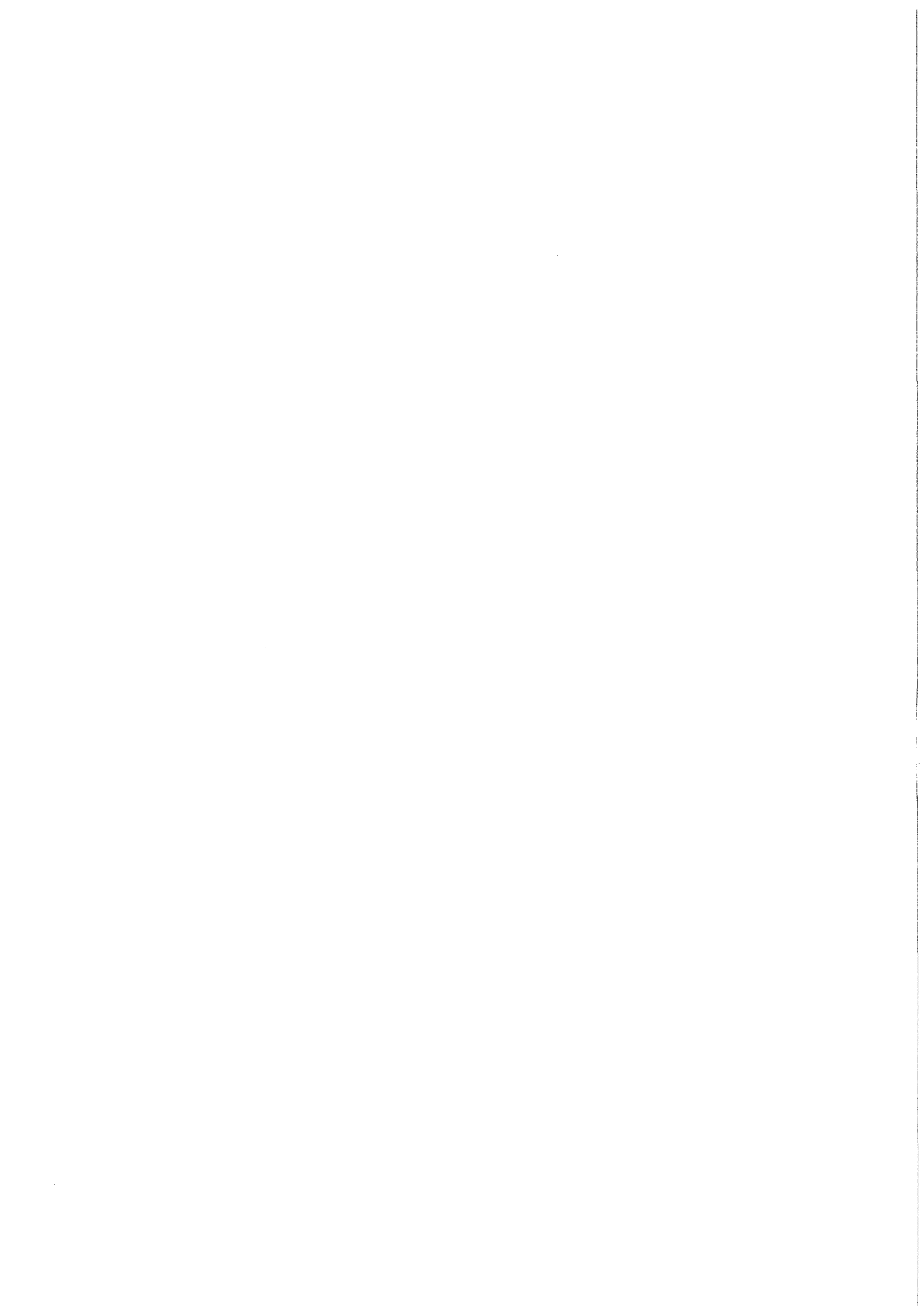


**KfK 3954  
EUR 9609d  
Juli 1985**

# **Experimentelle Untersuchung der instationären Zweiphasenströmung durch perforierte Platten**

**G. P. Tartaglia  
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Schneller Brüter**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik  
und Reaktortechnik

Projekt Schneller Brüter

KfK 3954

EUR 9609d

Experimentelle Untersuchung der instationären Zweiphasenströmung  
durch perforierte Platten

G. P. Tartaglia

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Karlsruhe (TH).

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

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## K U R Z F A S S U N G

TARTAGLIA, Giacinto Piero :

" EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER INSTATIONÄREN ZWEIPHASEN-  
STRÖMUNG DURCH PERFORIERTE PLATTEN "

Die bei einem hypothetischen Störfall mit Kernzerstörung in einem Natriumgekühlten Schnellen Brüter Reaktor (HCDA) auftretenden fluidmechanischen Phänomene und daraus resultierenden Krafteinwirkungen auf Reaktorstrukturen werden durch eine aus Ähnlichkeitsbetrachtungen hergeleitete Versuchsanordnung simuliert.

Diese beschreibt eindimensional die Strömung der Kühlmittelmasse oberhalb der Kernstrukturen durch die Tauchplatte auf den Reaktordeckel.

Bei den Versuchen mit einer Wasser-Luft Mischung als Modellfluid wurden folgende Parameter verändert : Geometrie der Tauchplatte (Perforationsverhältnis, Anzahl der Bohrungen), Anfangshöhe des Fluids über der Tauchplatte, Luftvolumenanteil, Größe der Luftblasen, Beschleunigungsverlauf des Modellfluids.

Gemessen wurden die Druckverluste an der Tauchplatte, die Kräfte auf dieselbe und die obere Platte, die Beschleunigung und die Position des Kolbens sowie der Luftvolumenanteil für verschiedene Strouhal- und Beschleunigungszahlen.

Die Strömung abwärts der perforierten Platte wurde von einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt.

Folgende Beziehungen wurden aufgestellt :

- Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit von der Beschleunigungs- und Strouhalzahl.
- Zeitverzögerung der Kraft auf die obere Platte als Funktion der Kavitationszahl oberhalb der Tauchplatte.
- Kraft- und Impulseinwirkung auf die obere Platte(Reaktordeckel) im Vergleich mit den Werten an der Tauchplatte.

Anhand der Filmaufnahmen wurde das Entstehen von Fluidstrahlen an der Tauchplatte untersucht :

- Die Bewegung der Mischungsoberfläche sowie des Fluidsstrahls wurde in Abhängigkeit von Luftvolumenanteil und Perforationsverhältnis ermittelt.
- Das Kavitationsvolumen wurde in Abhängigkeit der Kavitationszahl ermittelt.

## A B S T R A C T

TARTAGLIA, Giacinto Piero :

" EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE UNSTEADY TWO-PHASE FLOW THROUGH PERFORATED PLATES "

The coolant flow across the perforated dip-plate during a hypothetical core disruptive accident (HCDA) in a liquid metal fast breeder reactor was simulated in a one-dimensional model.

Experiments with a water-air mixture as fluid were run by varying the following parameters : geometry of the dip-plate (perforation ratio, number of the holes), height of the fluid head over the dip-plate, air volumetric fraction, size of the air bubbles, acceleration of the fluid.

The pressure drop across the dip-plate, the forces acting on the dip-plate and on the upper plate, acceleration and displacement of the piston, the air volumetric fraction and the size of the air bubbles were measured in a wide range of Strouhal and acceleration numbers. The flow pattern downstream the dip-plate was filmed with a high-speed camera.

The following correlations were investigated :

- resistance coefficients as a function of the acceleration and Strouhal number,
- time delay of the force on the upper plate as a function of the cavitation number,
- forces and impulses acting on the upper plate compared with those acting on the dip-plate.

Finally, using high-speed film pictures, the formation of fluid jets downstream the dip-plate was investigated. The following relations were obtained :

- displacement of the mixture surface and of the jets as a function of the perforation ratio and of the air volumetric fraction,
- cavitation volume as a function of the cavitation number.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
	-----
1. Einleitung .....	1
2. Ziel der Untersuchungen .....	4
3. Modellierung .....	5
4. Dimensionsanalyse .....	6
5. Versuchsstand .....	11
6. Gemessene Größen .....	15
7. Instrumentierung .....	16
7.1 Geschwindigkeitsmessung .....	16
7.2 Umwandlung der Daten .....	17
8. Parameter der experimentellen Untersuchung .....	18
9. Bestimmung der Größe der Luftblasen .....	20
10. Beobachtung der Strömung .....	21
11. Filmauswertung .....	22
12. Widerstandskoeffizienten der Tauchplatten .....	35
12.1 Berechnung der experimentell ermittelten Wider- standskoeffizienten .....	36
12.2 Widerstandskoeffizienten bei instationärer Zweiphasenströmung .....	38
12.3 Widerstandskoeffizienten bei stationärer Strömung und Kontraktionskoeffizienten der Strahlen an den Tauchplatten .....	41
12.4 Kritische Strömung .....	42
12.5 Multiplikationsfaktoren für die stationären Druckverluste .....	43
13. Strömungsverhalten oberhalb der Tauchplatte .....	53
13.1 Kavitation .....	53
13.2 Kräfte auf die obere Platte (Reaktordeckel) ...	54
13.3 Zeitverzögerung der Kräfte .....	56
14. Abschließende Darstellung der Ergebnisse .....	59
15. Zusammenfassung .....	65

	Seite
	-----
Nomenklatur.....	69
Literatur .....	73
Abbildungen.....	79

Anhang :

-----

A1.	Versuchstand .....	114
	A1.1. Tauchplatten .....	114
A2.	Instrumentierung .....	116
	A2.1 Kraftaufnehmer .....	116
	A2.2 Druckaufnehmer .....	117
	A2.3 Start eines Versuches .....	118
A3.	Signalverarbeitung .....	121
	A3.1 Digitalisierung .....	122
	A3.2 Tiefpaßfilter .....	123
	A3.3 Umwandlung der Daten.....	124
A4.	Bestimmung des Luftvolumenanteiles .....	126
A5.	Verhalten der Mischung im Stahlzylinder. Vorversuche in einem Plexiglaszylinder .....	127
	A5.1 Ergebnisse von Sinterplattenexperimenten .....	127
	A5.2 Einfluß der Tauchplatte auf den Blasendurchmesser	130
	A5.3 Ergebnisse von Tüllenexperimenten .....	130
A6.	Beschreibung der Versuche .....	132
	A6.1 Meßergebnisse .....	138
	A6.2 Effekt der Luftmikroblasen .....	143
A7.	Beobachtung der Strömung und Filmauswertung .....	145
	A7.1 Beleuchtung .....	145
	A7.2 Beispiele der Beobachtung der Strömung .....	147
	A7.3 Filmauswertung .....	148
	Abbildungen .....	151



## 1. - Einleitung

-----

Während eines hypothetischen Störfalls mit Kernzerstörung (HCDA = Hypothetical Core Disruptive Accident) in einem natriumgekühlten schnellen Brüter wird eine große Energiemenge in einigen Millisekunden freigesetzt.

Im Kernbereich bildet sich ein mehrphasiges heißes Gemisch, das durch die oberen Kernstrukturen in den Natriumpool (s. Abb. 1.1) strömt. Darin bildet sich eine mehrphasige Blase, welche sich ausbreitet und das flüssige Natrium nach oben drückt. Die Wärme- und Druckenergie dieser Blase wird also zum Teil in kinetische Energie des flüssigen Kühlmittels umgewandelt. Die dabei entstehende mechanische Energie muß von dem Reaktordruckbehälter aufgenommen werden, besonders von dem oberen Deckel.

Es gibt verschiedene Mechanismen, welche die Auswirkungen eines Störfalls vermindern.

Zum einen wird Energie direkt als Wärme vom heißen Gemisch an das relativ kalte Natrium übertragen; zum andern wird Energie durch Reibung in der Strömung um die oberen Kernstrukturen dissipiert.

Die mechanische Energie ist trotzdem noch zu groß. Um im Falle eines hypothetischen Störfalls die Schäden am Reaktordruckbehälter und den Einbauten zu vermindern, werden im Reaktor zusätzliche Schutzelemente eingebaut. Bei einem Reaktor des Loop-Typs sind das ein Schildtank und eine Tauchplatte.

Diese Arbeit befaßt sich mit der Tauchplatte. Diese besteht aus einer relativ dünnen Stahlplatte mit vielen Bohrungen, welche 35 cm unter dem normalen Natriumspiegel im Reaktortank liegt (s. Abb. 1.2).

Die Hauptaufgaben dieser Tauchplatte sind :

- den direkten Aufschlag des Natriumpools gegen den Reaktordeckel zu vermeiden,
- eine starke Verwirbelung des Kühlmittels zu bewirken,
- den Kraftstoß auf den Reaktordeckel über einen längeren Zeitraum zu verteilen.

Bei bestimmten Strömungszuständen können sich - in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern - Natriumstrahlen stromabwärts der Tauchplatte ausbilden. In diesem Fall hat dann die Tauchplatte wie schon bisherige Untersuchungen gezeigt haben /1/,/2/,/3/, einen wesentlichen Einfluß auf die Störfallauswirkungen. Daher ist die Modellierung der Tauchplatte und der damit verbundenen Deckelbelastung des Reaktordruckbehälters von großer Bedeutung.

In einer ersten Phase eines hypothetischen Störfalls ist es realistisch, das Kühlmittel mit einer einphasigen Strömung zu simulieren, (z.B. mit Wasser /1/) weil der Gasvolumenanteil vernachlässigbar ist.

In der zweiten Phase eines hypothetischen Störfalls kann aber eine mehrphasige Mischung (Natrium, Natriumdampf, Stahl und Brennstoffpartikel) die Tauchplatte erreichen. In diesem Fall ist die Simulation des Kühlmittels mit einer Zweiphasenströmung realistischer. In der vorliegenden Arbeit wurde die mehrphasige Strömung mit einer Mischung aus Wasser und Luft simuliert.

Zur Untersuchung des hypothetischen Störfalls sind große Rechenprogramme wichtige Hilfsmittel ( z.B. SIMMER /4/). Der derzeitige Stand des Rechenprogramms SIMMER erlaubt keine detaillierte Modellierung der Tauchplatte und bisher wurden keine Simulationsrechnungen mit Zweiphasenströmung in dem Tauchplattenbereich durchgeführt.

Aus oben aufgeführten Gründen ist eine experimentelle Untersuchung der instationären Zweiphasenströmung des Kühlmittels durch die Tauchplatte unter Simulation von Geometrie und allen bedeutenden Strömungsparametern sehr wichtig für die Abschätzung der Betriebssicherheit eines natriumgekühlten schnellen Brütters. Außerdem ist diese Untersuchung von allgemeinem Interesse, da die instationäre Zweiphasenströmung durch perforierte Strukturen in vielen anderen Bereichen der Technik auftritt. In der bisherigen Literatur gibt es keine Untersuchung (experimentell oder theoretisch) über instationäre Zweiphasenströmungen durch perforierte Platten, bei der eine so starke Beschleunigung und eine freie Fluidoberfläche oberhalb der perforierten Platte vorhanden ist.

## 2. - Ziel der Untersuchungen

-----

Die Hauptziele dieser Untersuchungen können folgendermaßen zusammengefaßt werden :

- Modellierung der instationären Zweiphasenströmung von Kühlmittel durch die Tauchplatte.  
Dabei sollen verschiedene Werte der Geometrieparameter (Perforationsverhältnis, Anzahl der Bohrungen, Höhe des Fluids oberhalb der Tauchplatte) sowie der Strömungsparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Luftvolumenanteil, Größe der Luftblasen) untersucht werden.
  
- Messung des Druckverlustes an der Tauchplatte und der Kräfte, die vom Fluid auf die Tauchplatte und auf die obere Platte (Reaktordeckel) übertragen werden. Sowie Messung der Zeitverzögerung zwischen den Kräften auf die Tauchplatte und den Kräften auf die obere Platte.

### 3. - Modellierung

-----

Bei einem hypothetischen Störfall in einem SNR 300-typischen Reaktor ergeben sich aus SIMMER-Rechnungen maximale Geschwindigkeiten des Kühlmittels im Reaktorpool in der Größenordnung von 3 m/s in etwa 10 ms /5/. Diese Werte werden als Grenzen für die Versuchsreihen gewählt. Da ein Modell der gesamten Tauchplatte wegen der vielen Bohrungen (mehr als hundert) zu kompliziert gewesen wäre, wird nur ein kleiner Ausschnitt aus der Mitte der Tauchplatte mit einer Bohrung (oder mit sieben Bohrungen in dreieckiger Anordnung) betrachtet (s. Abb. 1.2).

Die Geschwindigkeit des Kühlmittels im Natriumpool aufwärts der Tauchplatte hat normalerweise zwei Komponenten, eine axiale und eine radiale. In der Mitte der Tauchplatte ist jedoch die radiale Komponente wegen der Symmetrieeigenschaft der Strömung vernachlässigbar klein.

Die Simulation mit einem eindimensionalen Modell ist aus oben aufgeführten Gründen vernünftig /1/.

Zur Simulation des Kühlmittels wurde eine Mischung aus Luft und Wasser verwendet. Als Grenze für den maximalen Luftvolumenanteil wurde eine Blasenströmung gewählt, welche in eine Propfenströmung umzuschlagen anfängt.

Zur Nachbildung der transienten Strömung im Reaktor, d.h. in 10 ms die Geschwindigkeit des Fluids auf 3 m/s zu bringen, muß im Modell die Mischungsgeschwindigkeit von 17 m/s in 1.15 ms erreicht werden /1/.

#### 4 - Dimensionsanalyse

-----

Eine Dimensionsanalyse des Problems einer instationären Zweiphasenströmung durch perforierte Platten ergibt, wieviele unabhängige dimensionslose Kennzahlen das Problem charakterisieren.

Die Strömung wird als 'homogene Strömung' vorausgesetzt. Es wird also angenommen, daß die Luft und das Wasser als homogenes Gemisch im Rohr strömen. Es bestehen keine Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Luft und Wasser. Diese Annahme ist vernünftig wegen des hohen Druckes, der im Modell erreicht wird /7,8,9,10/ (s. auch Abschnitte 11 und 12.5).

Für dieses homogene Gemisch werden die Stoffgrößen gemittelt. In der Rechnung ist es dann möglich, die Luft-Wasser Strömung wie eine Einphasenströmung zu behandeln /11,12,13,14,15,16,17/.

Die Definition für die "homogene Dichte" lautet :

$$(4.1) \quad \rho = \rho_g \alpha + (1-\alpha)\rho_l$$

mit :

$\rho_g$  = Dichte der Luft

$\rho_l$  = Dichte des Wassers

$\alpha$  = Luftvolumenanteil.

Für die "homogene Viskosität"  $\mu$  lautet die Definition :

$$(4.2) \quad \mu = \mu_g \alpha + (1-\alpha)\mu_l$$

wobei gilt :

$\mu_g$  = Viskosität der Luft

$\mu_l$  = Viskosität des Wassers.

Die Strömung wird als adiabatisch betrachtet. Die Temperatur ist bei 20° C gewählt und somit eine Konstante.

Die Fallbeschleunigung  $g$  sowie die Reibungsdruckverluste im Stahlzylinder sind vernachlässigbar gegenüber den Beschleunigungsdruckverlusten des Fluids wegen der hohen Beschleunigungen des Kolbens.

Die Größen, welche diese Aufgabenstellung charakterisieren, sind :

- eine charakteristische Länge z.B. der Durchmesser  $D$  des Testrohrs
- die Druckverluste durch die Tauchplatte  $\Delta P$
- die Stoffgrößen der Mischung : Dichte  $\rho$ , kinematische Viskosität  $\nu$
- der Luftvolumenanteil  $\alpha$  und
- die Zeit  $t$  .

Außerdem müssen Randbedingungen berücksichtigt werden, und zwar, wie die Kraft auf das Fluid unterhalb der Tauchplatte übertragen wird. Ein parabolisches Gesetz kann mit guter Näherung die in dieser Arbeit verwendeten Kolbenbeschleunigungseinrichtungen beschreiben /2/.

Nimmt man ein parabolisches Gesetz an, d.h. :

$$(4.3) \quad F = a' + b't^2$$

oder :

$$(4.4) \quad F = a't + b't^2$$

so sind zwei weitere Parameter,  $a'$  und  $b'$  zu betrachten.

Ingesamt gibt es acht physikalische Parameter ( $\Delta P$ ,  $\rho$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $\alpha$ ,  $D$ ,  $a'$ ,  $b'$ ).

Die Anzahl der vorliegenden Grundeinheiten ist drei, d.h. :

Masse, Länge, Zeit.

Aus dem Buckingham Theorem / 6,18/ erhält man für diesen Fall, daß  
acht-drei = fünf

dimensionslose Kennzahlen zur Charakterisierung des Problems ausreichen.

Eine passende Wahl der Kennzahlen könnte wie folgt sein :

$$(4.5) \quad C_u = 2\Delta P/\rho v^2 \quad (\text{Widerstandskoeffizient der Tauchplatte})$$

$$(4.6) \quad Re = vD/v \quad (\text{Reynoldszahl})$$

$$(4.7) \quad Str = v_{\max} t/D \quad (\text{Strouhalzahl})$$

$$(4.8) \quad \Gamma = Da/C_s v^2 \quad (\text{Beschleunigungszahl})$$

$$(4.9) \quad \alpha \quad (\text{Luftvolumenanteil})$$



mit :

$v, a$  = Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung der ungestörten Strömung unterhalb der Tauchplatte (anstelle der zwei Parameter  $a'$  und  $b'$ )

$v_{\max}$  = maximale Geschwindigkeit der ungestörten Strömung unterhalb der Tauchplatte

$D$  = äquivalenter Rohrdurchmesser, der zu einer Öffnung der Tauchplatte gehört

$C_s$  = Widerstandskoeffizient bei stationärer Strömung.

Wie bei den Versuchen mit instationärer Einphasenströmung /1/ war auch bei den durchgeführten Versuchen mit Zweiphasenströmung die Reynoldszahl größer als  $10^5$  und es zeigte sich, daß in beiden Fällen die Reynoldszahl keinen Einfluß auf die Widerstandskoeffizienten der Tauchplatte hatte. Es bleiben also vier dimensionslose Kennzahlen ( $C_u, Str, \Gamma, \alpha$ ).

Jedoch muß auf Grund der Kompressibilität der Mischung in manchen Fällen noch die Machzahl als dimensionslose Größe berücksichtigt werden :

$$(4.10) \quad Ma = v/v_c$$

$v_c$  = Schallgeschwindigkeit der Mischung.

Entsteht in der Strömung Kavitation, z.B. stromabwärts von den perforierten Strukturen, dann ist zusätzlich noch die Kavitations-

zahl zu berücksichtigen :

$$(4.11) \quad K_c = 2(P - P_v) / (\rho v_j^2)$$

mit :

$K_c$  = Kavitationszahl

$P$  = Umgebungsdruck stromabwärts von der perforierten Struktur

$P_v$  = Wassersattdampfdruck

$v_j$  = charakteristische Geschwindigkeit in der perforierten Struktur (z.B. Geschwindigkeit der aus der Tauchplatte herausströmenden Strahlen).

## 5.-Versuchsstand

-----

Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen den Versuchsstand schematisch. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsstandes ist im Anhang A1 angegeben. Gegenüber der Reaktorgröße sind die Tauchplatte und der darüberliegende Bereich im Modell im Maßstab 1 : 1,54 wie bei den Versuchen von /1,2/ verkleinert worden. Die Teststrecke besteht aus einem unteren Stahlzylinder von 800 mm Länge und 110 mm Innendurchmesser, aus einer perforierten Platte, die die Tauchplatte simuliert, aus einem oberen durchsichtigen Plexiglaszylinder von 900 mm Länge, aus einem Entlüftungsschlitz von 50 mm Länge, aus einem zweiten oberen Stahlzylinder von 380 mm Länge und aus einer oberen Platte, die den Reaktordeckel simuliert.

