1,366	11,5	0,4888	20,9	0,173	0,094	266,5	0,071
	0,85	1,05	0,653	0,060	0,063	1,376	14,0	0,4652	22,9	0,141	0,084	288,2	0,060
	0,73	1,02	0,643	0,049	0,051	1,341	17,5	0,4415	26,5	0,110	0,073	316,2	0,049
	0,63	0,99	0,620	0,041	0,043	1,300	21,5	0,4055	30,1	0,086	0,064	342,9	0,041
	0,55	0,97	0,596	0,037	0,038	1,268	25,6	0,3759	34,3	0,069	0,057	364,0	0,037
	0,50	0,96	0,578	0,032	0,034	1,249	28,9	0,3529	37,5	0,059	0,052	376,0	0,033
	0,48	0,96	0,565	0,028	0,029	1,242	30,0	0,3481	39,0	0,056	0,051	376,2	0,033
	0,43	0,94	0,538	0,023	0,025	1,209	34,3	0,3151	43,3	0,046	0,046	392,8	0,029
	0,374	0,92	0,493	0,017	0,020	1,166	40,6	0,2701	49,4	0,036	0,040	412,1	0,023
	0,341	0,90	0,465	0,014	0,017	1,132	45,2	0,2406	54,2	0,030	0,037	427,4	0,018
	0,315	0,88	0,432	0,011	0,014	1,096	49,5	0,2093	58,3	0,025	0,034	442,0	0,013
	0,313	0,80	0,410	0,008	0,010	1,005	49,8	-	-	-	-	-	-
	52 ... 54 $P_{SG} = 0,784 \text{ bar}$	3,22	0,93	0,085	0,510	0,605	0,973	≈ 0	-	-	-	-	-
3,03		0,99	0,137	0,457	0,531	1,059	≈ 0	-	-	-	-	-	-
2,75		0,98	0,240	0,332	0,366	1,100	≈ 0	-	-	-	-	-	-
1,44		1,12	0,610	0,105	0,118	1,425	5,0	0,4693	13,3	0,398	0,151	175,5	0,126
1,24		1,12	0,640	0,088	0,097	1,440	7,0	0,4919	15,8	0,292	0,126	205,9	0,102
1,07		1,11	0,665	0,075	0,081	1,445	9,2	0,5113	18,7	0,222	0,108	233,5	0,084
0,959		1,08	0,685	0,067	0,072	1,425	11,1	0,5139	21,0	0,181	0,096	257,9	0,072
0,850		1,07	0,675	0,057	0,062	1,405	13,6	0,4855	23,3	0,146	0,086	278,5	0,062
0,748		1,05	0,660	0,048	0,053	1,380	16,7	0,4606	26,2	0,117	0,076	301,3	0,052
0,690		1,03	0,638	0,048	0,050	1,349	18,8	0,4393	28,1	0,102	0,070	319,3	0,046
0,61		1,01	0,612	0,045	0,045	1,316	22,3	0,4098	31,4	0,083	0,063	340,2	0,041
0,53		1,00	0,583	0,037	0,037	1,291	26,7	0,3779	35,9	0,066	0,056	355,0	0,036
0,44		0,97	0,540	0,029	0,029	1,240	33,7	0,3284	43,0	0,048	0,047	384,4	0,030
0,247		0,97	0,460	0,008	0,011	1,200	65,4	0,2553	111,1	0,015	0,026	433,8	0,003
61 ... 63 $P_{SG} = 1,176 \text{ bar}$		4,46	1,28	0,000	0,626	-	1,28	≈ 0	-	-	-	-	-
	2,62	1,27	0,080	0,439	0,493	1,31	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	1,46	1,33	0,510	0,115	0,129	1,585	4,4	0,4127	12,2	0,473	0,166	137,5	0,138
	1,34	1,33	0,530	0,104	0,116	1,595	5,5	0,4280	13,6	0,385	0,148	155,0	0,120
	1,20	1,33	0,550	0,093	0,102	1,605	7,0	0,4455	15,5	0,303	0,129	175,8	0,102
	1,08	1,31	0,570	0,083	0,090	1,595	8,7	0,4585	17,5	0,245	0,115	196,6	0,089
	0,96	1,28	0,570	0,071	0,076	1,565	10,8	0,4525	19,7	0,195	0,101	219,0	0,076
	0,84	1,27	0,565	0,060	0,065	1,552	13,5	0,4395	22,4	0,155	0,089	239,6	0,064
	0,71	1,23	0,560	0,046	0,051	1,510	17,6	0,4208	26,4	0,116	0,076	268,4	0,052
	0,64	1,22	0,536	0,040	0,044	1,488	20,3	0,3976	29,0	0,097	0,069	282,6	0,045
	0,57	1,22	0,516	0,034	0,038	1,478	23,8	0,3776	32,5	0,081	0,062	295,1	0,041
	0,49	1,21	0,459	0,026	0,030	1,439	29,0	0,3265	36,7	0,063	0,055	311,5	0,036
	0,392	1,21	0,408	0,017	0,022	1,414	38,4	0,2814	47,1	0,043	0,045	329,7	0,029
	0,212	1,38	0,395	0,000	(0,050)	1,578	76,8	-	-	-	0,022	335,4	-

Anm.: Zahlen in (): Störung durch re-entry

Tabelle 5: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte. Heizflächenleistung $q = 629 \text{ W/cm}^2$