Durch den Entlüftungsspalt im oberen Bereich der Teststrecke wird das Schutzgas, das hier durch Luft simuliert wird, auf Umgebungsdruck gehalten. Ansonsten ist zu befürchten, daß Teile der Teststrecke (z.B. der Plexiglaszylinder) zerstört werden.

Im Reaktor ist das obere Schutzgasvolumen geschlossen, so daß das Gas während eines Störfalles durch die Bewegung des Kühlmittels komprimiert werden kann. Man kann jedoch annehmen, daß wegen der sphärischen Form der " HCDA " Blase, die Strahlen, die in der Plattenmitte erzeugt werden, schneller als die anderen sind.

Damit kann das Gas in radialer Richtung ohne starke Kompression abströmen, wenn die Zentralstrahlen den Reaktordeckel erreichen. Daher weicht die offene Lösung der Teststrecke nicht stark von der Wirklichkeit ab.

Im unteren Teil des Versuchszylinders befindet sich ein Kolben, der die Mischungssäule, die das Kühlmittel simuliert, beschleunigen soll. Da der Beschleunigungsverlauf während der Expansionsphase je nach Unfallablauf verschieden sein kann, wurden drei verschiedene

Beschleunigungsvorrichtungen realisiert; zwei schnell öffnende Sicherheitsventile (Ventil 1, Ventil 2 in Abb 5.1) und eine Explosionsmutter.

Der einzige Unterschied zwischen den Ventilen liegt in dem maximal möglichen Luftvolumendurchsatz. Das Ventil 2 hat einen größeren Luftdurchsatz ( $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) als das Ventil 1 ( $480 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Bei den Ventilversuchen befindet sich der Kolben am Boden des unteren Stahlzylinders. Die Ventile sind durch Flansche mit dem Zylinderboden verschraubt. Die Pressluft strömt aus der Kammer K1 mit einem höheren Druckniveau in die Kammer K2, deren Druck unter dem Öffnungsdruck des Ventils liegt. Sobald die Druckfront das Sicherheitsventil (V1 oder V2) erreicht, öffnet das Ventil und die Luft strömt in das Testrohr, wodurch der Kolben beschleunigt wird.

Bei den Versuchen mit der Explosionsmutter befindet sich der Kolben etwa 200 mm oberhalb des Zylindersbodens und der Raum darunter (K in Abb. 5.1) ist mit Luft (bis 200 Bar) gefüllt. Der Kolben wird mit dem Bolzen E festgehalten. Bei Versuchsbeginn wird er durch Sprengen der Mutter des Bolzens (Explosionsmutter) freigegeben.

Die Beschleunigungsvorrichtungen haben ein sehr unterschiedliches Verhalten. Bei den Ventilversuchen strömt die Luft durch eine schmale Öffnung in den Stahlzylinder. Bei den Versuchen mit der Sprengmutter ist die Luft bei Versuchsbeginn schon in dem Raum K unter einem hohen Druck.

Die Beschleunigungsverläufe sind also :

- Bei den Ventilen : Die Beschleunigung erhöht sich von Null bis auf einen Maximalwert, wenn die Luft in den Testzylinder strömt. Dann sinkt der Wert langsam ab. Dieser Beschleunigungsverlauf entspricht einem Verlauf der Kraft auf das Fluid, der von Gleichung (4.4) beschrieben werden kann.
- Bei der Explosionsmutter : Der maximale Wert der Beschleunigung des Kolbens wird nach einer sehr kurzen Zeit erreicht ( die Beschleunigung ist fast impulsiv). Dann sinkt die Beschleunigung allmählich

wegen der Bewegung des Kolbens und der Abnahme des Druckes unter dem Kolben ab. Dieser Beschleunigungsverlauf entspricht einem Verlauf der Kraft auf das Fluid, der von Gleichung (4.3) beschrieben werden kann.

In Abb 5.3 ist ein Vergleich zwischen den Geschwindigkeitsverläufen der drei Beschleunigungsvorrichtungen dargestellt.

Das beschleunigte Fluid bzw. die Mischung besteht aus Wasser und Luft. Die Luft wird schon vor Beginn des Beschleunigungsvorgangs durch zwei verschiedene Vorrichtungen ins Wasser geblasen :

- 1 - durch vier Tüllen, die in der Wand des Stahlzylinders liegen,
- 2 - durch Scheiben aus Sinterbronze, die am Kopf des Kolbens liegen.

Ein Versuch beginnt nur bei Vorliegen von Gleichgewichtsbedingungen zwischen Luft und Wasser.

Eine Liste der verwendeten Scheiben und Tüllen ist in den Tabellen 5.1 und 5.2 angegeben.

Nr.	Filterfeinheit ( $\mu\text{m}$ )	Dicke (mm)	Material
1	8	4	Bronze
2	20	4	"
3	30	4	"
4	45	4	"
5	60	4	"

Tab. 5.1- Scheiben aus Sinterbronze

Nr.	Durchmesser der Bohrung (mm)	Anzahl	Winkel zur Strömungs- richtung
1	0.20	4	90°
2	0.25	4	90°
3	0.35	4	90°

Tab. 5.2 - Tüllen

## 6.-Gemessene Größen

-----

Folgende Größen wurden bei allen Versuchen gemessen :

- der Druck an sieben verschiedenen axialen Punkten ( P1...P7 in  
Abb. 5.1),
- die Kraft auf die Tauchplatte und die Kraft auf die obere Platte,
- die Geschwindigkeit des Kolbens,
- die Beschleunigung des Kolbens,
- die Größe der Luftblasen.

Außerdem wurde die Strömung stromabwärts der Tauchplatte in einem 680 mm langen Testrohr (durchsichtiges Plexiglasrohr) mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Dadurch konnte die Geschwindigkeit der Luftblasen, der Mischungsoberfläche und der Strahlen aus den Tauchplattenbohrungen ermittelt werden.

## 7.-Instrumentierung

-----

Ein Schema der Instrumentierung ist in Abb. 7.1 dargestellt. Sämtliche Details der Instrumentierung sind im Anhang A2 angegeben. Hier werden deshalb nur die wesentlichen Teile beschrieben.

### 7.1-Geschwindigkeitsmessungen

-----

Ein sehr dünner Stahlstab mit kleinen Bohrungen (Lichtschranke) ist fest mit dem Kolben verbunden (Detail L in Abb.7.1). Eine Leuchtdiode erzeugt auf der einen Seite der Schranke einen Lichtstrahl, der sich durch die Bohrungen bis zu einer Photodiode auf der anderen Seite der Schranke überträgt. Bei der Bewegung der Schranke erzeugt die Photodiode ein Signal. Die Bewegung des Kolbens ist daraus leicht bestimmbar. Durch die erste Ableitung des Positionssignals nach der Zeit kann man die Geschwindigkeit und durch eine zweite Ableitung nach der Zeit auch die Beschleunigung des Kolbens bestimmen. Der Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf des Kolbens sind dann punktweise berechenbar.

Für die direkte Messung der Kolbenbeschleunigung wird ein Beschleunigungsaufnehmer in dem Kolben verwendet ( B in Abb.7.1).

In Abb. 7.2 ist ein Vergleich zwischen der vom Beschleunigungsaufnehmer gemessenen Beschleunigung des Kolbens und der durch zeitliche Ableitung des Lichtschrankensignals berechneten Beschleunigungswerts dargestellt. Man sieht, daß die zwei Messungen gut übereinstimmen.



## 7.2-Umwandlung der Daten

-----

Die Druckmessungen ( Druckaufnehmer  $P_1 \dots P_7$  in Abb. 7.1 ), die Kraftmessungen ( Kraftaufnehmer  $F_u, F_d$  ), die Beschleunigungsmessung (B) werden zuerst verstärkt und dann auf einem Analogband registriert. Das Lichtschrankensignal wird direkt auf Band registriert.

Das Anfangssignal eines Versuches, welches von der Steuereinheit erzeugt wird, wird als Spannungsänderung auf Band aufgenommen. Dieses Signal dient auch als Auslösepuls für einen Blitz, welcher so montiert ist, daß er an der Optik der Kamera erfaßt werden kann und so eine Startmarke auf den Film schreibt.

Das Signal der Digitaluhr ( Abb. 7.1 ) wird sowohl auf Band aufgenommen als auch auf einem Rand des Films in der Hochgeschwindigkeitskamera registriert. Dies ermöglicht die Synchronisierung bei der Auswertung der Meßdaten zwischen den Magnetbandsignalen und den Filmbildern. Zusätzlich ist die Kamera mit einem 1000 Hz Oszillator verbunden, dessen Signal auf dem anderen Rand des Films registriert wird. Damit kann die Filmgeschwindigkeit (Bilder/s) genau bestimmt werden.

Die Signale auf dem Analog-Band werden mittels eines Kleinrechners ( PDP11/Digital Computer) digitalisiert und auf Magnetbänder zwischengespeichert. Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgt auf der Großrechenanlage (IBM 3081- S7890).

Eine detaillierte Beschreibung der Digitalisierung und der Korrektur der Meßwerte (Kalibrierung der Aufnehmer, Bandgeräte Korrektur), der Umwandlung der Meßsignale und eine Liste der wichtigsten Computerprogramme, die für die Umwandlung der Daten entwickelt wurden, wird in Anhang A3 angegeben.

## 8.-Parameter der experimentellen Untersuchung

-----

Folgende Parameter wurden bei den Versuchen variiert :

- 1 - Das Perforationsverhältnis der Tauchplatte ( $R_p =$  Querschnittsfläche der Bohrung der Tauchplatte durch die Querschnittfläche des Testrohrs).

Drei verschiedene Perforationsverhältnisse wurden untersucht :

$$R_p = 0.12,$$

$$R_p = 0.171,$$

$$R_p = 0.25 .$$

- 2 - Die Anzahl der Bohrungen der Tauchplatte .

Es wurden Tauchplatten mit einer Bohrung in der Mitte benutzt. Um die Wechselwirkung mehrerer nebeneinander strömender Wasserstrahlen zu untersuchen, wurden auch Platten mit sieben Bohrungen in dreieckiger Anordnung eingesetzt.

- 3 - Die Höhe der Mischung oberhalb der Tauchplatte .

Es wurden verschiedene Höhen der Mischung oberhalb der Tauchplatte untersucht. Die Werte lagen zwischen 0 und 370 mm.

- 4 - Beschleunigung der Mischung :

Wie schon in Kap. 5 beschrieben, ist der zeitliche Verlauf der

Geschwindigkeit während der Störfalltransiente unbekannt bzw. es kann dieser Verlauf von Fall zu Fall verschieden sein. Deshalb wurden drei qualitativ verschiedene Formen des Geschwindigkeitsverlaufs untersucht.

5 - Luftvolumenanteil :

Da der Natriumdampfvolumenanteil in der " HCDA " Blase nicht genau bestimmt ist, wurde der Luftvolumenanteil  $\alpha$  in dem Bereich  $0.0 \leq \alpha \leq 0.28$  untersucht.

Für die Bestimmung des Luftvolumenanteils s. Anhang A4 .

6 - Größe der Luftblasen :

Es wurden Versuche mit verschiedenen Größen der Luftblasen ( von 2 bis zu 6 mm im Stahlzylinder) durchgeführt.

Für die Bestimmung der Größen der Luftblasen im Stahlzylinder s. Anhang A5.

Für die Untersuchung der Effekte der oben aufgelisteten Parameter wurden insgesamt 110 Versuche durchgeführt.

Die Hauptdaten aller durchgeführten Versuche werden in Anhang A6 angegeben.

## 9.-Bestimmung der Größe der Luftblasen

-----

Die Größe der Luftblasen im durchsichtigem Testrohr wurde aus Filmdaten (Daten von der Hochgeschwindigkeitskamera) bestimmt. Das Verhalten der Mischung im Stahlzylinder wurde mittels eines kleinen Versuchstandes untersucht, d.h. so wurde die Größe der Luftblasen bestimmt (s. Anhang A5).

Aus den Versuchen, die mit dem kleinen Versuchstand durchgeführt wurden, wurde die Abhängigkeit der Größe der Luftblasen im Stahlzylinder von folgenden Parametern bestimmt :

- Filterfeinheit der Platte aus Sinterbronze,
- Durchmesser der Bohrungen der Tüllen,
- Höhe des Mischungsniveaus,
- Eingangsdruck der Luft.

Aus den gefundenen Korrelationen wurde die Größe der Luftblasen im Stahlzylinder jeweils am Anfang eines Versuches bestimmt.

Beim Experiment wird die Zahl der Blasen oberhalb der Tauchplatte kleiner und die Blasen selbst werden größer. Manchmal bildet sich eine Blasentraube.

## 10.-Beobachtung der Strömung

-----

Die Abbildungen 10.1 und 10.2 zeigen Filmbilder der Hochgeschwindigkeitskamera aus einem Versuch, der mit folgenden Parameter durchgeführt wurde :

- Beschleunigungsvorrichtung : Ventil 2
- Perforationsverhältnis :  $R_p = 0.17$
- Zahl der Bohrungen an der Tauchplatte : 1
- Anfangsfluidhöhe oberhalb der Tauchplatte : 235 mm
- Luftvolumenanteil :  $\alpha = 0.07$
- Anfangsdurchmesser der Luftblasen : 3 mm

Am Anfang des Versuches sieht man die aus der Bohrung der Tauchplatte herausströmenden Luftblasen, die gegen die Oberfläche der Mischung schlagen. Diese Effekte werden mit allen anderen Einzelheiten über die Beobachtung der Strömung in Anhang A7 beschrieben. Im Bild 2 kommt der Strahl aus der Tauchplatte. Aufgrund der Luftblasen in der Nähe der Bohrung der Tauchplatte erkennt man den torusförmigen Wirbel, der ganz klar bei den einphasigen Versuche zu erkennen ist (s. Anhang A7), nicht.

Es ist zu beobachten, daß etwa 60 mm strömabwärts der Tauchplatte der Strahl schon sehr breit, fast so breit wie das Testrohr, ist. In den folgenden Bildern (Bilder 2 - 8) sieht man wie der Strahl sich nach oben bewegt und wie sich die Vermischung verbreitet. Die Luftblasen werden beschleunigt und die kleinen Strahlen, die sich an der Oberfläche der Mischung bilden, werden größer. Der Strahl setzt seine Bewegung fort und erreicht beim Bild 16 (22 ms nach Beginn des Versuches) die Mischungsoberfläche. Die Deformation der Mischungsoberfläche ist proportional zur Höhe der Mischung.

## 11.-Filmauswertung

-----

Die Filme von insgesamt hundert Versuchen, davon 32 mit dem Ventil 1, 41 mit Ventil 2, und 27 mit der Explosionsmutter, wurden ausgewertet.

Folgende Größen wurden im Plexiglasteil als Funktion der Zeit gemessen :

- Bewegung der Mischungsoberfläche,
- Bewegung des Strahls,
- Größe der Luftblasen,
- Geschwindigkeit der Luftblasen.

In Abb. 11.1 sind die Ergebnisse der Filmauswertung vom Versuch Nr. 52 ( ein typischer Versuch mit Ventil 2) als Beispiel gezeigt.

In Abb. 11.2 werden die Bewegung des Kolbens, der Oberfläche der Mischung und des Strahls sowie der Verlauf der Kraft auf die obere Platte für den Versuch Nr. 87 (ein typischer Versuch mit Explosionsmutter) dargestellt.

Am Anfang eines Versuches sieht man, daß der Kolben sich sehr schnell (Zeit von 0 bis  $z_1$ ) bewegt. Während dieser Zeit wird die Mischung nur komprimiert. Man erkennt keine Bewegung eines Strahls oder der Mischungsoberfläche. Es wird auch keine Kraft auf die Tauchplatte gemessen.

Für  $t=z_1$  ist die Mischung im Stahlzylinder völlig komprimiert. Der Strahl kommt aus der Tauchplatte heraus und nach ein paar Millisekunden bewegt sich auch die Oberfläche der Mischung.

Ein Vergleich zwischen der Bewegung der Mischungsoberfläche und der Kolbenbewegung zeigt, daß die Mischungsoberfläche viel schneller als der Kolben ist (s. auch Abschnitt 13.1).

Man erkennt auch, daß etwa 9 ms nach Erscheinen des Strahls dieser die Oberfläche der Mischung durchbricht.

Danach geht der Strahl in den unsichtbaren oberen Teil des Versuchstandes und schlägt an die obere Stahlplatte, die den Reaktordeckel simuliert. Die maximale Kraft, die in diesem Versuch gemessen wurde, beträgt 20 KN.

In Abb. 11.3 ist die Bewegung der Mischungsoberfläche als Funktion der Bewegung des Kolbens für verschiedene Luftvolumenanteile gezeigt. Diese Ergebnisse wurden bei Versuchen mit Explosionsmutter bei hohen Mischungsniveaus oberhalb der Tauchplatte und mit dem Perforationsverhältnis  $R_p = 0.12$  ermittelt. Die Abszisse stellt den dimensionslosen Kolbenweg  $D_p/D$ , die Ordinate den dimensionslosen Weg der Mischungsoberfläche  $D_s/D$  dar, wobei  $D_s$  vom Anfangsort der Mischungsoberfläche aus gemessen ist. Man sieht, daß sich die Mischungsoberfläche wegen der höheren Anfangsbeschleunigung umso schneller bewegt je größer der Luftvolumenanteil ist. Bei größerem Luftvolumenanteil ist die Anfangsbeschleunigung der Mischung höher, weil der Kolben bei der Komprimierung der Luft im Stahlzylinder unterhalb der Tauchplatte größere Wege zurücklegt und dadurch eine höhere kinetische Energie erreicht.

Das Verhalten des Strahls ( $D_j$ ) bei verschiedenen Luftvolumenanteilen ist ähnlich und daher ist auch der Verlauf des Verhältnisses  $R_s$  (Mischungsoberflächebewegung durch Kolbenbewegung) und  $R_j$  (Strahlbewegung durch Kolbenbewegung) ähnlich. Weitere Erklärungen der untersuchten Fälle sind im Anhang A7 angegeben.

An die oben beschriebenen Meßdaten wurden empirische Kurven der Form

$$(11.1) \quad y = ax^b$$

angepaßt . Die Koeffizienten a und b wurden für die verschiedenen Perforationsverhältnisse und Luftvolumenanteile erhalten (s. Tab. 11.1).

In Abb.11.4 ist die Bewegung der Mischungsoberfläche über der Kolbenbewegung für verschiedene Perforationsverhältnisse dargestellt. Diese Ergebnisse wurden bei Versuchen mit Explosionsmutter bei hohen Mischungsniveaus und mit einem Luftvolumenanteil  $\alpha = 0.14$  ermittelt. Man sieht, daß sich die Mischungsoberfläche umso schneller bewegt je kleiner das Perforationsverhältnis ist.

Nach der Verdichtung der Luft im unteren Stahlzylinder ist die Bewegung der Mischungsoberfläche immer größer als die Bewegung des Kolbens. Das bedeutet, daß sich zwischen der Tauchplatte und der Mischungsoberfläche ein Kavitationsvolumen bildet. Das Entstehen der Kavitation wird in Abschnitt 13.1 diskutiert.

Das Perforationsverhältnis und der Luftvolumenanteil sind die wichtigsten Parameter, um die Bewegung der Mischungsoberfläche zu beschreiben. Der Einfluß der Größe der Luftblasen ist vernachlässigbar, wie man aus Abb. 11.5 erkennen kann. Das ist eine weitere Bestätigung der Annahme einer homogenen Zweiphasenströmung.

Um die Ergebnisse, die bei den untersuchten Perforationsverhältnissen gewonnen wurden, bei anderen Werten des Perforationsverhältnisses anwenden zu können, wurden die Koeffizienten a und b der Gleichung (11.1) als Funktion des Perforationsverhältnisses  $R_p$  durch Beziehungen des Typs :

$$(11.2) \quad a = f_1 + f_2 R_p + f_3 R_p^2$$



$$(11.3) \quad b = g_1 + g_2 R_p + g_3 R_p^2$$

oder

$$(11.4) \quad a = f_1 + f_2 R_p + f_3 R_p^2$$

$$(11.5) \quad b = g_1 R_p^{g_2}$$

angenähert (s. Tab. 11.2 und Abbildungen 11.6, 11.7).

Um die Ergebnisse, bei anderen Werten des Luftvolumenanteils anwenden zu können, wurden auch in diesem Fall die Koeffizienten a und b durch Beziehungen des Typs :

$$(11.6) \quad a = c_1 + c_2 \alpha + c_3 \alpha^2$$

$$(11.7) \quad b = d_1 + d_2 \alpha + d_3 \alpha^2$$

angepaßt (s. Tab. 11.3 und Abbildungen 11.8, 11.9)

Andere Einzelheiten der Filmauswertung werden im Anhang A7.2 angegeben.

Ventil Nr.1			Reynolds-	Strouhal-							
$R_p$	Fluid - Niveau(mm)	$\alpha$	zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	zahl	y	a	b	$y_1$	$a_1$	$b_1$	
0.171	160.-300.	0.03	3.3 - 3.4	0.127-0.505	$D_s/D$	2.37	1.42	$R_s$	2.34	0.51	
					$D_j/D$	3.83	1.42	$R_j$	4.68	0.56	
		0.05		3.4 - 3.5	0.059-0.484	$D_s/D$	2.53	1.42	$R_s$	2.64	0.42
						$D_j/D$	4.40	1.38	$R_j$	4.70	0.25
		0.13		4.2 - 5.0	0.424-0.850	$D_s/D$	2.60	1.43	$R_s$	3.18	0.53
						$D_j/D$	4.57	1.41	$R_j$	4.77	0.26
		0.15		4.1 - 4.2	0.096-0.660	$D_s/D$	2.73	1.43	$R_s$	3.20	0.38
						$D_j/D$	5.03	1.53	$R_j$	5.03	0.27
		0.17		4.5 - 4.6	0.070-0.620	$D_s/D$	2.78	1.44	$R_s$	3.23	0.35
						$D_j/D$	5.09	1.54	$R_j$	5.10	0.26
		0.21		3.3 - 3.4	0.052-0.464	$D_s/D$	2.90	1.46	$R_s$	3.24	0.33
						$D_j/D$	5.11	1.56	$R_j$	5.12	0.26
0.0	-140.	0.07	3.2 - 3.3	0.275-0.578	$D_s/D$	4.89	1.47	$R_s$	4.98	0.29	
					$D_j/D$	4.72	1.28	$R_j$	7.09	0.21	
		0.09	3.3 - 3.4	0.283-0.582	$D_s/D$	4.91	1.47	$R_s$	4.98	0.29	
					$D_j/D$	4.68	1.26	$R_j$	7.10	0.21	

Tab. 11.1 - Koeffizienten für die Gleichung Nr. 11.1.

Ventil Nr.2			Reynolds-	Strouhal-						
$R_p$	Fluid - Niveau(mm)	$\alpha$	zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	zahl	y	a	b	$y_1$	$a_1$	$b_1$
0.12	150.-233.	0.04	4.2 - 4.3	0.140-0.868	$D_s/D$	5.41	1.23	$R_s$	7.27	0.19
					$D_j/D$	10.22	1.55	$R_j$	13.50	0.41
		0.06	3.3 - 3.9	0.389-0.689	$D_s/D$	5.97	1.37	$R_s$	6.76	0.19
					$D_j/D$	6.50	1.07	$R_j$	15.00	0.42
		0.12	6.2 - 6.3	0.402-1.309	$D_s/D$	7.00	1.38	$R_s$	8.72	0.12
					$D_j/D$	15.23	1.74	$R_j$	21.50	0.45
0.171	197.-235.	0.06	1.4 - 6.9	0.598-1.121	$D_s/D$	3.25	1.64	$R_s$	3.24	0.62
					$D_j/D$	5.93	1.59	$R_j$	4.77	0.32
		0.09	3.7 - 4.8	0.189-0.991	$D_s/D$	3.92	1.70	$R_s$	3.85	0.60
					$D_j/D$	6.06	1.58	$R_j$	5.28	0.38
		0.11	4.4 - 5.9	0.361-1.241	$D_s/D$	3.88	1.61	$R_s$	3.97	0.48
					$D_j/D$	6.50	1.36	$R_j$	4.70	0.34
		0.13	6.6 - 6.8	0.353-1.123	$D_s/D$	4.70	1.75	$R_s$	4.08	0.54
					$D_j/D$	7.05	1.64	$R_j$	8.85	0.30
0.0	-140.	0.02	2.4 - 2.5	0.101-0.370	$D_s/D$	-	-	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	9.05	1.65	$R_j$	-	-

Tab. 11.1 - Koeffizienten für die Gleichung Nr. 11.1 (Fortsetzung).

$R_p$	Fluid - Niveau(mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	y	a	b	$y_1$	$a_1$	$b_1$
0.171 (7Bohr.)	227.-268.	0.07	4.6 - 4.7	0.262-1.056	$D_s/D$	1.99	1.37	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	4.08	1.22	$R_j$	-	-
		0.09	3.3 - 3.5	0.194-0.665	$D_s/D$	2.04	1.39	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	4.10	1.24	$R_j$	-	-
		0.12	6.2 - 6.3	0.330-1.302	$D_s/D$	2.06	1.40	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	4.15	1.23	$R_j$	-	-
	0.0 -83.	0.05	4.6 - 4.7	0.271-0.931	$D_s/D$	2.10	1.41	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	4.31	1.30	$R_j$	-	-
0.250	155.-233.	0.04	5.3 - 5.4	0.020-0.702	$D_s/D$	2.36	1.52	$R_s$	2.94	0.64
					$D_j/D$	2.70	0.88	$R_j$	3.36	0.50
		0.05	5.1 - 5.2	0.137-0.601	$D_s/D$	2.74	1.29	$R_s$	3.50	0.58
					$D_j/D$	2.95	1.09	$R_j$	4.07	0.18
		0.06	5.2 - 5.9	0.545-0.825	$D_s/D$	2.80	1.30	$R_s$	3.51	0.54
					$D_j/D$	4.02	1.49	$R_j$	4.10	0.21
		0.13	6.7 - 7.7	0.566-1.736	$D_s/D$	3.82	1.64	$R_s$	3.67	0.50
					$D_j/D$	4.62	1.36	$R_j$	5.00	0.02
	0.0	0.02	5.4 - 5.5	0.160-0.601	$D_s/D$	3.82	1.64	$R_s$	3.67	0.50
					$D_j/D$	4.62	1.36	$R_j$	5.00	0.02

Tab. 11.1 - Koeffizienten für die Gleichung Nr. 11.1 (Fortsetzung).

Ventil Nr. 2

$R_p$	Fluid - Niveau(mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	y	a	b	$y_1$	$a_1$	$b_1$
0.120 (7Bohr.)	227.-233.	0.06	6.7 - 6.8	0.106-1.541	$D_s/D$	1.40	1.16	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	2.70	0.88	$R_j$	-	-
		0.07	3.0 - 4.3	0.136-0.626	$D_s/D$	1.80	1.30	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	2.95	1.09	$R_j$	-	-
		0.12	3.5 - 3.6	0.464-1.054	$D_s/D$	2.55	1.25	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	4.02	1.49	$R_j$	-	-

Tab. 11.1 - Koeffizienten für die Gleichung Nr. 11.1 (Fortsetzung).

Explosionsmutter

$R_p$	Fluid - Niveau(mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	y	a	b	$y_1$	$a_1$	$b_1$
0.171	227.-297.	0.03	10.0 - 11.1	0.085-0.470	$D_s/D$	2.92	1.43	$R_s$	5.64	0.47
					$D_j/D$	3.80	1.29	$R_j$	3.60	0.19
		0.08	12.0 - 19.0	0.212-1.272	$D_s/D$	3.78	1.56	$R_s$	4.93	0.49
					$D_j/D$	4.71	1.56	$R_j$	3.49	0.36
		0.16	23.0 - 24.1	0.552-1.861	$D_s/D$	4.05	1.70	$R_s$	4.33	0.48
					$D_j/D$	4.85	1.57	$R_j$	2.95	0.29
	100.	0.02	14.2 - 14.6	0.189-0.709	$D_s/D$	5.98	1.72	$R_s$	4.36	0.42
					$D_j/D$	6.02	1.61	$R_j$	3.00	0.28
	0.0	0.02	11.6	0.156-0.396	$D_s/D$	-	-	$R_s$	-	-
					$D_j/D$	6.21	1.62	$R_j$	3.12	0.29
0.171 (7Bohr.)	227.-233.	0.07	13.9 - 17.4	0.119-1.349	$D_s/D$	2.64	1.46	$R_s$	2.40	0.34
					$D_j/D$	4.34	1.33	$R_j$	4.45	0.24

Tab. 11.1 - Koeffizienten für die Gleichung Nr. 11.1 (Fortsetzung).

Explosionsmutter

$R_p$	Fluid - Niveau(mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	y	a	b	$y_1$	$a_1$	$b_1$
0.25	227.	0.03	13.5 - 13.6	0.130-0.637	$D_s/D$	2.63	1.27	$R_s$	3.02	0.30
					$D_j/D$	3.10	1.17	$R_j$	3.57	0.21
		0.08	13.3 - 17.4	0.263-1.001	$D_s/D$	2.78	1.27	$R_s$	2.74	0.37
					$D_j/D$	3.46	1.50	$R_j$	3.34	0.06
		0.14	21.6 - 21.7	0.247-0.969	$D_s/D$	3.08	1.63	$R_s$	2.56	0.47
					$D_j/D$	3.52	1.41	$R_j$	2.82	0.27
0.12	227.	0.03	11.3 - 11.4	0.216-0.422	$D_s/D$	4.93	1.78	$R_s$	6.52	0.29
					$D_j/D$	4.78	1.18	$R_j$	4.64	0.42
		0.08	15.0 - 18.1	0.408-1.228	$D_s/D$	5.75	1.87	$R_s$	5.79	0.37
					$D_j/D$	5.98	1.88	$R_j$	5.78	0.43
		0.14	22.1 - 22.2	0.216-1.456	$D_s/D$	6.44	1.43	$R_s$	4.37	0.31
					$D_j/D$	6.22	1.90	$R_j$	7.40	0.33

Tab. 11.1 - Koeffizienten für die Gleichung Nr. 11.1 (Fortsetzung).

## Ventil Nr. 2

$\alpha$	y	$f_1$	$f_2$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$
0.04	$D_s/D$	0.47	-1.12	1.40	-2.7	10.22
	$D_j/D$	0.21	-1.80	0.308	-0.775	
0.07	$D_s/D$	0.63	-1.01	-0.81	27.13	-74.70
	$D_j/D$	0.61	-1.34	0.74	-0.409	
0.13	$D_s/D$	1.18	-0.82	-0.88	26.99	-67.50
	$D_j/D$	0.46	-1.61	0.86	-0.338	21.50

## Explosionsmutter

$\alpha$	y	$f_1$	$f_2$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$
0.03	$D_s/D$	0.75	-0.84	1.36	-0.59	10.22
	$D_j/D$	0.66	-0.45	1.18	-0.016	
0.08	$D_s/D$	0.69	-0.98	1.24	-0.746	-74.70
	$D_j/D$	0.61	-0.53	1.05	-0.242	
0.16	$D_s/D$	0.74	-0.99	1.21	-0.78	-67.50
	$D_j/D$	1.15	-0.23	0.47	-0.66	21.50

Tab. 11.2 - Koeffizienten für die Gleichungen 11.2 - 11.5 .



Ventil Nr.1

$R_p$	y	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
0.171	$D_s/D$	1.75	0.167	-0.0068	1.43	-0.021	0.0013
	$D_j/D$	3.74	0.12	-0.003	1.42	-0.025	0.0019

Ventil Nr.2

$R_p$	y	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
0.12	$D_s/D$	3.40	0.51	-0.018	0.58	0.1825	-0.0093
	$D_j/D$	6.76	0.60	0.0036	1.94	-0.08	0.0052
0.171	$D_s/D$	1.96	0.245	-0.004	2.12	-0.1134	0.0065
	$D_j/D$	3.50	0.32	-0.0027	1.55	-0.0012	0.0003
0.25	$D_s/D$	1.57	0.21	-0.0028	2.32	-0.268	0.0166
	$D_j/D$	-0.1178	0.85	-0.0378	-0.055	0.29	-0.014

Tab. 11.3 - Koeffizienten für die Gleichungen 11.6, 11.7

Explosionmutter

$R_p$	$y$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
0.12	$D_s/D$	4.55	0.166	-0.003	2.65	-0.20	0.0103
	$D_j/D$	3.67	4.20	-0.016	0.68	0.21	-0.0086
0.171	$D_s/D$	2.33	0.24	-0.0085	2.07	-0.148	0.0079
	$D_j/D$	3.10	0.29	-0.0114	1.51	0.024	-0.0024
0.25	$D_s/D$	1.54	0.27	-0.011	1.89	-0.17	0.009
	$D_j/D$	2.76	0.126	-0.005	0.844	0.13	-0.006

Tab. 11.3 - Koeffizienten für die Gleichungen 11.6, 11.7 (Fortsetzung).

## 12.-Widerstandskoeffizienten der Tauchplatten

-----

Ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen ist die Bestimmung von Widerstandskoeffizienten bei instationärer Zweiphasenströmung durch perforierte Platten.

Der Widerstandskoeffizient ist definiert durch :

$$(12.1) \quad C = 2\Delta P / \rho v^2$$

wobei bedeuten :

$\Delta P$  = Druckverlust durch die Platte,

$\rho$  = Dichte des Fluids,

$v$  = Geschwindigkeit des Fluids.

In der Literatur findet man eine vollständig Beschreibung der stationären Einphasenströmung durch perforierte Platten oder durch andere Strömungshindernisse (z.B. in Idel'Chik /19/). Die experimentellen Kenntnisse der stationären Zweiphasenströmung durch Hindernisse sind fragmentarisch, und man kann nur einige Beziehungen für sehr kleine Bereiche der Druckverluste finden, wie in /20...30/ angegeben ist. Zur instationären Zweiphasenströmung findet man ebenfalls nicht viel Information. Erst in den letzten Jahren wurden Versuche in dieser Richtung durchgeführt, z.B. Weisman et al. /31/.

Zur Beschreibung des Problems wurde bis jetzt entweder auf theoretische Analysen /32/ zurückgegriffen oder Ergebnisse von instationären Einphasenströmungsversuchen (z.B. /34/,/35/) auf Zweiphasenströmung (s. Schmuck /36/) extrapoliert.

Die Widerstandskoeffizienten für instationäre Zweiphasenströmungen durch perforierte Platten wurden noch nicht untersucht und der Fall, daß eine bestimmte Mischungshöhe stromabwärts der Platte vorhanden ist, wurde ebenfalls noch nicht behandelt.

12.1-Berechnung der experimentell ermittelten Widerstands-

-----  
koeffizienten  
-----

Zur Erfassung der Kraftwirkung auf die Tauchplatte wurden zwei Meßmethoden verwendet. Zum einen wurde die Kraft auf die Tauchplatte direkt mit piezoelektrischen Meßelementen gemessen (s. Kap 7), zum anderen mit Hilfe einfacher Beziehungen aus der Druckdifferenz an der Tauchplatte berechnet.

Die Abb. 12.1 zeigt das Verhältnis  $F_d/S_e$  als Funktion des Druckverlustes an der Tauchplatte P6-P7, wobei  $S_e$  die effektive Tauchplattenoberfläche d.h. die Gesamtoberfläche der Tauchplatte minus der Fläche der Bohrung ist. Die gute Übereinstimmung zwischen  $F_d/S_e$  und P6-P7 zeigt, daß der Druck in erster Näherung gleichmäßig auf die Tauchplatte verteilt ist, und daß die Messung der Kraft auf die Tauchplatte gut mit der Druckdifferenzmessung übereinstimmt.

Der Widerstandskoeffizient bei instationärer Strömung kann nun über das Verhältnis

$$(12.2) \quad C_u = 2\Delta P / \rho v^2$$

oder

$$(12.3) \quad C_u = 2(F/S_e) / (\rho v^2)$$

bestimmt werden.

Die Abb. 12.2 zeigt als Beispiel bei einem Versuch mit Explosionsmutter die Kraft auf die Tauchplatte ( $F_d$ ) als Funktion des Quadrats der Kolbengeschwindigkeit. Die Pfeile deuten den zeitlichen Verlauf an.

Die Meßpunkte wurden je nach Beschleunigung mit verschiedenen Symbolen dargestellt, wobei die verschiedene Beschleunigungsbereiche in Tabelle bei der Abbildung angegeben sind.

Vom Versuchsbeginn, Punkt '0', bis zum Punkt '1' wird die Mischung im Stahlzylinder nur komprimiert. Währenddessen wird keine Kraft auf die Tauchplatte gemessen und man kann auch keine Bewegung des Strahls zu dieser Zeit beobachten.

Nach der Verdichtung der Mischung beginnt der Strahl durch die Tauchplatte zu strömen und die Kraft auf die Tauchplatte steigt bis zum Punkt '2' an. In weiteren Verlauf der Kurve bis zum Punkt '4' steigt der Druck an der Stelle P7 (s. Abb. 7.1) oberhalb der Tauchplatte ebenfalls an. Dabei nimmt die Kraft auf die Tauchplatte zunächst ab, um dann wieder bis zu einem Maximum anzusteigen. Gleichzeitig erreicht die Druckdifferenz  $\Delta P$  zwischen die Positionen P6 und P7 (s. Abb. 7.1) ein Maximum.

Am Ende der Transiente, nimmt die Kraft wieder ab und erreicht nach mehreren Schwingungen die Werte für den stationären Zustand. Die Beschleunigung wird gleich Null und die Strömung ist somit stationär.

In dem Bereich '1'-'3' bildet sich eine kritische Strömung aus.

Die Widerstandskoeffizienten werden nachfolgend für drei verschiedene Bereiche weiterbehandelt und zwar :

- Ein Bereich ('3'-'5' in Abb. 12.2 ) für die instationären Widerstandskoeffizienten im Abschnitt 12.2.
- Ein Bereich (ab '5' in Abb. 12.2) für die stationären Widerstandskoeffizienten in Abschnitten 12.3 und 12.5
- und ein Bereich (ab '1' -'3' in Abb. 12.2), wo die kritische Strömung die Druckverluste durch die Tauchplatte bestimmt, in Abschnitt 12.4 .

## 12.2 - Widerstandskoeffizient bei instationärer Zweiphasenströmung

-----

Im Kapitel 4 wird gezeigt, daß der Widerstandskoeffizient der Tauchplatte bei einer instationären Zweiphasenströmung eine Funktion der Strouhalzahl und der Beschleunigungszahl  $\Gamma$  sowie des Luftvolumenanteils  $\alpha$  ist, wenn man von der Kompressibilität der Mischung und der Kavitationszahl absieht. In Kapitel 11 wird außerdem gezeigt, daß keine Kraft auf die Tauchplatte ausgeübt wird bis zu dem Zeitpunkt, bei dem die Mischung unterhalb der Tauchplatte vollständig komprimiert ist. Der Luftvolumenanteil hat also nur einen Effekt auf die Anfangsbeschleunigung des Kolbens. Dieser Effekt kann durch eine entsprechende Änderung der Koeffizienten  $a'$  und  $b'$  in den in den Gleichungen (4.3) und (4.4) berücksichtigt werden, und  $C_u$  kann als Funktion von nur zwei Kennzahlen (z.B. Str und  $\Gamma$ ) beschrieben werden :

$$(12.4) \quad C_u = C_u(\text{Str}, \Gamma)$$

In Abb. 12.3 wird der Verlauf des Verhältnisses  $C_u/C_s$  als Beispiel des Versuches Nr. 104 ( $R_p = 0.12$ ,  $\alpha = 0.14$ , Explosionsmutter als Beschleunigungsvorrichtung) in einer 3-dimensionalen Darstellung gezeigt ( $C_s$  ist der Widerstandskoeffizient bei stationärer Strömung). Die X-Achse stellt die  $\Gamma$ -Zahl, die Y-Achse das Verhältnis  $C_u/C_s$  und die Z-Achse die Strouhalzahl dar. Die Pfeile zeigen die Richtung des zeitlichen Verlaufes an. Die Abb. 12.4 zeigt das Verhältnis  $C_u/C_s$  als Funktion der Zeit für den gleichen Versuch Nr. 104. Die Abb. 12.5 zeigt  $C_u/C_s$  als Funktion der Zeit für einen Einphasenströmungsversuch (Versuch Nr. 12). Beide Darstellungen erlauben einen interessanten Vergleich mit theoretischen  $C_u$ -Werten.

Smolderen et al. /37,38/ haben die Navier-Stokes-Gleichungen für die instationäre Einphasenströmung durch eine Reihe von unendlich ausgedehnten Schlitzten in dünnen Platten ohne freie Oberfläche oberhalb der Platten numerisch integriert. Die dabei gewonnenen

Widerstandskoeffizienten erreichen zuerst ein Maximum und fallen anschließend wieder ab, um sich dann dem stationären Wert asymptotisch zu nähern. Diesen Verlauf kann man qualitativ erklären. Das anfängliche Maximum wird durch den Anfahrwirbel verursacht und ist größer als der stationäre Wert, wenn die Strouhalzahl einen kritischen Wert überschreitet. Während der Anfahrwirbel von der Strömung stromabwärts transportiert wird, sinkt der Widerstandskoeffizient ab. In Abb. 12.6 ist der zeitliche Verlauf der Energie des Anfahrwirbels gezeigt. Gleichzeitig aber nimmt die Strömungseinschnürung zu, wie Abb. 12.7 zeigt, in welcher der Verlauf der Strömungseinschnürung dargestellt ist. Die Überlagerung beider Effekte führt zu einem kurzfristigen Absinken des Widerstandskoeffizienten. Danach nähert er sich asymptotisch dem stationären Wert. Der Verlauf des Verhältnisses  $C_u/C_s$  über der Zeit ist in Abb. 12.8 dargestellt. Ein Vergleich zwischen Abb. 12.5 (experimentelle Werte bei Einphasenströmung) und Abb. 12.8 (theoretische Werte bei Einphasenströmung) zeigt, daß der Verlauf von  $C_u/C_s$  über der Zeit trotz der beträchtlichen Unterschiede (ohne und mit freier Oberfläche, verschiedene Geometrie der Plattenöffnungen) qualitativ ähnlich ist. In den hier beschriebenen Versuchen mit Zweiphasenströmung (Abb. 12.4) wird qualitativ auch das gleiche Ergebnis erreicht. Allerdings gibt es bei der Zweiphasenströmung mehrere Schwingungen. Diese kommen wahrscheinlich durch Kompressibilitätseffekte in der Zweiphasenströmung zustande.

In Abb. 12.9 ist das Verhältnis  $C_u/C_s$  als Funktion der  $\Gamma$ -Zahl dargestellt, wobei Pfeile den zeitlichen Verlauf verdeutlichen. Wie schon erwähnt, wird die Mischung am Anfang eines Versuches komprimiert und das Verhältnis  $C_u/C_s$  bleibt gleich Null. Danach strömt die Mischung durch die Tauchplatte und der Wert  $C_u/C_s$  steigt bis zum Maximalwert im Punkt 4, der dem Punkt 4 in Abb. 12.4 entspricht. Nach Erreichen dieses Maximums sinkt das Verhältnis  $C_u/C_s$  wieder ab und oszilliert um dem Wert  $C_u/C_s$  gleich 1. Aus Abb. 12.9 ist ersichtlich, daß man

für  $\Gamma < 0$  zwei Zeitbereiche unterscheiden muß :

Einen Bereich für Strouhalzahlen zwischen Null (Punkt 1 in Abb. 12.9) und einer ersten kritischen Strouhalzahl  $Str_{m1}$  (Punkt 3' in Abb. 12.9),  
und einen Bereich zwischen  $Str_{m1}$  und einer zweiten kritischen Strouhalzahl  $Str_{m2}$  (Punkt 5 in Abb. 12.9), wo die instationären Widerstandskoeffizienten um den stationären Wert  $C_s$  oszillieren.

Hierbei bedeuten :

$$(12.5) \quad Str_{m1} = v_{\max} t_{m1} / D$$

$$(12.6) \quad Str_{m2} = v_{\max} t_{m2} / D$$

mit

$v_{\max}$  = maximale Kolbengeschwindigkeit,

$D$  = äquivalenter Rohrdurchmesser, der zur einer Öffnung der Tauchplatte gehört,

$t_{m1}$  = Zeit, bei der die Beschleunigungszahl  $\Gamma$  das Maximum (negativ oder positiv) erreicht,

$t_{m2}$  = Zeit, bei der der instationäre Widerstandskoeffizient um den stationären Wert oszilliert.

Die hier gewonnenen experimentellen Ergebnisse wurden durch parabolische Gesetze vom Typ :

$$(12.7) \quad C_u / C_s = \chi_1 + \chi_2 \Gamma + \chi_3 \Gamma^2$$

angenähert.

Die Tabellen 12.1 und 12.2 zeigen die Werte der drei Koeffizienten



der Gleichung (12.7), sowie die Werte der Kritischen Strouhalzahlen  $Str_{m1}$  und  $Str_{m2}$ .

12.3- Widerstandskoeffizienten bei stationärer Strömung und

-----  
Kontraktionskoeffizienten der Strahlen an den Tauchplatten  
-----

Die theoretische Herleitung des Widerstandskoeffizienten aus der Impulsgleichung liefert bei einer stationären Strömung in Abhängigkeit von der Strahlausbreitung stromabwärts der Blende die folgenden Zusammenhänge für einen kontrahierten Strahl /2/:

$$(12.8) \quad C_{sf} = (1/(R_p^2 C_c^2)) - 1$$

oder für einen sich ausbreitenden Strahl :

$$(12.9) \quad C_{se} = 1/(R_p C_c - 1)^2$$

Hierbei bedeuten :

$R_p$  = Perforationsverhältnis der Platte, bezogen auf den Rohrquerschnitt,

$C_c$  = Kontraktionsverhältnis des Strahls im engsten Querschnitt bezogen auf den Bohrungquerschnitt (Kontraktionskoeffizient).

Wie im vorherigen Abschnitt 12.2 schon erwähnt, erreicht man am Ende der Versuche einen stationären Zustand. Durch Verwendung von Gleichung (12.1) kann man dann die Widerstandskoeffizienten der Tauchplatte für die stationäre Strömung berechnen. Mit Hilfe der Gleichungen (12.8) und (12.9) wurden die Kontraktionskoeff-

fizienten ermittelt. Abb. 12.10 zeigt die mit der Gleichung (12.8) ermittelten Kontraktionskoeffizienten als Funktion der Perforationsverhältnisse der Tauchplatte. In der Abbildung ist die Korrelation von Chisholm für eine inkompressible stationäre Zweiphasenströmung /21/ zusätzlich dargestellt. Die Werte von Chisholm sind für größere Perforationsverhältnisse ( $0.3 < R_p < 0.7$ ) gültig. Im Vergleich mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit sind die Chisholm-werte nur geringfügig kleiner. In Abb. 12.10 sind die Werte von Idel'chik für stationäre Einphasenströmung /19/ ebenfalls eingezeichnet. Die Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit ist gut. Es zeigt sich also, daß sich die Strahlen aus der Tauchplatte wie kontrahierte Strahlen verhalten. Dies wurde ebenfalls bei der Beobachtung der Strömung mit der Hochgeschwindigkeitskamera festgestellt. Auch bei den Versuchen mit einer instationären einphasigen Strömung waren die Strahlen bei hohen Reynoldszahlen kontrahiert /1,2/. Die Verwendung von Gleichung (12.9) ( sich ausbreitender Strahl ) würde zu hohe Kontraktionskoeffizienten liefern.