Versuch Nr.	gemessen					gerechnet							
	v_2 [m/s]	p_2 [bar]	Δp [bar]	s_1 [mm]	s_2 [mm]	p_m [bar]	x_m -	Δp_R [bar]	ϕ -	X_{LM} -	s_{RR} [mm]	$u_{C RR}$ [m/s]	s_{RN} [mm]
1 ... 4 $P_{SG} = 0,392 \text{ bar}$	1,519	0,46	0,007	0,644	1,170	0,464	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	1,31	0,47	0,032	0,409	0,620	0,486	≈ 0	-	-	-	-	-	-
	0,981	0,50	0,084	0,258	(0,449)	0,542	1,2	-	-	-	0,255	67,9	0,280
	0,742	0,46	0,122	0,178	0,200	0,521	3,0	0,0921	10,3	0,398	0,157	124,3	0,209
	0,565	0,48	0,149	0,146	(0,223)	0,554	5,3	-	-	-	0,116	160,2	0,168
	0,475	0,47	0,167	0,107	0,109	0,553	7,1	0,1385	19,4	0,182	0,099	183,2	0,144
	0,359	0,46	0,165	0,084	0,088	0,522	11,2	0,1280	24,7	0,113	0,076	228,1	0,113
	0,289	0,49	0,175	0,073	(0,573)	0,577	15,4	-	-	-	0,065	232,3	0,094
	0,233	0,48	0,153	0,060	(0,930)	0,556	20,3	-	-	-	0,055	251,2	0,083
	0,152	0,47	0,115	0,045	(0,46)	0,527	33,7	-	-	-	0,040	278,6	0,064
	0,149	0,47	0,075	0,031	(xxx)	0,507	34,3	-	-	-	0,040	278,6	0,063
	0,090	0,45	0,075	0,020	(xxx)	0,487	59,9	-	-	-	0,032	322,6	0,030
	0,060	0,45	0,047	0,010	(xxx)	0,473	92,2	-	-	-	0,009	313,2	-
	64 ... 66 $P_{SG} = 1,176 \text{ bar}$	2,88	1,32	0,162	0,274	0,324	1,401	≈ 0	-	-	-	-	-
2,11		1,38	0,470	0,148	0,177	1,615	1,8	0,3582	8,1	1,084	0,269	87,3	0,200
1,55		1,40	0,620	0,100	0,113	1,710	5,2	0,4888	12,7	0,415	0,155	162,1	0,117
0,97		1,32	0,680	(0,048)	(0,056)	1,66	13,5	0,4962	20,9	0,160	0,091	261,9	0,059
0,84		1,29	0,695	0,044	0,050	1,620	16,9	0,4758	24,1	0,124	0,079	288,1	0,048
0,746		1,27	0,700	0,032	0,039	1,620	20,1	0,4861	27,9	0,103	0,071	308,7	0,041
0,67		1,26	0,648	0,026	0,033	1,584	23,3	0,4374	30,2	0,085	0,064	324,1	0,037
0,58		1,24	0,608	0,018	0,026	1,544	28,3	0,3941	34,5	0,067	0,056	344,5	0,032
0,53		1,22	0,588	0,019	0,023	1,514	32,0	0,3746	38,1	0,057	0,051	359,7	0,029
0,48		1,20	0,550	0,014	0,019	1,475	36,3	0,3365	41,6	0,047	0,047	373,5	0,025
0,43		1,21	0,505	0,012	0,017	1,462	40,1	0,3042	45,2	0,041	0,043	378,8	0,021
0,375		1,22	0,445	0,006	0,012	1,443	48,4	-	-	-	0,037	389,7	0,014
0,262		1,22	0,417	0,000	(0,035)	1,429	72,6	-	-	-	0,023	421,1	-

Anm.: Zahlen in (): Störung durch re-entry
(xxx): Meßeinrichtung ausgefallen

Tabelle 6: Wichtigste gemessene und gerechnete Werte. Heizflächenleistung $q = 213$ bzw. 737 W/cm^2

Versuch Nr.	Heizflächen- leistung W/cm ²	Druck p _m		Gemessene Geschwindigkeit v ₂ , m/s		Gerechnete kritische Geschwindig- keit v ₂ bei Dryout, m/s	
		letzte Stufe	vorletzte Stufe	letzte Stufe	letzte Stufe	reine Ringströmung (x = 100 %)	Ring-Nebelströmung (x < 100 %)
15/		bar	(noch kein Dryout)	(Dryout)			
1 ... 4	213	0,473	0,090	0,060	0,0565	0,058	
5 ... 8	272	0,535	0,090	0,072	0,0722	0,074	
17 ... 20	272	0,900	0,118	0,086	0,0720	0,073	
27 ... 29	272	1,32	0,092	0,083	0,0718	0,072	
9 ... 12	365	0,610	0,124	0,101	0,0970	0,111	
21 ... 23	365	0,978	0,130	0,106	0,0970	0,105	
31 ... 33	365	1,40	0,110	0,100	0,0970	0,102	
13 ... 16	432	0,717	0,144	0,122	0,114	0,153	
24 ... 26	432	1,11	0,170	0,141	0,114	0,133	
34 ... 36	432	1,44	0,156	0,130	0,114	0,134	
40 ... 44	526	0,821	0,231	0,179	0,138	0,223	
45 ... 48	526	1,22	0,224	0,192	0,138	0,196	
57 ... 60	526	1,58	0,337	0,187	0,138	0,185	
49 ... 51	629	1,01	0,317	0,313	0,165	0,299	
52 ... 54	629	1,20	0,440	0,247	0,165	0,257	
61 ... 63	629	1,58	0,392	0,212	0,165	0,233	
64 ... 66	737	1,43	0,375	0,262	0,193	0,308	

Tabelle 7: Geschwindigkeiten vor und während der Dryoutphase