Die hier gewonnenen Kontraktionskoeffizienten bei stationärer Strömung werden durch die folgende Beziehung als Funktion des Perforationsverhältnisses korreliert :

$$(12.10) \quad C_c = 0.596 + 0.237 R_p - 0.143 R_p^2$$

#### 12.4- Kritische Strömung

-----

In der Anfangsphase eines Versuches, z.B. zwischen den Punkten '1' und '3' in den Abbildungen 12.2, und 12.4, ist die Strahlgeschwindigkeit

$$(12.11) \quad v_j = v / (R_p C_c)$$

mit

$v$  = Fluidgeschwindigkeit unterhalb der Tauchplatte,

$R_p$  = Perforationsverhältnis der Tauchplatte,

$C_c$  = Kontraktionskoeffizient des Strahls  
(s. Abschnitt 12.3),

gleich der Schallgeschwindigkeit  $v_c$  ( $Ma=1$ ) der Mischung oberhalb der Tauchplatte . Die Schallgeschwindigkeit der Mischung wurde mit einer Beziehung aus /39/ bestimmt.

Nach einer kurzer Zeit aber steigt der Druck oberhalb der Tauchplatte an und bei diesen Bedingungen erreicht der Strahl nicht mehr die lokale Schallgeschwindigkeit der Mischung .

Die Abb. 12.11 zeigt die Druckdifferenz  $\Delta P$  ( $P_6-P_7$ ) über der Tauchplatte als Funktion der Strahlgeschwindigkeit für die Anfangsphase von verschiedenen Versuchen. Die Abbildung zeigt ebenfalls eine Kurve, die die Beziehung zwischen der Druckdifferenz bei der kritischen Strömung und der Schallgeschwindigkeit darstellt. Es ist ersichtlich, daß die Meßpunkte gut von dieser Kurve wiedergegeben werden.

#### 12.5- Multiplikationsfaktoren für die stationären Druckverluste

-----

In Abb. 12.12 ist das Verhältnis  $M_f = \Delta P_{tp} / \Delta P_{op}$  als Funktion des Luftvolumenanteils dargestellt. Hierbei bedeuten :

$\Delta P_{tp}$  = Druckverlust für die stationäre Zweiphasenströmung

$\Delta P_{op}$  = Druckverlust für die stationäre Einphasenströmung.

Die dargestellten Werte wurden für Drücke unterhalb der Tauchplatte (P6) bei 60 und 80 bar bestimmt.

Die vorgeschlagene Korrelation lautet :

$$(12.12) \quad M_f = \Delta P_{tp} / \Delta P_{op} = 1 + 0.012(100\alpha)^{1.22}$$

In Abb. 12.12 werden auch die experimentellen Ergebnisse von Weisman et al /23/ und die theoretische Korrelation für eine homogene Strömung /23/ ebenfalls gezeigt. Man sieht, daß die Meßwerte dieser Versuche nicht viel von der theoretischen Korrelation für die homogene Strömung abweichen.

Das bestätigt, daß die Annahme " homogene Strömung " von Kap. 4 gültig ist.

Ventil Nr.1

$R_p$	Fluid- Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	Kavitations- zahl	$\Gamma$ Bereich	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$C_s$
0.171	160.-300.	0.03	3.3 - 3.4	0.0 - 0.127	0.24 - 0.28	0.000< $\Gamma$ <0.0600	-	-100.	-0.0024.	78
		0.05	3.4 - 3.5	0.0 - 0.059	0.25 - 0.26	0.007< $\Gamma$ <0.0120	7.03	1171.	48800.	76
		0.13	4.2 - 5.0	0.0 - 0.424	0.12 - 0.17	-0.014< $\Gamma$ <0.0000	-	112.	15100.	73
		0.15	4.1 - 4.2	0.0 - 0.096	0.17 - 0.18	-0.020< $\Gamma$ <0.0000	-	108.	9800.	76
		0.17	4.5 - 4.6	0.0 - 0.070	0.15 - 0.16	-0.021< $\Gamma$ <0.0000	-	121.	8748.	76
		0.21	3.3 - 3.4	0.0 - 0.052	0.11 - 0.12	-0.021< $\Gamma$ <0.0000	-	129.	8750.	75
0.0	-140.	0.07	3.2 - 3.3	0.0 - 0.275	0.10 - 0.11	-0.021< $\Gamma$ <0.0000	-	- 25.	18750.	68
		0.09	3.3 - 3.4	0.0 - 0.283	0.27 - 0.28	0.000< $\Gamma$ <0.0065	3.40	677.	33888.	74

Tab. 12.1 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte.

Ventil Nr.2

$R_p$	Fluid - Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	Kavitations- zahl	$\Gamma$ Bereich	$\zeta_1$	$\zeta_2$ (*10 <sup>3</sup> )	$\zeta_3$	$C_s$
0.12	150.-233.	0.04	4.2 - 4.3	0.0 - 0.140	0.08-0.09	-0.040< $\Gamma$ <0.0	-	200.	200.0	143
		0.06	3.3 - 3.9	0.0 - 0.389	0.10-0.24	-0.008< $\Gamma$ <0.0	-	561.	105.0	"
		0.12	6.2 - 6.3	0.0 - 0.402	0.03-0.04	-0.018< $\Gamma$ <0.0	-	54.	7.3	"
0.171	197.-235.	0.06	1.4 - 6.9	0.0 - 0.598	0.09-0.21	-0.012< $\Gamma$ <0.0	-	296.	40.1	76
		0.09	3.7 - 4.8	0.0 - 0.189	0.07-0.15	-0.010< $\Gamma$ <0.0	-	126.	33.6	"
		0.11	4.4 - 5.9	0.0 - 0.361	0.09-0.16	-0.014< $\Gamma$ <0.0	-	1260.	106.4	"
		0.13	6.6 - 6.8	0.0 - 0.353	0.06-0.07	-0.025< $\Gamma$ <0.0	-	217.	112.4	"
0.0	-140.	0.02	2.4 - 2.5	0.0 - 0.101	0.27-0.28	-0.026< $\Gamma$ <0.0	-	220.	8.1	"

Tab. 12.1 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte (Fortsetzung).

## Ventil Nr.2

$R_p$	Fluid - Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	Kavitations- zahl	$\Gamma$ Bereich	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$C_s$
0.171 (7 Bohr)	227.-268.	0.07	4.6 - 4.7	0.0 - 0.262	0.20-0.21	-.160< $\Gamma$ <0.00	-	18.	5.8	78
		0.09	3.3 - 3.5	0.0 - 0.194	0.28-0.29	-.007< $\Gamma$ <0.00	-	333.	133.0	78
		0.12	6.2 - 6.3	0.0 - 0.330	0.07-0.08	-.200< $\Gamma$ <0.00	-	368.	24.6	81
	0.0 - 83.	0.05	4.6 - 4.7	0.0 - 0.271	0.14-0.15	-.170< $\Gamma$ <0.00	-	14.	5.4	77
0.250	155.-233.	0.04	5.3 - 5.4	0.0 - 0.020	0.13-0.14	.002< $\Gamma$ <0.01	1.25	318.	19531	41
		0.05	5.1 - 5.2	0.0 - 0.137	0.24-0.25	-.008< $\Gamma$ <0.00	-	-968.	-176.0	"
		0.06	5.2 - 5.9	0.0 - 0.545	0.13-0.14	-.008< $\Gamma$ <0.00	-	400.	92.0	"
		0.13	6.7 - 7.7	0.0 - 0.566	0.11-0.14	0.0< $\Gamma$ <0.024	-	10.	1.8	"
	0.0	0.02	5.4 - 5.5	0.0 - 0.160	0.24-0.25	.016< $\Gamma$ <0.025	-	25.	0.9	"
0.120 (7Bohr.)	227.-233.	0.06	6.7 - 6.8	0.0 - 0.106	0.23-0.24	-.01< $\Gamma$ <0.0	-	-152.	-2.2	181
		0.07	3.0 - 4.3	0.0 - 0.136	0.08-0.16	-.007< $\Gamma$ <0.0	-	710.	-66.0	"
		0.12	3.5 - 3.6	0.0 - 0.464	0.27-0.28	-.007< $\Gamma$ <0.0	-	3.	48.8	"

Tab. 12.1 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte (Fortsetzung).

Explosion Mutter

$R_p$	Fluid - Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds-zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal-zahl	Kavitations-zahl	$\Gamma$ Bereich	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$C_s$
0.171	227.-297.	0.03	10.0 - 11.1	0.0 - 0.085	0.024-0.025	-.030< $\Gamma$ <0.0	-	-24.	364.	90
		0.08	12.0 - 19.0	0.0 - 0.212	0.008-0.019	-.044< $\Gamma$ <0.0	-	- 9.5	260.	
		0.16	23.0 - 24.1	0.0 - 0.552	0.004-0.005	-.048< $\Gamma$ <0.0	-	-11.	81.	
	100.	0.02	14.2 - 14.6	0.0 - 0.189	0.014-0.015	-.015< $\Gamma$ <0.0	-	22.	322.	90
	0.0	0.02	11.6	0.0 - 0.156	0.023	-.016< $\Gamma$ <0.0	-	19.	280.	90
0.171	227.-233. (7Bohr.)	0.07	13.9 - 17.4	0.0 - 0.119	0.010-0.016	-.015< $\Gamma$ <0.0	-	-10.	1000.	86
0.25	227.	0.03	13.5 - 13.6	0.0 - 0.130	0.035-0.036	-.06< $\Gamma$ <0.0	-	50.	1600.	47
		0.08	13.3 - 17.4	0.0 - 0.263	0.022-0.037	-.06< $\Gamma$ <0.0	-	46.	1402.	"
		0.14	21.6 - 21.7	0.0 - 0.247	0.013-0.014	-.06< $\Gamma$ <0.0	-	38.	892.	"
0.12	227.	0.03	11.3 - 11.4	0.0 - 0.216	0.011-0.012	-.08< $\Gamma$ <0.0	-	-6.	1233.	178
		0.08	15.0 - 18.1	0.0 - 0.408	0.005-0.007	-.08< $\Gamma$ <0.0	-	-13.1	800.	"
		0.14	22.1 - 22.2	0.0 - 0.216	0.003-0.004	-.08< $\Gamma$ <0.0	-	-8.9	303.	"

Tab. 12.1 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte (Fortsetzung).



Ventil Nr.1

$R_p$	Fluid- Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal- zahl	Kavitations- zahl	$\Gamma$ Bereich	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$C_s$
0.171	160.-300.	0.03	3.3 - 3.4	0.127-0.505	0.24 - 0.28	0.000< $\Gamma$ <0.06	1.	24.	212.	78
		0.05	3.4 - 3.5	0.059-0.484	0.25 - 0.26	0.000< $\Gamma$ <0.007	1.	19.	237.	76
		0.13	4.2 - 5.0	0.424-0.850	0.12 - 0.17	-0.014< $\Gamma$ <0.0	1.	-	4166.	73
		0.15	4.1 - 4.2	0.096-0.660	0.17 - 0.18	-0.020< $\Gamma$ <0.00	1.	79.	9700.	76
		0.17	4.5 - 4.6	0.070-0.620	0.15 - 0.16	-0.021< $\Gamma$ <0.00	1.	85.	6100.	76
		0.21	3.3 - 3.4	0.052-0.464	0.11 - 0.12	-0.021< $\Gamma$ <0.21	1.	89.	7450.	75
0.0	-140.	0.07	3.2 - 3.3	0.275-0.578	0.10 - 0.11	0.000< $\Gamma$ <0.04	1.	150.	37500.	68
		0.09	3.3 - 3.4	0.283-0.582	0.27 - 0.28	0.000< $\Gamma$ <0.07	1.	220.	13764.	74

Tab. 12.2 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte.

## Ventil Nr.2

$R_p$	Fluid- Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds- zahl-max (* $10^5$ )	Strouhal- zahl	Kavitations- zahl	$\Gamma$ Bereich	$\zeta_1$	$\zeta_2$ (* $10^3$ )	$\zeta_3$	$C_s$
0.12	150.-233.	0.04	4.2 - 4.3	0.140-0.868	0.08-0.09	-0.007< $\Gamma$ <0.00	1.	31.	2.4	143
		0.06	3.3 - 3.9	0.389-0.689	0.10-0.24	-0.008< $\Gamma$ <0.00	1.	-200.	25.0	"
		0.12	6.2 - 6.3	0.402-1.309	0.03-0.04	-0.018< $\Gamma$ <0.00	1.	-104.	5.8	"
0.171	197.-235.	0.06	1.4 - 6.9	0.598-1.121	0.09-0.21	-0.012< $\Gamma$ <0.00	1.	-225.	141.1	76
		0.09	3.7 - 4.8	0.189-0.991	0.07-0.15	-0.010< $\Gamma$ <0.00	1.	-50.	5.0	"
		0.11	4.4 - 5.9	0.361-1.241	0.09-0.16	-0.014< $\Gamma$ <0.00	1.	-40.	4.0	"
		0.13	6.6 - 6.8	0.353-1.123	0.06-0.07	-0.025< $\Gamma$ <0.00	1.	-12.	0.4	"
0.0	-140.	0.02	2.4 - 2.5	0.101-0.370	0.27-0.28	-0.026< $\Gamma$ <0.00	1.	-14	1.0	"

Tab. 12.2 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte(Fortsetzung).

## Ventil Nr.2

$R_p$	Fluid-Niveau (mm)	$\alpha$	Reynolds-zahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhal-zahl	Kavitations-zahl	$\Gamma$ Bereich	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$C_s$
0.171 (7 Bohr)	227.-268.	0.07	4.6 - 4.7	0.262-1.056	0.20-0.21	-0.016< $\Gamma$ <0.00	1.	-	519.	78
		0.09	3.3 - 3.5	0.194-0.665	0.28-0.29	-0.007< $\Gamma$ <0.00	1.	-	50000.	78
		0.12	6.2 - 6.3	0.330-1.302	0.07-0.08	-0.200< $\Gamma$ <0.00	1.	-	2037.	81
0.0	-83.	0.05	4.6 - 4.7	0.271-0.931	0.14-0.15	-0.170< $\Gamma$ <0.00	1.	-	412.	77
0.250	155.-233.	0.04	5.3 - 5.4	0.020-0.702	0.13-0.14	0.000< $\Gamma$ <0.02	1.	-	62500.	41
		0.05	5.1 - 5.2	0.137-0.601	0.24-0.25	-0.008< $\Gamma$ <0.00	-	90.	22500.	"
		0.06	5.2 - 5.9	0.545-0.825	0.13-0.14	-0.008< $\Gamma$ <0.00	-	-60.	7500.	"
		0.13	6.7 - 7.7	0.566-1.736	0.11-0.14	-0.024< $\Gamma$ <0.00	-	-150.	61480.	"
		0.0	0.02	5.4 - 5.5	0.160-0.601	0.24-0.25	0.000< $\Gamma$ <.016	-	-27.	7900.
0.120 (7Bohr.)	227.-233.	0.06	6.7 - 6.8	0.106-1.541	0.23-0.24	-0.001< $\Gamma$ <0.00	-1.6	62.-	13000.	181
		0.07	3.0 - 4.3	0.136-0.626	0.08-0.16	-0.007< $\Gamma$ <0.00	1.0	77.-	14800.	"
		0.12	3.5 - 3.6	0.464-1.054	0.27-0.28	-0.007< $\Gamma$ <0.00	1.0	80.-	16000.	"

Tab. 12.2 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte (Fortsetzung).

Explosionsmutter

$R_p$	Fluid-Niveau (mm)	$\alpha$	Reynoldszahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhalzahl	Kavitationszahl	$\Gamma$ Bereich	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$C_s$
0.171	227.-297.	0.03	10.0 - 11.1	0.085-0.470	0.024-0.025	-0.030< $\Gamma$ <0.00	1.	-25.	1.25	90
		0.08	12.0 - 19.0	0.212-1.272	0.008-0.019	-0.044< $\Gamma$ <0.00	1.	-84.	1.75	"
		0.16	23.0 - 24.1	0.552-1.861	0.004-0.005	-0.048< $\Gamma$ <0.00	1.	-	0.30	"
	100.	0.02	14.2 - 14.6	0.189-0.709	0.014-0.015	-0.015< $\Gamma$ <0.00	1.	-200.	10.00	90
	0.0	0.02	11.6	0.156-0.396	0.023	-0.016< $\Gamma$ <0.00	1.	-155.	7.88	90
0.171 (7Bohr.)	227.-233.	0.07	13.9 - 17.4	0.119-1.349	0.010-0.016	-0.015< $\Gamma$ <0.00	1.1	-43.	1527.	86
$R_p$	Fluid-Niveau (mm)	$\alpha$	Reynoldszahl-max (*10 <sup>5</sup> )	Strouhalzahl	Kavitationszahl	$\Gamma$ Bereich	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$C_s$
0.25	227.	0.03	13.5 - 13.6	0.130-0.637	0.035-0.036	-0.06< $\Gamma$ <0.00	1.	59.	-200.	47
		0.08	13.3 - 17.4	0.263-1.001	0.022-0.037	-0.06< $\Gamma$ <0.00	1.	56.	-112.	"
		0.14	21.6 - 21.7	0.247-0.969	0.013-0.014	-0.06< $\Gamma$ <0.00	1.	48.	-154.	"
0.12	227.	0.03	11.3 - 11.4	0.216-0.422	0.011-0.012	-0.08< $\Gamma$ <0.00	1.	-7.	0.127	178
		0.08	15.0 - 18.1	0.408-1.228	0.005-0.007	-0.08< $\Gamma$ <0.00	1.	-21.1	0.525	"
		0.14	22.1 - 22.2	0.216-1.456	0.003-0.004	-0.08< $\Gamma$ <0.00	1.	-11.1	277.0	"

Tab. 12.2 - Widerstandskoeffizienten bei stationärer und instationärer Strömung durch die Tauchplatte (Fortsetzung).

### 13.- Strömungsverhalten oberhalb der Tauchplatte

-----

Wie bei den Versuchen mit einer instationären einphasigen Strömung durch perforierte Platten /2/ bilden sich bei den Zweiphasenströmungsversuchen Hochgeschwindigkeitsstrahlen oberhalb der Tauchplatte. Dabei entsteht in diesem Raum eine starke Kavitation, die das Strömungsverhalten oberhalb der Tauchplatte maßgebend bestimmt. In den folgenden Abschnitten werden deshalb zuerst die Kavitation und dann die Kräfte auf die oberen Strukturen behandelt.

#### 13.1- Kavitation

-----

Bei der Filmauswertung der Versuche stellt man fest, daß sich oberhalb der Tauchplatte aufgrund der hohen Strahlgeschwindigkeiten Kavitation bildet. Durch einen Vergleich zwischen der Bewegung des Kolbens und der Mischungsoberfläche kann man das Kavitationsvolumen ( $V_c$ ) bestimmen. Dieses wird für die maximale Bewegung der Mischungsoberfläche, bevor der Strahl die Mischungsoberfläche durchbricht, bestimmt :

$$(13.1) \quad V_c = 1 - (h + D_p) / (h + D_s)$$

Hierbei bedeuten :

$h$  = Höhe der Mischung oberhalb der Tauchplatte

$D_p$  = Bewegung des Kolbens

$D_s$  = Bewegung der Oberfläche.

Die Bewegung der Oberfläche und des Kolbens werden von dem Zeitpunkt an berechnet, in dem die Oberfläche die erste Bewegung macht,

also von dem Zeitpunkt, in dem das Zweiphasengemisch unterhalb der Tauchplatte völlig komprimiert ist.

Das Kavitationsvolumen wird als Funktion der Kavitationszahl (s. Kap. 4, Gl.(4.11)) in Abb. 13.1 dargestellt. Dabei wird die Kavitationszahl ebenfalls in dem Zeitpunkt der maximalen Bewegung der Mischungsoberfläche bestimmt. Die vorgeschlagene Anpassung ist :

$$(13.2) \quad V_c = 0.44 - 0.57 K_c$$

Es bildet sich also kein Kavitationsvolumen oberhalb der Tauchplatte für  $K_c$  größer als 0.77.

Die Anpassung für die Versuche mit Einphasenströmung der vorliegenden Arbeit wird in derselben Abbildung dargestellt :

$$(13.3) \quad V_c = 0.38 - 0.59 K_c$$

Diese Beziehung ist in guter Übereinstimmung mit der, die bei früheren Versuchen mit instationärer einphasiger Strömung gewonnen wurde/2/. Der Unterschied zwischen den beiden Beziehungen (13.2) und (13.3) ist nicht groß.

Die Randbedingungen, bei denen sich Kavitation in der Wasser-Luft Mischung bildet, können auch für das flüssige Natrium-Natriumdampf-Gemisch verwendet werden /40,41,42,43,44,45/.

### 13.2- Kräfte auf die obere Platte(Reaktordeckel)

-----

Der Maximalwert der Kraft, die auf den Reaktordeckel wirkt, und das Zeitintegral dieser Kraft (Impuls) sind zwei wichtige Parameter bei der Analyse der Widerstandsfähigkeit der oberen Strukturen des Reaktors

während eines hypothetischen Störfalls.

Es ist von Interesse, den Impuls auf die obere Platte mit demjenigen auf die Tauchplatte zu vergleichen. Dies ist notwendig, um die Verteilung der Belastung auf diese Reaktorelemente zu analysieren und Daten für die Auslegung solcher Strukturen zu gewinnen.

Die Impulse auf die obere Platte werden in Diagrammen über der Kavitationszahl aufgetragen, welche die maßgebende Größe für die Erklärung der Phänomene oberhalb der Tauchplatte ist.

In Abb. 13.2 ist das Verhältnis der Gesamtimpulse an den Platten  $I_{mu}/I_{md}$  ( $u$  = obere Platte,  $d$  = Tauchplatte) für die Versuche mit hohen Mischungsniveaus ( $160 \text{ mm} \leq h \leq 300 \text{ mm}$ ) als Funktion der Kavitationszahl dargestellt. Bei diesen Versuchen ergibt sich eine starke Verwirbelung des Fluids oberhalb der Tauchplatte. Bei den Versuchen mit einer Bohrung ist das Verhältnis  $I_{mu}/I_{md}$  stark vom Perforationsverhältnis abhängig. Und zwar ist es um so größer, je größer das Perforationsverhältnis ist.

Bei konstantem Perforationsverhältnis wird dieses Verhältnis um so kleiner, je größer die Kavitationszahl ist.

Bei den Versuchen mit sieben Bohrungen (Perforationsverhältnisse 0.12 und 0.17) ist das Verhältnis  $I_{mu}/I_{md}$  viel kleiner. Die Erklärung dafür liegt in der besseren Verwirbelung, die bei Platten mit mehreren Bohrungen stattfindet.

In Abb. 13.3 wird das Verhältnis  $I_{mu}/I_{md}$  als Funktion der Kavitationszahl für die Versuche mit niedrigem Mischungsniveau ( $0 \leq h \leq 150 \text{ mm}$ ) dargestellt. In diesen Versuchen bildet sich ein schneller Freistrahle ohne Verwirbelung aus, der einen höheren Impuls auf die obere Platte überträgt. Das Verhältnis  $I_{mu}/I_{md}$  bleibt für jedes Perforationsverhältnis unabhängig von der Kavitationszahl konstant. Die hier gewonnenen Werte für  $I_{mu}/I_{md}$  einer instationären Zweiphasenströmung haben einen ähnlichen Verlauf wie die früheren für eine instationäre Einphasenströmung gewon-

nenen Werte /1,2/. Die Erklärung dafür ist, daß sich auch bei den Versuchen von /1,2/ eine starke Kavitation oberhalb der Tauchplatte gebildet hatte. Die Korrelationen für die verschiedenen Perforationsverhältnisse und Mischungsniveaus sowie für die verschiedene Anzahl der Bohrungen sind in Tab. 13.1 eingetragen. Weitere Informationen über die Kräfteverhältnisse findet man im Anhang A6.

### 13.3- Zeitverzögerung der Kräfte

-----

Bei der Analyse der Belastung der oberen Reaktorstrukturen ist es notwendig, nicht nur die Kräfte und die Gesamtimpulse zu kennen, sondern ein wichtiger Parameter ist dabei auch die zeitliche Verzögerung der Kraftwirkung auf die obere Platte, d.h. auf den Reaktordeckel.

In Abb. 13.4 werden die zeitlichen Verzögerungen der Kräfte auf die obere Platte als Funktion des höchsten Druckes im Zylinder (P6) dargestellt. Die Zeitverzögerung ( $t_d$ ) wird so definiert :

$$(13.4) \quad t_d = t_{iu} - t_{id}$$

mit :

$t_{iu}$  = Anfang der Belastung auf die obere Platte

$t_{id}$  = Anfang der Belastung auf die Tauchplatte.

Aus der Abbildung sieht man, daß die Verzögerung  $t_d$  umso kleiner ist, je größer der Druck ist. Die Punkte, bei denen sich eine Verzögerung größer als 60 ms ergibt, entsprechen den Ventil-



versuchen. Alle anderen Versuche sind mit der Explosionsmutter durchgeführt worden.

Bei den Versuchen mit Einphasenströmung /1,2/ ist der Unterschied zwischen den Experimenten mit niedrigem Fluidniveau und denen mit hohem Fluidniveau größer als bei den Versuchen mit Zweiphasenströmung. Der Grund ist folgender. Oberhalb der Tauchplatte gibt es bei den Zweiphasenströmungsversuchen nicht nur Wasser, sondern eine Mischung aus Wasser und Luft, deshalb kann sich der Strahl auch beim hohen Fluidniveau oberhalb der Tauchplatte schneller bewegen, und die Verzögerung wird kleiner.

Das Perforationsverhältnis spielt keine Rolle. Das ergibt sich, weil die Kolbengeschwindigkeiten, aber auch die Strahlquerschnitte, bei konstantem Druck mit dem Perforationsverhältnis wachsen, so daß sich ungefähr die gleiche Strahlgeschwindigkeit und deswegen die gleiche Verzögerung der Kraft auf die obere Platte ergibt.

Der Luftvolumenanteil spielt ebenfalls keine Rolle, weil das Entstehen der Strahlen stattfindet, wenn die Mischung oberhalb der Tauchplatte schon völlig komprimiert ist.

Die Meßpunkte können durch folgende Näherungsfunktion :

$$(13.5) \quad t_d(s) = 0.585 (P_6 \text{ (bar)})^{-0.61}$$

beschrieben werden.

In Abb. 13.5 ist die Zeitverzögerung  $t_d$  als Funktion der Wert  $1/K_c$  dargestellt, wobei  $K_c$  ist der Kavitationszahl.

Die Meßpunkte können durch die Näherungsfunktion :

$$(13.6) \quad t_d(s) = 0.35 K_c^{0.569}$$

beschrieben werden.

In Abb. 13.6 ist die dimensionslose Zeitverzögerung (Zeitverzögerungs-Strouhalzahl) :

$$(13.7) \quad \text{Str}_d = (t_d v_{\max})/D$$

als Funktion der Kavitationszahl  $K_c$  dargestellt, wobei  $v_{\max}$  der maximalen Fluidgeschwindigkeit unterhalb der Tauchplatte entspricht.

Die Meßpunkte können durch die Näherungsfunktion :

$$(13.8) \quad 1/\text{Str}_d = 0.146 K_c^{-0.122}$$

beschrieben werden.

$R_p$	Bohrungs- zahl	Anfangsmichungs- höhe über der Tauchplatte(mm)	Kavitationszahl $K_c$	Verhältnis der Maximalwerte der Impulse $y=I_{mu}/I_{md}$
0.12	1	160 ÷ 227	0.005 - 0.138	$y=0.23-2.27 K_c$
0.12	7	227 ÷ 233	0.04 - 0.288	$y=0.09-0.36 K_c$
		0	0.281	$y=0.01$
0.17	1	160 ÷ 300	0.008 - 0.60	$y=0.45-2.68 K_c$
		0 ÷ 150	0.014 - 0.28	$y=0.2$
0.17	7	226 ÷ 260	0.010 - 0.281	$y=0.11-0.42 K_c$
		0 ÷ 83	0.143	$y=0.02$
0.25	1	156 ÷ 227	0.014 - 0.248	$y=0.67-2.68 K_c$
		0	0.222	$y=0.4$

Tab. 13.1- Impulse auf die obere Platte

14.- Abschließende Darstellung der gewonnenen Ergebnisse

-----

Um die Anwendung der Untersuchungsergebnisse zu erleichtern, werden die Hauptergebnisse und die abgeleiteten Beziehungen zusammengefaßt.

Aus der Filmauswertung ergab sich folgendes :

-----

- a) Die Strömung abwärts der Tauchplatte hängt sehr stark von der Anfangshöhe der Mischung über der Tauchplatte ab. Bei hohem Mischungsniveau findet am Anfang der Bewegung eine Verwirbelung statt. Danach bildet sich ein Freistrahls aus, wenn die Reynoldszahl groß genug ist. Bei niedrigem Mischungsniveau bildet sich sofort ein Freistrahls mit einem breiten Kopf aus.
- b) Nach einer gewissen Wegstrecke durchbricht der turbulente Strahl manchmal die Mischungsoberfläche. Je kleiner das Perforationsverhältnis ist, desto schneller sind die Strahlen und desto früher findet der Durchbruch statt.
- c) Nicht nur das Perforationsverhältnis sondern auch der Luftvolumenanteil in der Mischung ist von Bedeutung. Je größer der Luftvolumenanteil ist, desto größer ist die Geschwindigkeit des Kolbens und damit die des Strahls.
- d) Die Bewegungen der Mischungsoberfläche, des Strahls und deren Verhältnis wurden als Funktion der Kolbenbewegung dargestellt. (s. Abb 11.3,4) Die Meßdaten werden durch analytische Beziehungen

$$(14.1) \quad y = ax^b$$

beschrieben, wobei x der bezogene Kolbenweg( Verhältnis von

Kolbenweg zum Kolbendurchmesser) und  $y$  der bezogene Weg der Oberfläche  $R_s$  bzw. des Strahls  $R_j$  ist.

Die Koeffizienten  $a$  und  $b$  sind in Tab 11.1 für die verschiedenen Reynoldszahlen, Strouhalzahlen und Luftvolumenanteile angegeben.

Eine Korrelation der Koeffizienten zur Anwendung der empirischen Beziehungen auf andere Perforationsverhältnisse oder andere Luftvolumenanteile ist in den Tabellen 11.2 und 11.3 angegeben.

e) Wegen der Verwirbelung bildet sich oberhalb der Tauchplatte ein großes Kavitationsvolumen aus. Die maßgebende Größe oberhalb der Tauchplatte ist die Kavitationszahl.

f) Die Beziehung Kavitationsvolumen zu Kavitationszahl ist in Abb. 13.1 dargestellt. Je größer die Kavitationszahl ist, desto geringer ist das Kavitationsvolumen. Die Meßpunkte werden von der Gl. (13.2) korreliert. Die Beziehung für die Zweiphasenströmung weicht nicht viel von der für Einphasenströmung ab.

Aus den Messungen der Kräfte, die auf die Tauchplatte wirken, ergab  
-----  
sich folgendes :  
-----

Die Kraft auf die Tauchplatte kann mit

$$(14.2) \quad F_d = \Delta P \cdot S_e$$

berechnet werden, wobei  $\Delta P$  die Druckdifferenz bei der Strömung durch die Platte,  $S_e$  die effektive Oberfläche der Platte (Platte ohne Bohrungen) ist. Die Druckdifferenz wird mit der

Beziehung :

$$(14.3) \quad \Delta P = C_u \rho v^2 / 2$$

berechnet, wobei  $\rho$  die Dichte und  $v$  die Geschwindigkeit des Fluids stromaufwärts der perforierten Platte sind.

Der Koeffizient  $C_u$  ist der Widerstandkoeffizient bei instationärer Strömung, der von der Reynoldszahl, Beschleunigungszahl  $\Gamma$ , Strouhalzahl und vom Luftvolumenanteil  $\alpha$ , abhängt :

$$(14.4) \quad C_u = C_u(\text{Re}, \text{Str}, \Gamma, \alpha)$$

wobei  $\Gamma$  und Str folgendermaßen definiert werden :

$$(14.5) \quad \Gamma = \text{Da} / C_s v^2$$

$$(14.6) \quad \text{Str} = v_{\max} t / D$$

Hierbei ist  $D$  der äquivalente Durchmesser der Einheitszelle (Zelle um eine Bohrung in der Tauchplatte),  $a$  und  $v_{\max}$  die Beschleunigung bzw. die maximale Geschwindigkeit des Fluids stromaufwärts der Tauchplatte,  $C_s$  der Widerstandskoeffizient bei stationärer Strömung durch die Tauchplatte und  $t$  die Zeit.

Bei stationärer und instationärer Strömung ist der Widerstandskoeffizient für Reynoldszahlen größer als  $10^5$  im Bereich der durchgeführten Versuche praktisch unabhängig von der Reynoldszahl.

Die Auswertung der Versuche zeigt, daß keine Kraft auf die Tauchplatte ausgeübt wird bis zu dem Zeitpunkt, bei dem die Mischung unterhalb der Tauchplatte vollständig komprimiert ist. Der Luftvolumenanteil hat also nur einen Effekt auf die Anfangsbeschleunigung des Kolbens. Dieser Effekt kann durch die Kennzahlen  $\Gamma$  (proportional zur Beschleunigung) und Str (proportional zur Zeit), berücksichtigt werden.

Deshalb kann die Gleichung (14.4) so geschrieben werden :

$$(14.7) \quad C_u = C_u(\Gamma, \text{Str})$$

oder

$$(14.8) \quad C_u/C_s = C(\Gamma, \text{Str})$$

In der bekannten Literatur /1,2 und 19-35/ findet man keine Werte für Widerstandskoeffizienten bei instationärer Zweiphasenströmung durch perforierte Platten. Man findet nur Zweiphasenströmungsmultiplikationsfaktoren für die Druckverluste bei stationärer Strömung bzw. für die Druckverluste durch perforierte Strukturen bei instationärer einphasiger Strömung.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit sind :

a) Der zeitliche Verlauf des Widerstandskoeffizienten bei instationärer Zweiphasenströmung durch perforierte Platten ist qualitativ der gleiche, wie er für Einphasenströmung mit dünnen Schlitzen aus theoretischen Untersuchungen gefunden wurde /37,38/. D. h., am Anfang ist der Widerstandskoeffizient größer als bei stationärer Strömung ( $C_u/C_s > 1$ ). Danach nimmt dieser Koeffizient wegen der Abnahme der Beschleunigung ab, erreicht ein Minimum und nähert sich schließlich dem stationären Wert.

b) Die Meßwerte der instationären Widerstandskoeffizienten können in gewissen Bereichen von Strouhalzahlen durch Näherungsfunktionen der Form :

$$(14.9) \quad C_u/C_s = \gamma_1 + \gamma_2 \Gamma + \gamma_3 \Gamma^2$$

beschrieben werden.

Die Koeffizienten in der Gl. (14.9) sind zusammen mit den Strouhalzahlbereichen in Tab. 12.1, 12.2 angegeben. Die Gleichung (14.9) in Verbindung mit den Tabellen 12.1 und 12.2 entspricht der Gleichung (14.8).

c) Die Berechnung der Widerstandskoeffizienten bei stationärer Strömung  $C_s$  ist ein wichtiger Teilbereich. Die ermittelten Werte sind in Tab. 12.1 zusammengefaßt. Die theoretischen Werte für einen Freistrahel und einen sich ausgebreiteten Strahl sind ebenfalls angegeben.

d) Die Kontraktionskoeffizienten der Strahlen aus den Tauchplatten wurden für die stationäre Strömung durch die folgende Beziehung korreliert :

$$(14.10) \quad C_c = 0.596 + 0.237 R_p - 0.143 R_p^2$$

( $R_p$  = Perforationsverhältnis der Tauchplatte).

e) Die Abhängigkeit des Verhältnisses  $M_f$  der Druckverluste an der Tauchplatte bei stationärer Zweiphasenströmung und bei Einphasenströmung wurde aus den Versuchen als Funktion des Luftvolumenanteils  $\alpha$  ermittelt :

$$(14.11) \quad M_f = 1 + 0.012(100\alpha)^{1.22} .$$

Aus den Messungen der Kräfte, die auf die obere Platte wirken,

-----  
ergab sich folgendes :  
-----

Die maßgebende Größe für die Strömungsvorgänge oberhalb der Tauchplatte ist die Kavitationszahl. Die Ergebnisse werden deshalb

als Funktion der Kavitationszahl korreliert.

Die wichtigsten Ergebnisse sind :

a) Die Verhältnisse der maximalen Kräfte und Impulse (Impuls = Zeitintegral der Kraft) auf die obere Platte zu den entsprechenden Werten an der Tauchplatte hängen bei hohen Anfangsmischungsniveaus oberhalb der Tauchplatte von der Kavitationszahl und vom Perforationsverhältnis ab. Bei den Versuchen mit niedrigen Anfangsmischungsniveaus sind diese Verhältnisse nur vom Perforationsverhältnis abhängig. Die Korrelationen für die Verhältnisse der maximalen Impulse sind in Tab. 13.1 und in den Abbildungen 13.1 und 13.2 angegeben.

b) Bei den Versuchen mit 7 Bohrungen ergeben sich kleinere Kräfte und Impulse auf die obere Platte als bei den entsprechenden Versuchen mit Einzelbohrungen. Dies kann durch die starke Verwirbelung der Strahlen, die aus mehrere Bohrungen strömen, erklärt werden.

c) Die zeitliche Verzögerung zwischen der Belastung der Tauchplatte und der oberen Platte wurde als Beziehung zwischen einer Zeitverzögerung-Strouhalzahl ( $Str_d$ ) und der Kavitationszahl  $K_c$  ermittelt :

$$(14.12) \quad 1/Str_d = 0.14K_c^{-0.122}.$$



## 15.- Zusammenfassung

-----

Bei der Berechnung eines hypothetischen Störfalls mit Kernzerstörung (HCDA - Hypothetical Core Disruptive Accident) in einem natriumgekühlten Reaktor des Loop-Typs ist es sehr wichtig, die Belastung des Reaktordruckbehälters, insbesondere des oberen Deckels zu kennen. Eine perforierte Tauchplatte soll den direkten Aufschlag des flüssigen Kühlmittels gegen den Reaktordeckel vermeiden.

Rechenprogramme zur Simulation des Störfalls, wie z.B. SIMMER, können die Tauchplatte nur grob simulieren. Es ist deshalb wichtig, die Strömung des Kühlmittels durch die Tauchplatte im Detail zu untersuchen und die Kräfte zu messen, welche auf die Tauchplatte und auf den Reaktordeckel wirken.

Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde mit Hilfe eines eindimensionalen Modells die Strömung der Kühlmittelmasse oberhalb der Kernstrukturen durch die Tauchplatte auf den Reaktordeckel eines typischen 300 MWe Reaktors simuliert. Als Kühlmittel wurde eine Wasser-Luft Mischung verwendet.

Bei diesen Untersuchungen wurden die Perforationsverhältnisse, die Anzahl der Bohrungen, die Anfangshöhe des Fluids über der Tauchplatte, der Luftvolumenanteil, die Größe der Luftblasen und der Beschleunigungsverlauf des Fluids variiert.

Die Druckverluste an der Tauchplatte und die Kräfte auf die Tauchplatte und den oberen Deckel wurden gemessen. Die Strömung abwärts der Tauchplatte wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit sind :

- a) Der zeitliche Verlauf der Widerstandskoeffizienten der Tauchplatte bei instationärer Zweiphasenströmung ist ähnlich dem bei Einphasenströmung durch dünne Schlitze, der durch theoretische Untersuchungen gefunden wurde. D.h., am Anfang ist der Widerstandskoeffizient größer als bei stationärer Strömung, danach nimmt dieser Koeffizient ab, erreicht ein Minimum und nähert sich schließlich dem stationären Endwert.
- b) Bei den durchgeführten Versuchen, bei denen die Reynoldszahl stets höher als  $10^5$  war, zeigen die ermittelten Widerstandskoeffizienten, daß sie nur von der Beschleunigungs- und Strouhalzahl abhängen.
- c) Für die Widerstandskoeffizienten der instationären Strömung bei verschiedenen Perforationsverhältnissen, Luftvolumenanteilen und Anfangsmischungshöhen oberhalb der Tauchplatte wurden empirische Beziehungen in Abhängigkeit von der Beschleunigungszahl in gewissen Bereichen von kritischen Strouhalzahlen aufgestellt.
- d) Die Kontraktionskoeffizienten der Strahlen aus den Tauchplatten wurden für die stationäre Strömung durch eine empirische Beziehung als Funktion des Perforationsverhältnisses beschrieben.
- e) Die Abhängigkeit des Verhältnisses der Druckverluste an der Tauchplatte bei stationärer Zweiphasenströmung und bei Einphasenströmung wurde aus den Versuchen als Funktion des Luftvolumenanteiles ermittelt.
- f) Die Strömung abwärts der Tauchplatte ist von der Fluidhöhe über der Tauchplatte abhängig, zumindest am Anfang der Bewegung.

Die Geschwindigkeit des Strahls und der Mischungsoberfläche wird vom Perforationsverhältnis und Luftvolumenanteil beeinflusst. Die Wege der Mischungsoberflächen und der Strahlen wurden durch empirische Beziehungen beschrieben.

- g) Wegen der Strahlen oberhalb der Tauchplatte bildet sich ein großes Kavitationsvolumen aus, das von der Kavitationszahl abhängig ist. Die Kavitationszahl ist die maßgebende Größe für die Strömungsvorgänge oberhalb der Tauchplatte.
- h) Die Verhältnisse der maximalen Kräfte und Impulse auf die obere Platte (Reaktordeckel) zu den entsprechenden Werten auf die Tauchplatte hängen bei hohen Anfangsmischungsniveaus oberhalb der Tauchplatte von der Kavitationszahl und vom Perforationsverhältnis ab. Bei den Versuchen mit niedrigen Anfangsmischungsniveaus sind diese Verhältnisse nur vom Perforationsverhältnis abhängig.
- i) Bei den Versuchen mit 7 Bohrungen ergeben sich kleinere Kräfte und Impulse auf die obere Platte als bei den entsprechenden Versuchen mit Einzelbohrung. Dies kann durch die starke Verwirbelung der Strahlen, die aus mehreren Bohrungen strömen, erklärt werden.
- j) Die zeitliche Verzögerung (Zeitverzögerung-Strouhalzahl) zwischen der Belastung der Tauchplatte und der oberen Platte wurde als Funktion der Kavitationszahl beschrieben.

Mit den dargestellten Ergebnissen über die instationäre Strömung des Zweiphasengemisches durch die Tauchplatte und über die Belastungen, die die Tauchplatte selbst und die oberen Reaktorstrukturen erfahren, ist es möglich, die Auswirkungen eines hypothetischen Störfalls mit Kernzerstörung hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit von Tauchplatte und oberer Reaktorstruktur zuverlässig vorauszuberechnen.

Da die instationäre Zweiphasenströmung durch perforierte Bauteile in vielen anderen Bereichen der Technik auftritt, sind die gefundenen Korrelationen für die instationären Widerstandskoeffizienten durch perforierte Platten sowie die Korrelationen für die stationäre Druckverluste und für die Kontraktionskoeffizienten von allgemeinem Interesse.

## Nomenklatur

-----

### 1. Lateinische Buchstaben

-----

a		Koeffizient
a	(m/s <sup>2</sup> )	Beschleunigung
a	(ent.N oder N/s)	Koeffizient
a <sub>1</sub>		Koeffizient
b		Koeffizient
b	(N/s <sup>2</sup> )	Koeffizient
b <sub>1</sub>		Koeffizient
C	(-)	Widerstandskoeffizient
C <sub>c</sub>	(-)	Kontraktionskoeffizient
		Widerstandskoeffizient
C <sub>s</sub>	(-)	bei stationärer Strömung
C <sub>se</sub>	(-)	für einen kontrahierten Strahl
C <sub>sf</sub>	(-)	für einen sich ausbreitenden Strahl
C <sub>u</sub>	(-)	bei instationärer Strömung
C <sub>1</sub>		Koeffizient
C <sub>2</sub>		Koeffizient
C <sub>3</sub>		Koeffizient
D	(m)	Durchmesser des Testrohrs
d <sub>b</sub>	(mm)	Durchmesser der Luftblasen
D <sub>j</sub>	(m)	Strahlweg
D <sub>p</sub>	(m)	Kolbenweg
D <sub>s</sub>	(m)	Mischungsoberflächenweg
d <sub>1</sub>		Koeffizient
d <sub>2</sub>		Koeffizient
d <sub>3</sub>		Koeffizient
F	(N)	Kraft
F <sub>d</sub>	(N)	Kraft auf die Tauchplatte

$F_f$	( $\mu\text{m}$ )	Filterfeinheit der Scheiben aus Sinterbronze
$F_u$	(N)	Kraft auf die obere Platte
$f_1$		Koeffizient
$f_2$		Koeffizient
$f_3$		Koeffizient
$g$	( $\text{m/s}^2$ )	Erdbeschleunigung
$g_1$		Koeffizient
$g_2$		Koeffizient
$g_3$		Koeffizient
$h$	(m)	Mischungsniveau oberhalb der Tauchplatte
$I_d$	( $\text{N}\cdot\text{s}$ )	Impuls auf die Tauchplatte
$I_u$	( $\text{N}\cdot\text{s}$ )	Impuls auf die obere Platte
$K_c$	(-)	Kavitationszahl
$Ma$	(-)	( $v/v_c$ ) - Machzahl
$M_f$	(-)	Multiplikationsfaktor
$P$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck
$P_v$	( $\text{N/m}^2$ )	Wassersattdampfdruck
$P_1$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck unterhalb des Kolbens
$P_2$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck oberhalb des Kolbens
$P_3$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck im Stahlzylinder
$P_4$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck im Stahlzylinder
$P_5$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck im Stahlzylinder
$P_6$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck stromaufwärts der Tauchplatte
$P_7$	( $\text{N/m}^2$ )	Druck stromabwärts der Tauchplatte
$Re$	(-)	( $v\cdot D/\nu$ ) - Reynoldszahl
$R_p$	(-)	Perforationsverhältnis (Verhältnis zwischen der Fläche der Bohrungen und der Gesamtfläche der Tauchplatte)
$R_j$	(-)	bezogener Strahlweg
$R_s$	(-)	bezogener Mischungsoberflächenweg
$S_e$	( $\text{m}^2$ )	effektive Tauchplattenoberfläche (Gesamtoberfläche der Tauchplatte minus der Fläche der Bohrung)

$Str_d$	(-)	$(t_d v_{max}/D)$ - dimensionslose Zeitverzögerung
$Str_{m1}$	(-)	$(t_{m1} v_{max}/D)$ - kritischer Wert der Strouhalzahl
$Str_{m2}$	(-)	$(t_{m2} v_{max}/D)$ - Kritischer Wert der Strouhalzahl
$t$	(s)	Zeit
$t_d$	(s)	Zeitverzögerung
$t_{id}$	(s)	Beginn der Belastung auf die Tauchplatte
$t_{iu}$	(s)	Beginn der Belastung auf die obere Platte
$t_{m1}$	(s)	Zeit, um eine erste kritische Strouhalzahl zu erreichen
$t_{m2}$	(s)	Zeit, um eine zweite kritische Strouhalzahl zu erreichen
$v$	(m/s)	Geschwindigkeit
$v_c$	(m/s)	Schallgeschwindigkeit
$v_{max}$	(m/s)	maximale Geschwindigkeit
$v_j$	(m/s)	Geschwindigkeit des Strahls
$V_c$		relatives Kavitationsvolumen oberhalb der Tauchplatte
$x$		Abszisse
$y$		Ordinate

## 2. Griechische Buchstaben

-----

$\Delta P$	$(N/m^2)$	Druckdifferenz (P6-P7)
$\Delta P_{tp}$	$(N/m^2)$	Druckdifferenz (P6-P7) - Zweiphasenströmung
$\Delta P_{op}$	$(N/m^2)$	Druckdifferenz (P6-P7) - Einphasenströmung
$\phi$	(mm)	Durchmesser
$\gamma_1$		Koeffizient
$\gamma_2$		Koeffizient
$\gamma_3$		Koeffizient
$\Gamma$		$(D \cdot a)/(C_s \cdot v^2)$ Beschleunigungszahl
$\alpha$		Luftvolumenanteil
$\mu$	$(Kg/(m \cdot s))$	dynamische Zähigkeit

$\mu_g$	(kg/(m*s))	dynamische Zähigkeit (Luft)
$\mu_l$	(kg/(m*s))	dynamische Zähigkeit (Wasser)
$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	kinematische Zähigkeit
$\rho$	(Kg/m <sup>3</sup> )	Dichte
$\rho_g$	(Kg/m <sup>3</sup> )	Dichte der Luft
$\rho_l$	(Kg/m <sup>3</sup> )	Dichte des Wassers

### 3. Indizes

-----

c	Kontraktion
d	auf die Tauchplatte
e	eines sich ausbreitenden Strahls
f	vom Freistrahls
g	der Luft
id	der Tauchplatte
iu	der oberen Platte
j	vom Strahl
l	vom Wasser
max	Maximalwert
m1	erster kritischer Wert
m2	zweiter kritischer Wert
op	bei Einphasenströmung
p	vom Kolben
s	der Mischung
s	bei stationärer Strömung
tp	der Zweiphasenströmung
u	auf die obere Platte
u	bei instationärer Strömung



Literatur :

-----

- / 1/ F. Casadei  
Experimentelle Untersuchung der instationären einphasigen Strömung durch perforierte Platten.  
KfK 3354, EUR 7058d, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1982
- / 2/ F. Casadei, M. Dalle Donne  
Accelerated one-phase flow through perforated plates.  
Nuclear Technology, Seite 43, Vol. 64, Jan. 1984
- / 3/ H.G. Frosch  
SIMMER II-Rechnungen zur instationären einphasigen Strömung durch perforierte Strukturen. GRS-A-1032, Dezember 1984
- / 4/ L.L. Smith  
SIMMER-II: A computer program for LMFBR disruptive core analysis.  
NUREG/CR-0453, LA-7515-M, Rw. 1980
- / 5/ P. Schmuck  
The postdisassembly phase in LMFBR's : SIMMER results and their evaluation. Int.Topical Meeting on LMFBR Safety and Related Design and Operational Aspects. Lyon, July 19-23, 1982
- / 6/ A.A. Gukhman  
Introduction to the theory of similarity.  
Academic Press, New York, 1965
- / 7/ J. Ginoux  
Two-phase flow and heat transfer.  
Von Karman Institute de Dinamique des Fluids, Rhode Saint Genese, Belgium, 1977
- / 8/ G.B. Wallis  
One-dimensional two-phase flow.  
McGraw-Hill, 1969
- / 9/ M. Ishii  
Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow.  
Eyrolles, Paris, 1975
- /10/ D.J. Tritton  
Physical Fluid Dynamics.  
Van Nostrand Reinhold Company Ltd., Molly Millers Lane, Wokingham, Berkshire, England
- /11/ A. Tentner, J. Weisman  
The use of the method of characteristics for examination of the two-phase flow behavior.  
Nuclear Technology, Seite 19, Vol. 37, 1978
- /12/ M. Ishii, G. Kocamoustafougullari  
Two-phase flow models and their limitations.  
Eyrolles, 1982

- /13/ S.W. Gouse, Jr.  
Introduction to two-phase gas-liquid flow.  
Dept. of Mech. Eng.,  
M.I.T., Cambridge, Massachusetts, Rep.8734-3,1964
- /14/ J.H. Stuhmiller, R.E. Ferguson, S.S. Wang, L.J. Agee  
Two-phase flow regime modelling.  
Fluid Dynamics Group, JAYCOR, San Diego, California (USA), 1983
- /15/ J.A. Boure'  
The constitutive laws of 1-D, two fluid models for two-phase  
flows - Possible mathematical forms - Restrictions resulting from  
basic principles.  
CEA -R-4915, Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, 38 (France),  
Dept. de Transfert et Conversion d'Energie, May 1978
- /16/ M.R. Davis  
Structure and analysis of gas-liquid mixture flow.  
7-th Australian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Brisbane,  
18-22, August 1980
- /17/ G.G. Kornilov  
The slip coefficient in two-phase liquid-gas flow.  
From Russian original : J. of Eng. Physics, Seite 715, Vol 43 No.1,  
July 1982
- /18/ J. Zierep  
Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre.  
G.Braun, Karlsruhe, 1982
- /19/ I.E. Idel'chik  
Handbook of hydraulic resistance. Coefficients of local resistance  
and of friction. AEC-TR-6630, 1960
- /20/ A. Kashah  
Pressure drop in two-phase flow.  
Ph.D. Dissertation, 1980 Cincinnati University
- /21/ D. Chisholm  
Two phase flow in pipelines and heat exchangers.  
s. 184, G. Godwin, London, 1983
- /22/ R.Liles  
Two-phase flow.  
Los Alamos Science, vol. 2, No. 2, 1982
- /23/ J.Weisman, A.Husain, B. Harshe  
Two-phase pressure drop across abrupt area changes and restrictions.  
Two-Phase Transport and Reactor Safety, T.N. Veziroglu and S. Kakac  
Ed., Hemisphere Pub. Washington, Seite 1281, 1978
- /24/ C.J. Baroczy  
A systematic correlation for two-phase pressure drop.  
Heat Transfer - Los Angeles, James G. Knudsen  
Chemical Engineering Progress, Symposium Series 64, Vol. 62, 1966

- /25/ H.C. Simpson, D.H. Rooney, E. Grattan  
Two-phase flow through gate, valves and orifice plates.  
Int. Conf. on the Physical Modelling of Multi-phase  
Flow, Coventry - England, april 19-21, 1981
- /26/ C.P. Fairhurst  
Component pressure loss during two-phase flow.  
Int. Conf. on the Physical Modelling of Multi-phase  
Flow, Coventry - England, april 19-21, 1981
- /27/ J.A. Edwards, T.W. Sigmon  
Two-phase flow pressure drop correlation.  
Multiphase Transport , Vol. 2, T.N. Veziroglu Ed., Hemisphere  
Pub. Corp., Seite 1061, 1980
- /28/ A. Tentner, H.U. Wider  
Pressure drop modelling in variable area.  
Multiphase Transport , Vol. 2, T.N. Veziroglu Ed., Hemisphere  
Pub. Corp., Seite 1137, 1980
- /29/ H. Pascal  
Compressibility effect in two-phase flow and its application to  
flow metering with orifice plate and convergent-divergent nozzle.  
Journal of Fluids Engineering, Seite 394, Vol. 105, Dec. 1983
- /30/ G.F. Hewitt  
Two-phase flow through orifice, valve, bends and other singularities.  
1983, Lecture Series on Two-Phase Flow, Institute of Technology,  
Trondheim, Norwegen
- /31/ J. Weisman, A. Tentner, Y. Eljas, and A. Khanna  
Two-phase pressure drop across abrupt area changes during rapid  
flow transients.  
Multiphase Transport , Seite 1103, Vol. 2, T.N. Veziroglu Ed.,  
Hemisphere, Pub. Corp., 1980
- /32/ M. Okazaki  
Theoretical analysis for accelerated two-phase flow.  
Bulletin of the JSME, Seite 823, Vol. 24, No. 191, 1981
- /33/ A. Husain, W.G. Choe, J. Weisman  
Applicability of the homogeneous flow model to pressure drop in  
straight pipe and across area changes.  
Cincinnati Univ., Ohio, 1974, 50p, 80-4 -COO-2152-16
- /34/ J.W. Daily, W.L. Hankey, Jr., R.W. Olive and J.M. Jordan, Jr.  
Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows  
through smooth tubes and orifices.  
Trans. ASME No. 9, 78, 1956
- /35/ N.A. Panchurin  
Hydraulic resistance in a transient turbulent flow in tubes.  
Tr. LIVT 13, 43-56, 1961 (in Russisch).

- /36/ P. Schmuck  
An efficient method to improve flow representation across singularities in numerical fluid dynamics codes.  
Nuclear Technology, Sept. 1985, erscheint demnächst.
- /37/ J. Smolderen, F. Bouton, G. Liebecq  
Ecoulement a travers des plaques perforées en regime instationnaire.  
Institut von Karman de Dynamique des Fluides, Rhode Saint Genese, Belgium, Test Report 129, Mai 1977
- /38/ J. Smolderen, W. Kallman, G. Liebecq  
Institut von Karman de Dynamique des Fluides, Rhode Saint Genese, Belgium, Test Report 157, november 1978
- /39/ L.V. van Wijngaarden  
Waves in gas-liquid flows.  
Technical University Twente, Enschede, The Netherlands, 1983
- /40/ V.H. Arakeri  
Cavitation inception.  
Proc. Indian Acad. Sci., Seite 149, Vol. c 2, pt. 2, May 1979
- /41/ J. Bonnin  
Theoretical and experimental investigations of incipient cavitation in different liquids. ASME Nov. 1982, No. 72WA/FE-3/
- /42/ S. Kamiyama, T. Yamasaki  
Prediction of gaseous cavitation occurrence in various liquids based on two-phase flow analogy.  
J. of Fluids Engineering, Seite 46, Vol. 103/551, December 1981
- /43/ S. Kamiyama, T. Yamasaki  
Prediction of gaseous cavitation occurrence in sodium and water based on two-phase critical flow analogy. Reprint of the Cavitation and Polyphase Flow Forms, ASME 1970, pp.46-48
- /44/ S. Kamiyama, T. Yamasaki  
Prediction of gaseous cavitation occurrence in sodium and water.  
Bulletin of the JSME, Seite 1428, Vol. 23, No. 183, September 1980
- /45/ J. Katz  
Cavitation phenomena within regions of flow separation.  
J. Fluid Mech., Seite 397, Vol. 140, 1984
- /46/ Microcomputers and memories - Digital Equipment Corporation, 1982
- /47/ Manual Sicos - Difa Benelux bv, Heerbaan 222, NL Breda

- /48/ R.W. Hamming  
Numerical Method for Scientists and Engineers.  
Mac Graw Hill, 1978
- /49/ T. Miyahara, Y. Matsuha, T. Takahashi  
The size of bubbles generated from perforated plates.  
International Chemical Engineering, Vol.3, No.3, July 1983
- /50/ T. Miyahara, N. Haga, T. Takahashi  
Bubble formation from an orifice at high gas flow rates.  
International Chemical Engineering, Vol. 23, No. 3, 1983
- /51/ G.P. Tartaglia  
Unsteady two-phase flow through perforated plates : experimental results.  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, erscheint demnächst als KfK Bericht.
- /52/ C.R. Arnold, G.F. Hewitt  
Further developments in the photography of two-phase gas-liquid flow.  
The Journal of Photographic Science, Vol. 15, Numbers 1-6, 1967
- /53/ K.D. Cooper, G.F. Hewitt, B. Pinchin  
Photography of two-phase gas/liquid flow.  
The Journal of Photographic Science, Vol. 12, Numbers 1-6, 1964
- /54/ J.W. Hoyt, J.J. Taylor  
A photographic study of cavitation in jet flow.  
Journal of Fluids Engineering, Seite 14, Vol. 103, March 1981
- /55/ Commodore 4032 Handbook
- /56/ M.J. Miksis, J.M. van der Bröck, J.B. Keller  
Rising Bubbles.  
J. Fluid Mechanics, Seite 31, Vol. 123, 1982
- /57/ S.M. Sami  
Bubble rise velocity in stagnant and flowing liquids.  
Physical Modelling of Multiphase Flow, April 19-21, 1983,  
Coventry, England.
- /58/ L.V. van Wijngaarden  
Bubble interactions in liquid-gas flows.  
Applied Scientific Research, on International Journal of Thermal,  
Mechanical and Electromagnetic Phenomena in Continua, Vol. 37, 1981
- /59/ H. Sameith  
Untersuchungen zur Ausbreitung von Stoßwellen in relaxierenden  
Zweikomponenten-Blasengemischen. May 1973 - KfK 1796



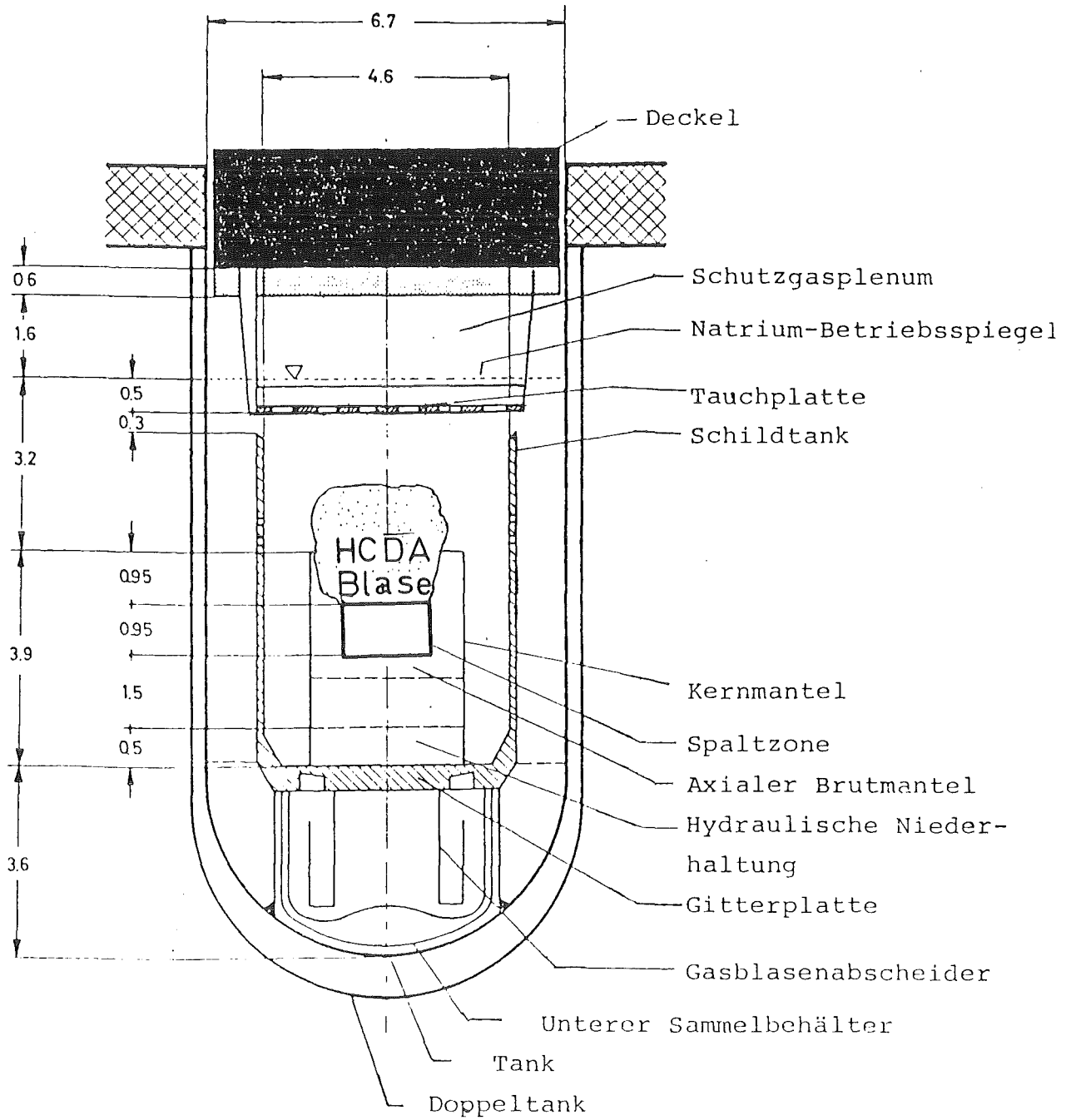


Abb. 1.1- Schematische Darstellung eines 300 MWe Reaktors vom Loop-Typ (Maße in m)

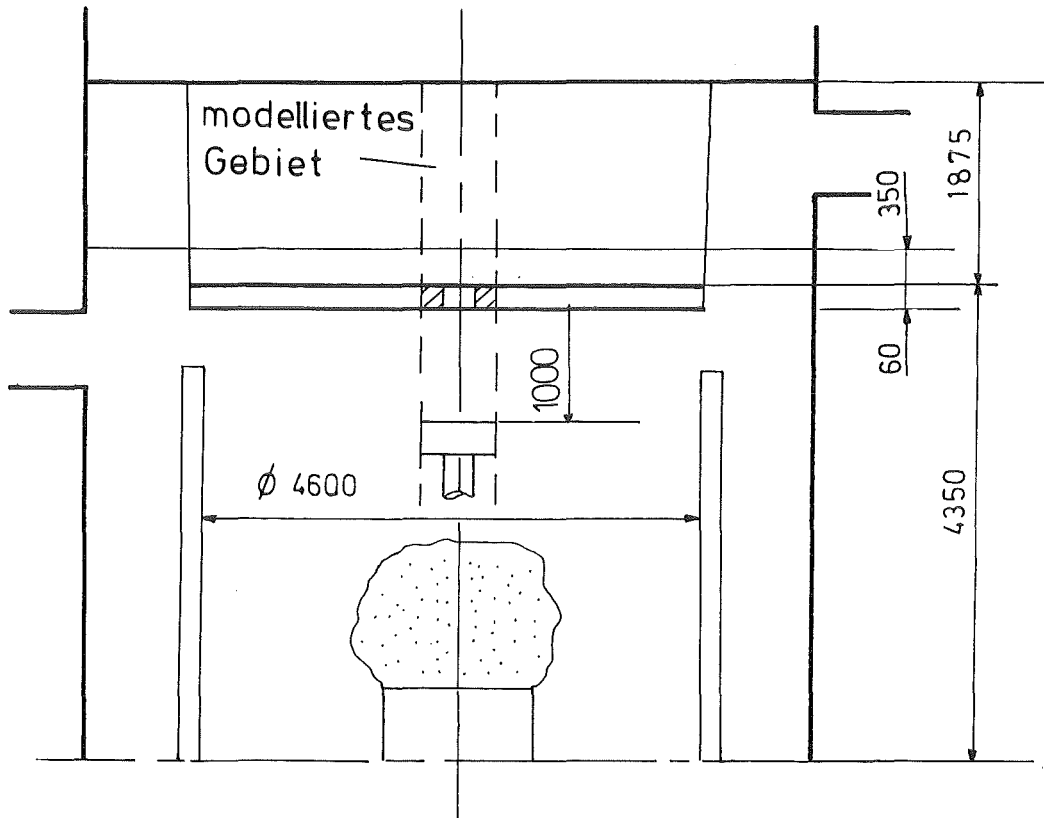


Abb. 1.2- Oberer Teil des Reaktors  
(Maße in mm)



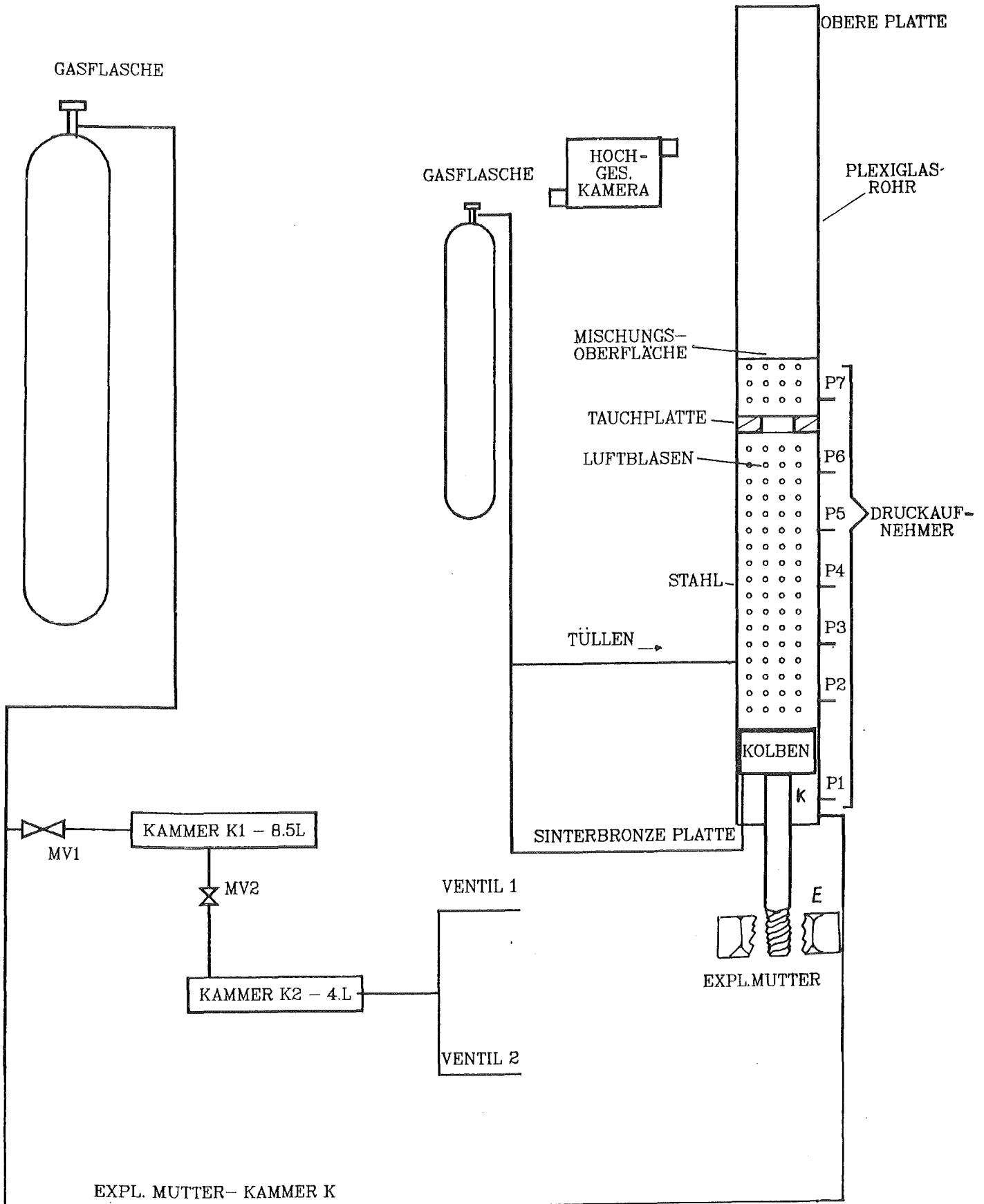


Abb. 5.1- Schematische Darstellung der Testapparatur

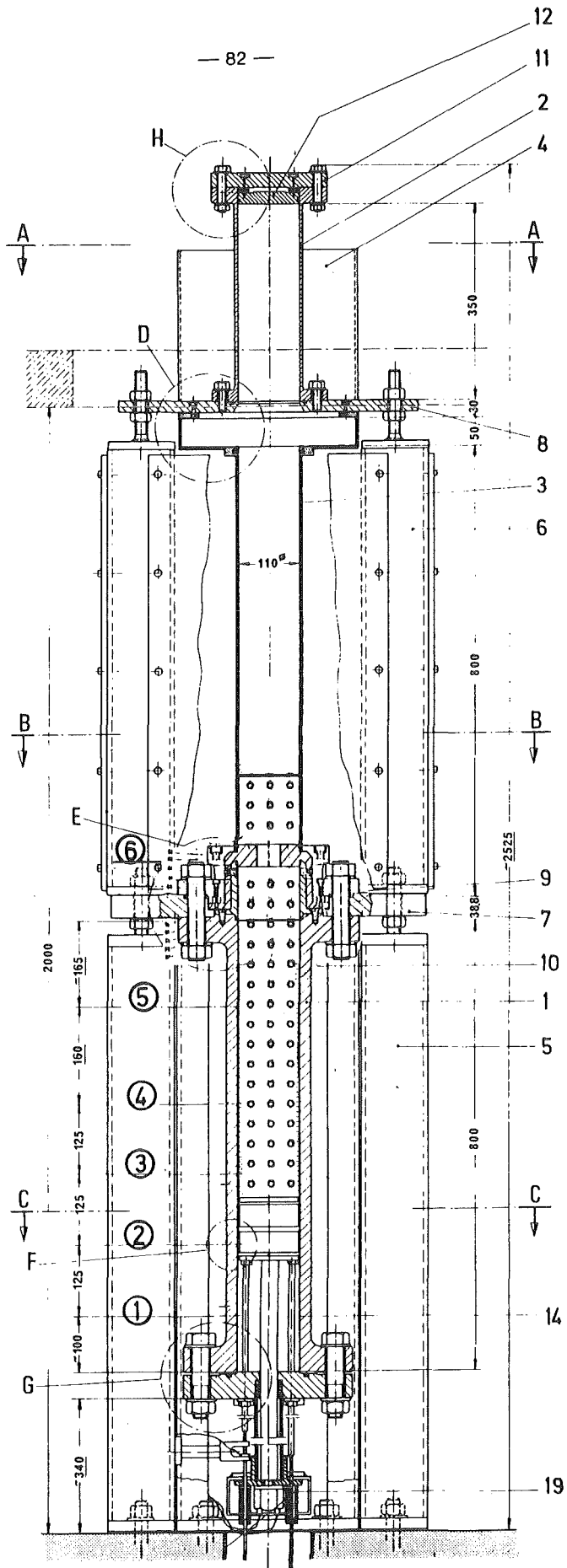


Abb. 5.2- Teststrecke  
(Maße in mm)

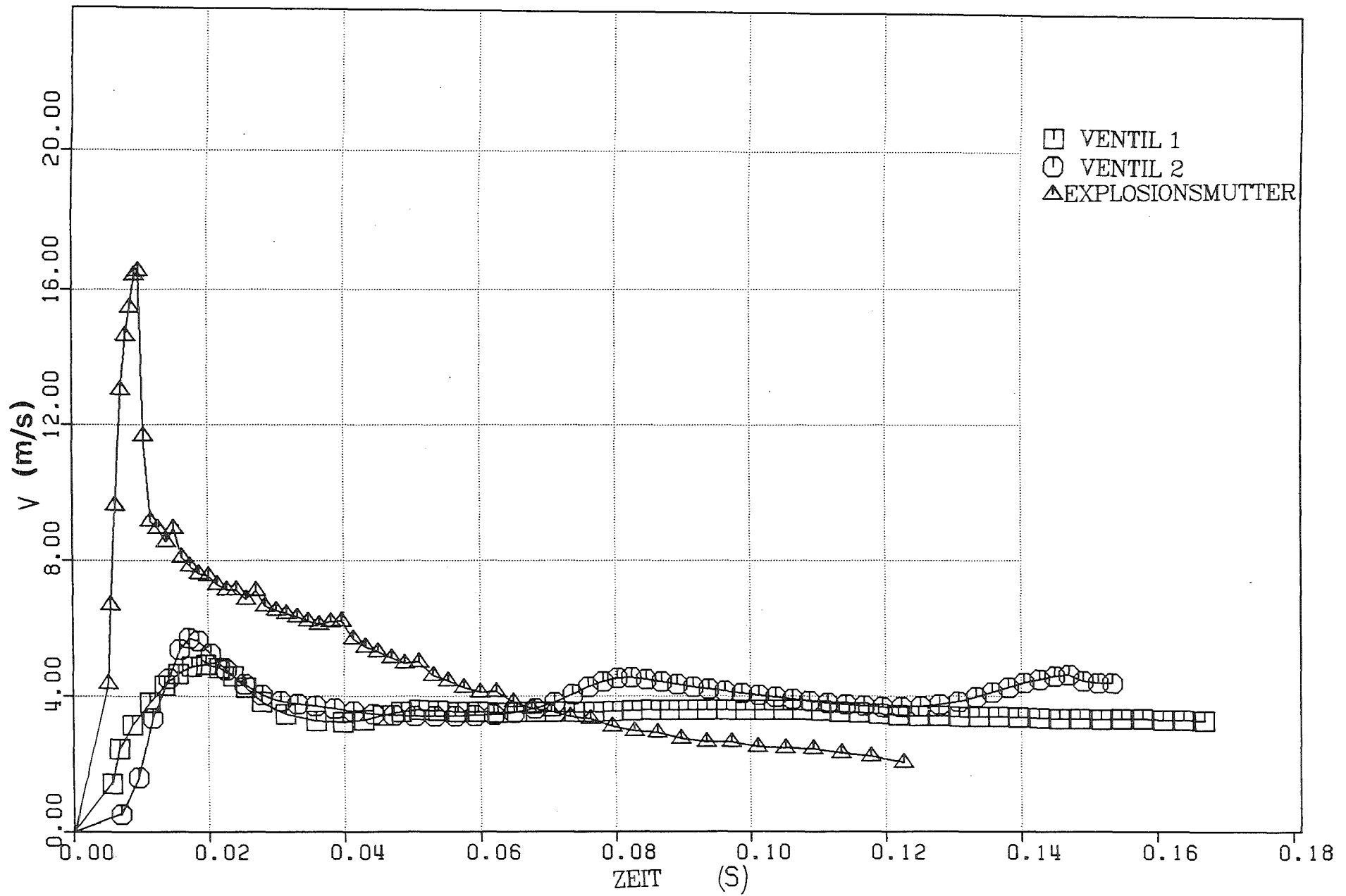


Abb. 5.3- Vergleich zwischen den Kolbengeschwindigkeitskurven der drei Beschleunigungsvorrichtungen

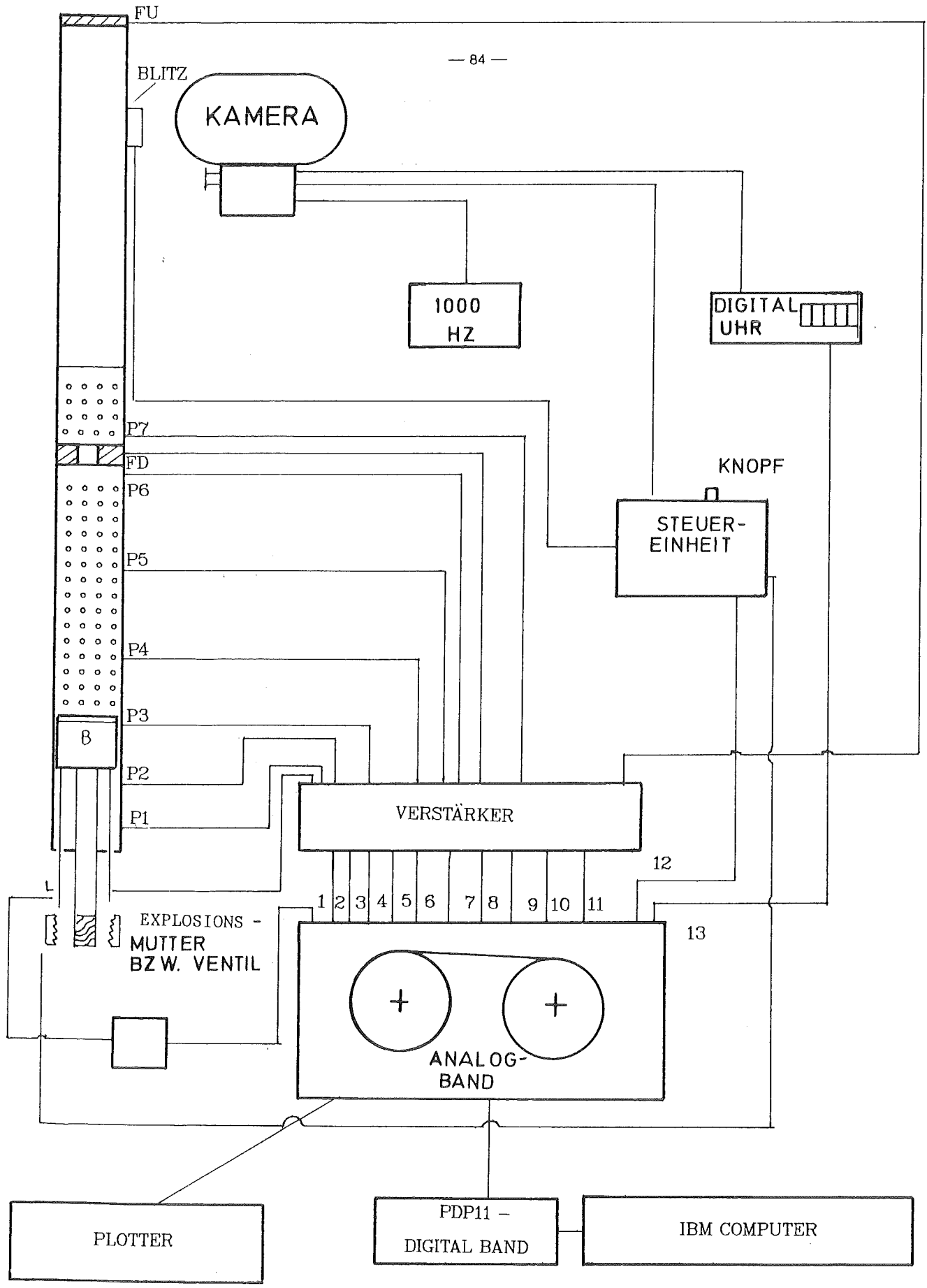


Abb. 7.1 - Instrumentierung.

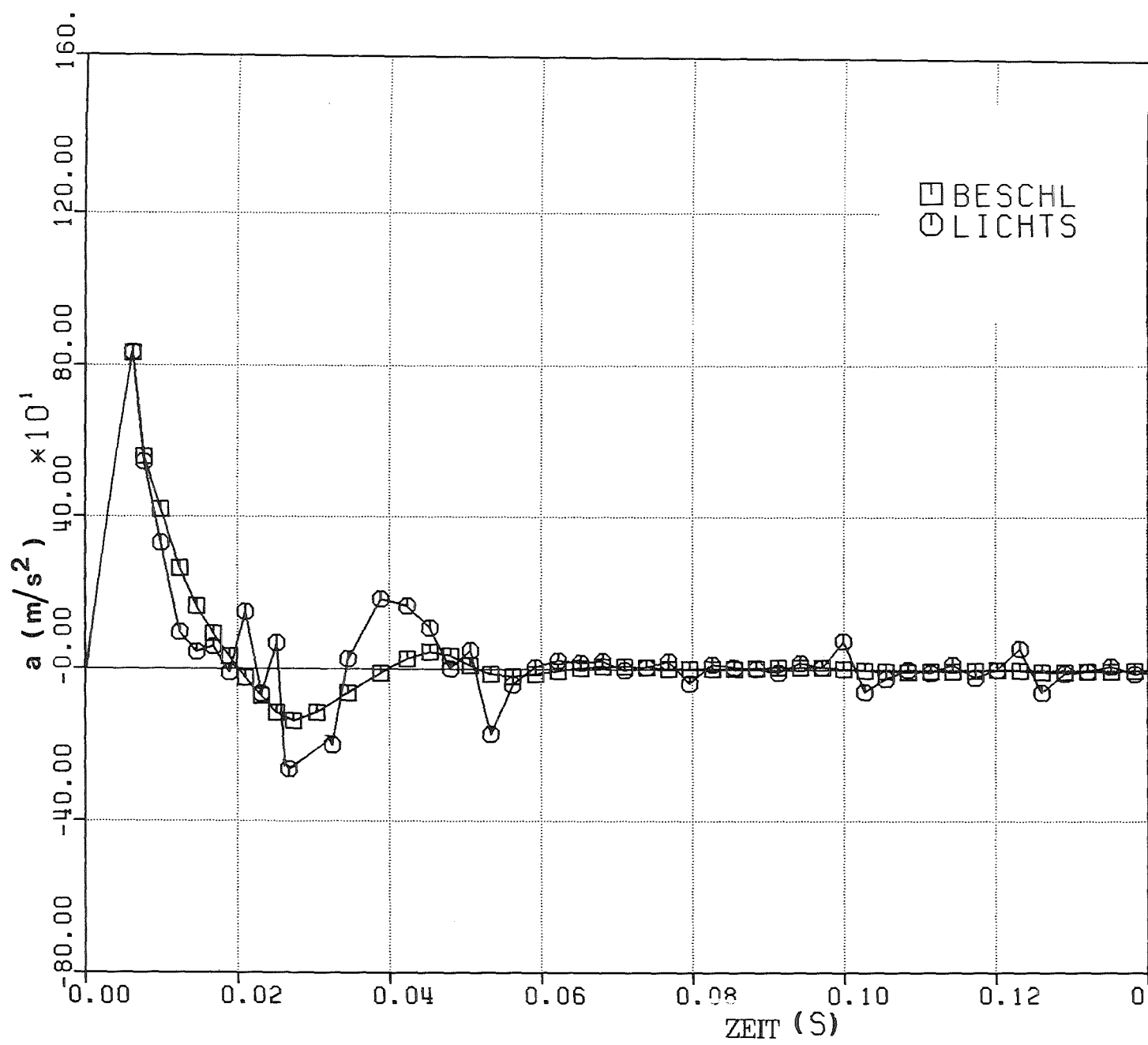


Abb. 7.2 - Vergleich zwischen den Signalen von Beschleunigungs-  
aufnehmer und Lichtschranken.

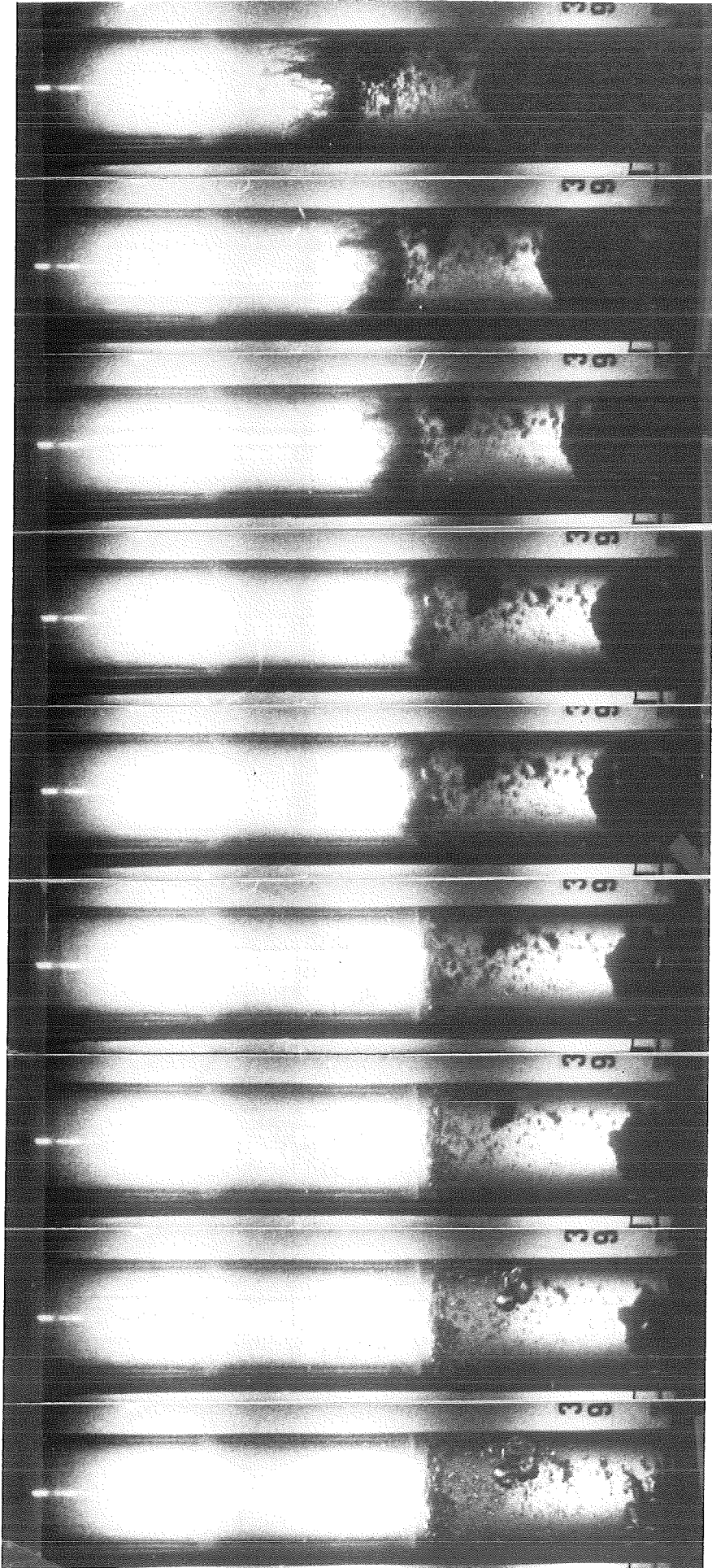


Abb. 10.1- Versuch Nr. 39 - Bilder 1-9

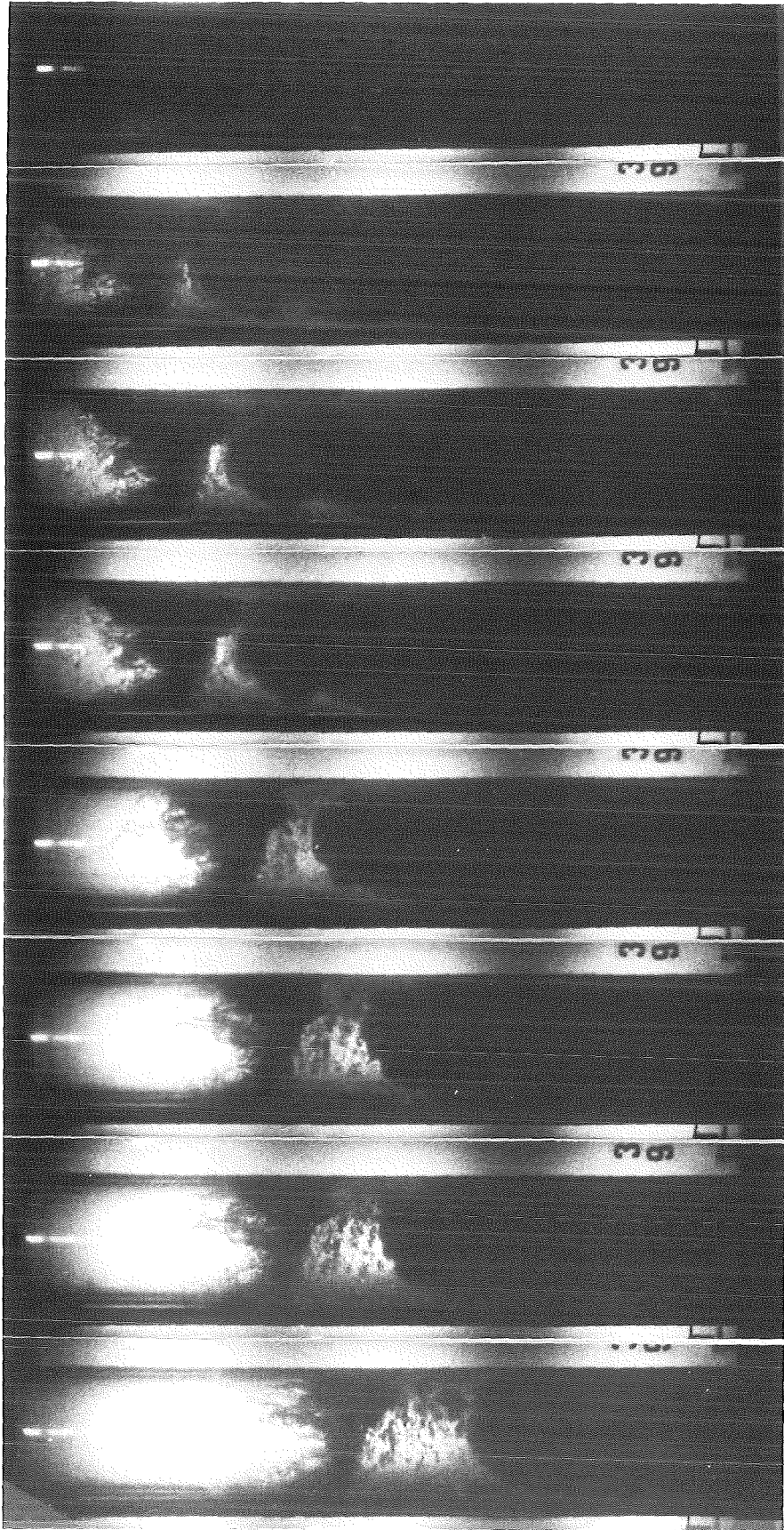


Abb. 10.2- Versuch Nr. 39 - Bilder 10-17

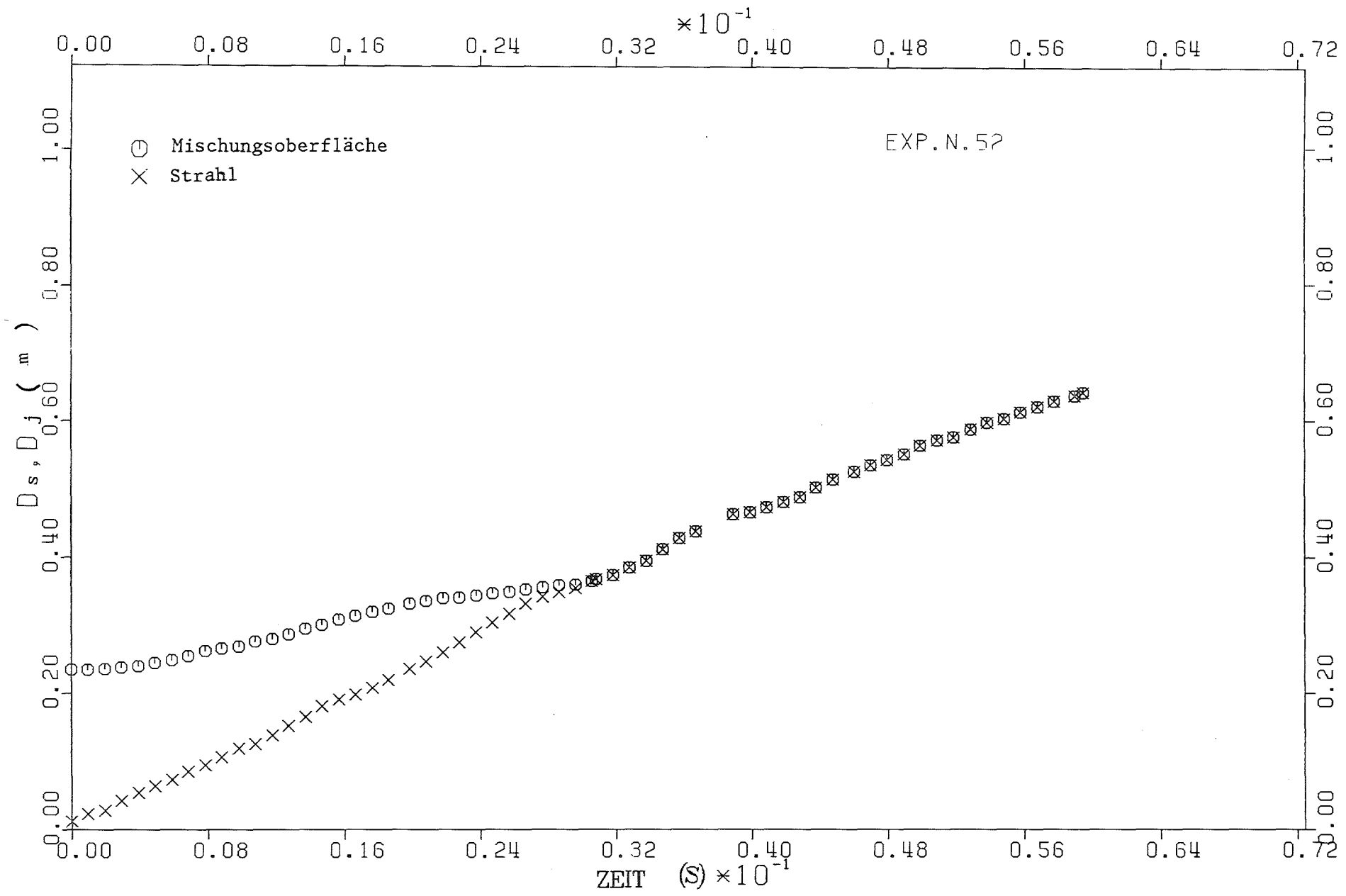


Abb.11.1- Auswertung der Bewegung der Mischungsoberfläche und des Strahls aus dem Film



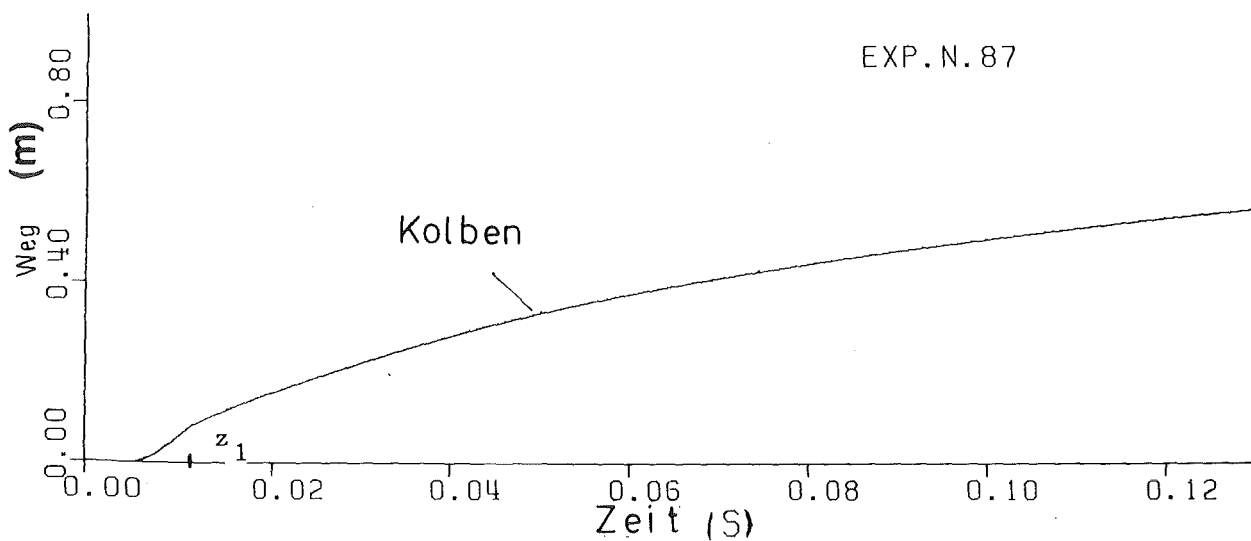
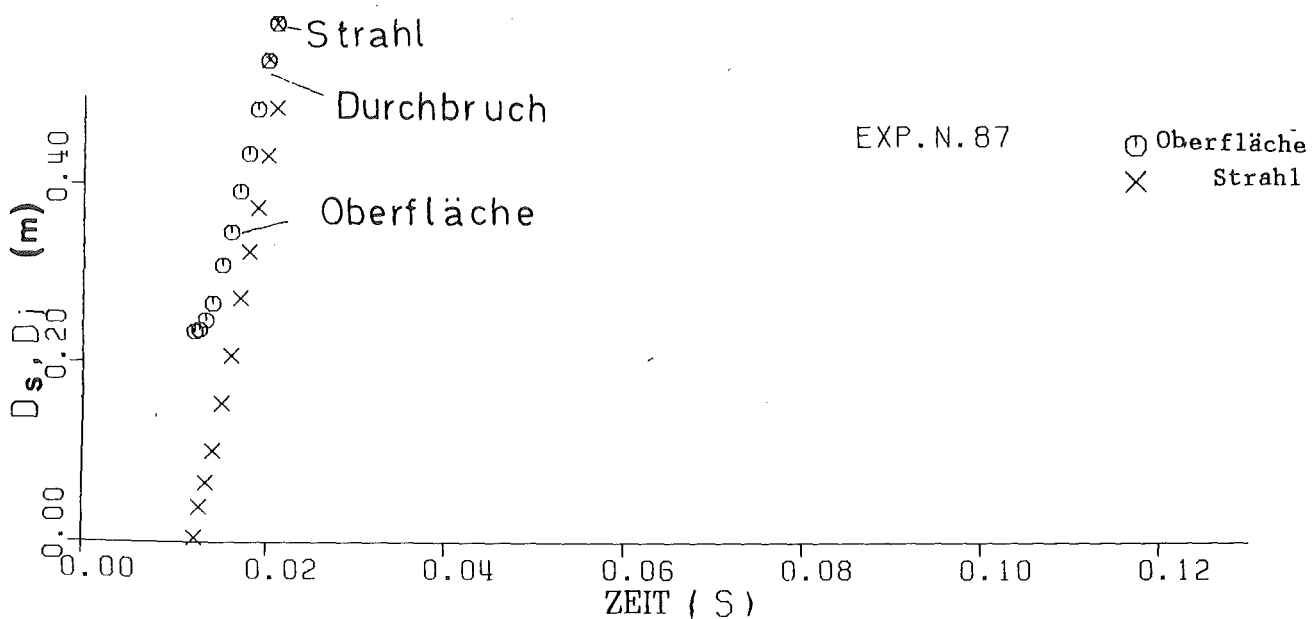
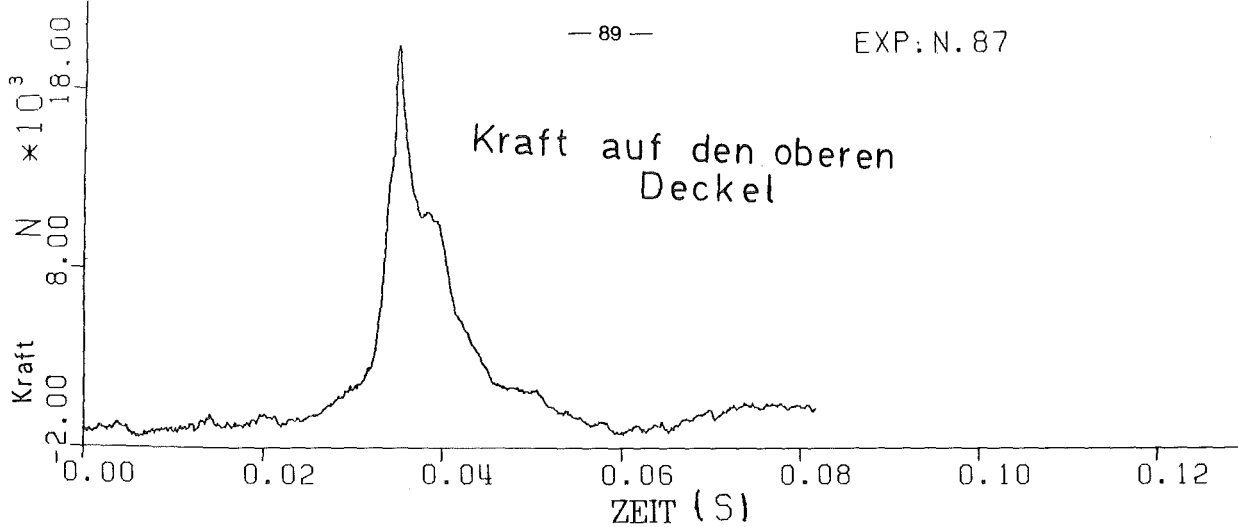


Abb.11.2- Mischungsoberflächen-, Strahl-, Kolbenbewegung und Kraft auf die obere Platte

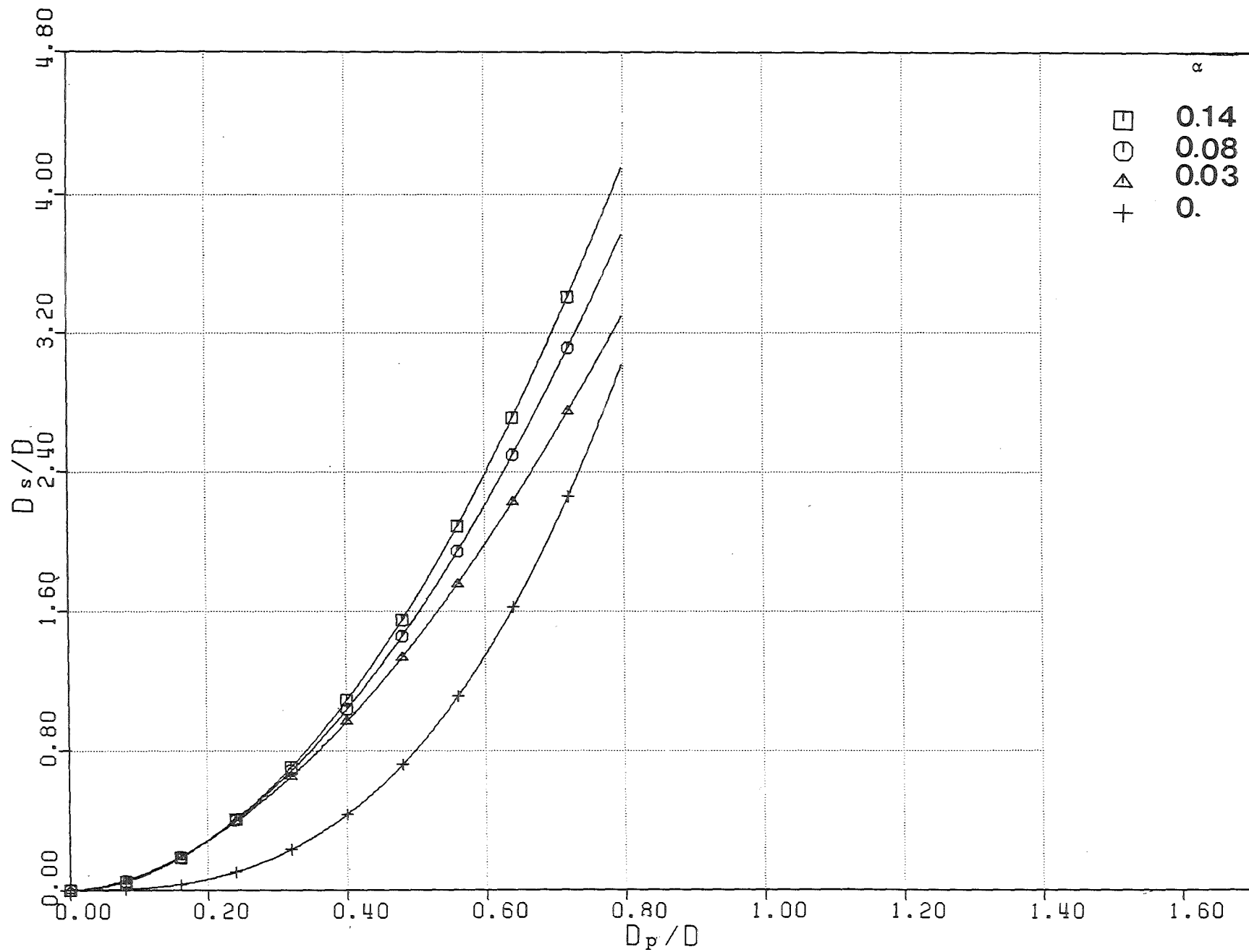


Abb.11.3- Mischungsflächenweg  
(für verschiedene Luftvolumenanteile)

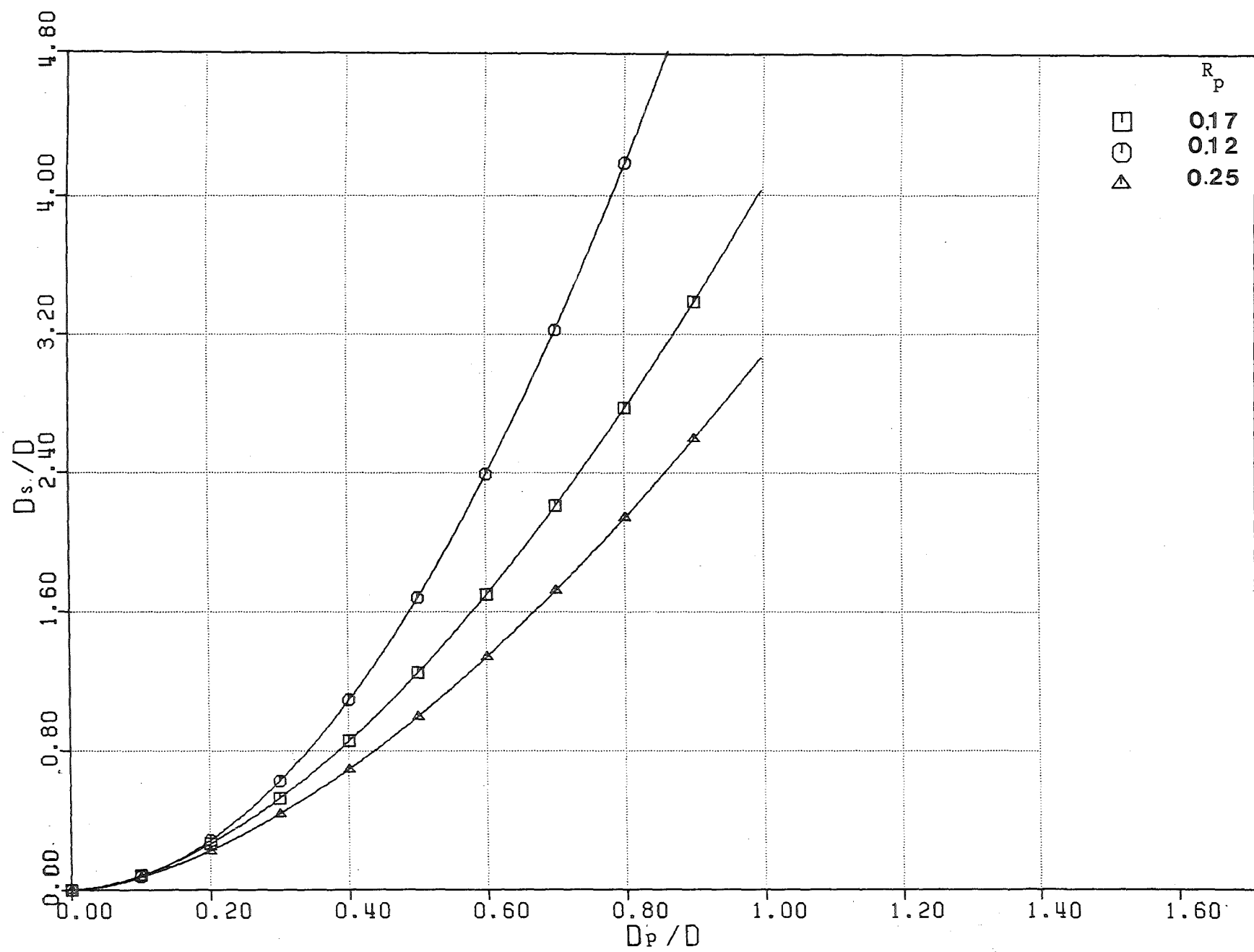


Abb.11.4- Mischungsoberflächenweg  
(für verschiedene Perforationsverhältnisse)

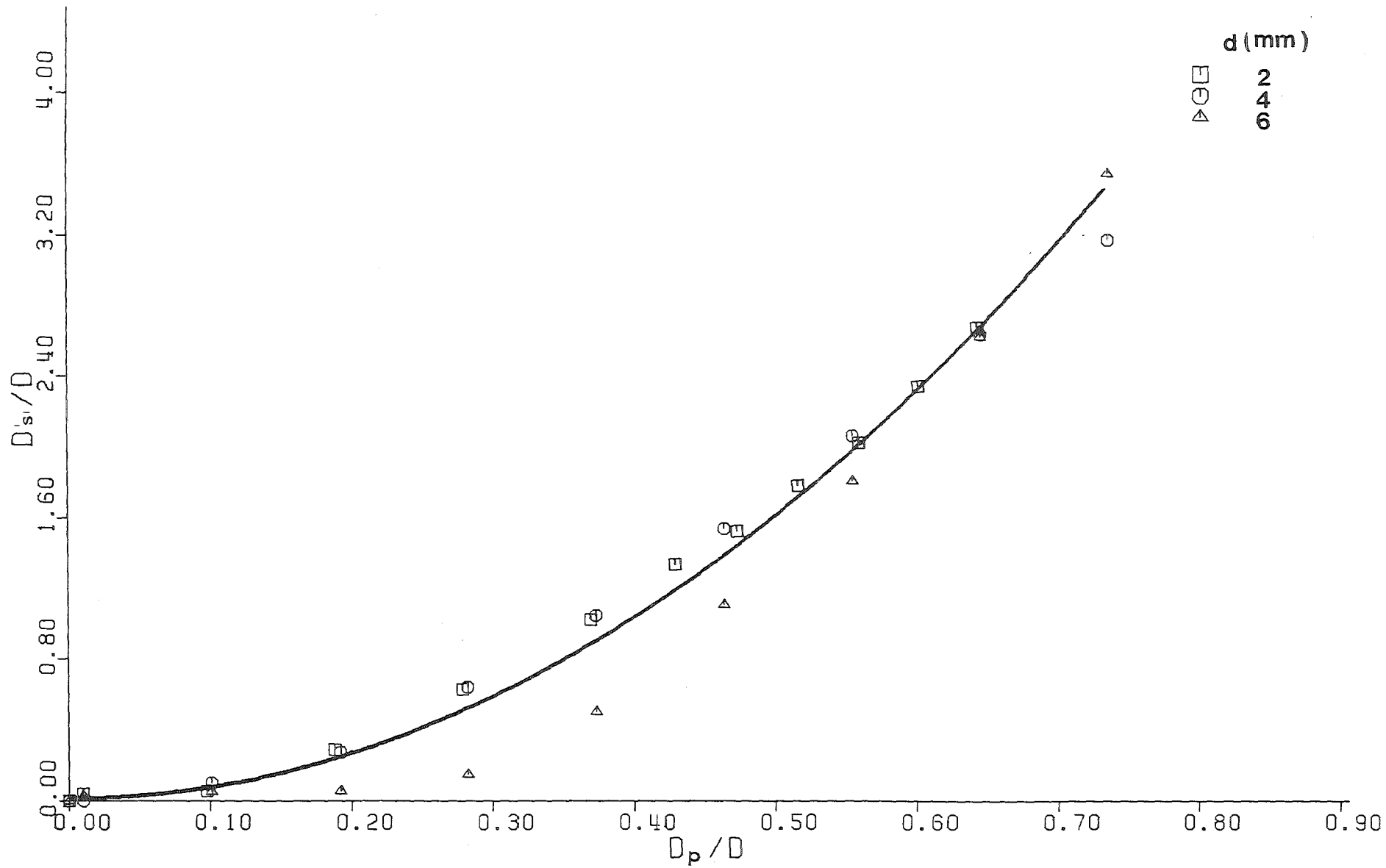


Abb.11.5- Mischungsoberflächenweg für verschiedene Größe der Luftblasen.

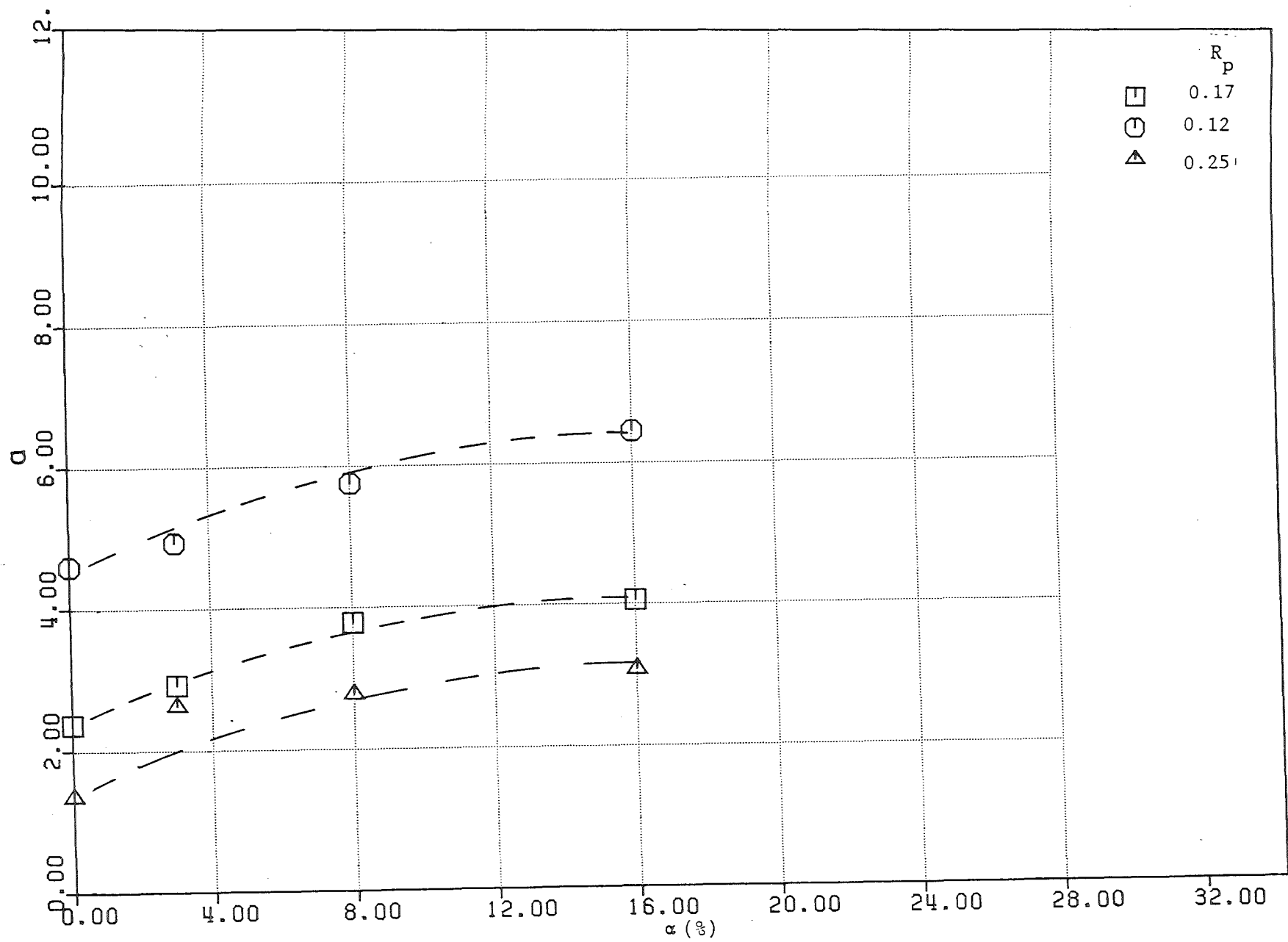


Abb.11.6- Versuche mit Explosionsmutter,  $R_p = 0.12, 0.17, 0.25$   
Anpassung des Koeffizienten  $a$  für den Mischungsoberflächenweg.

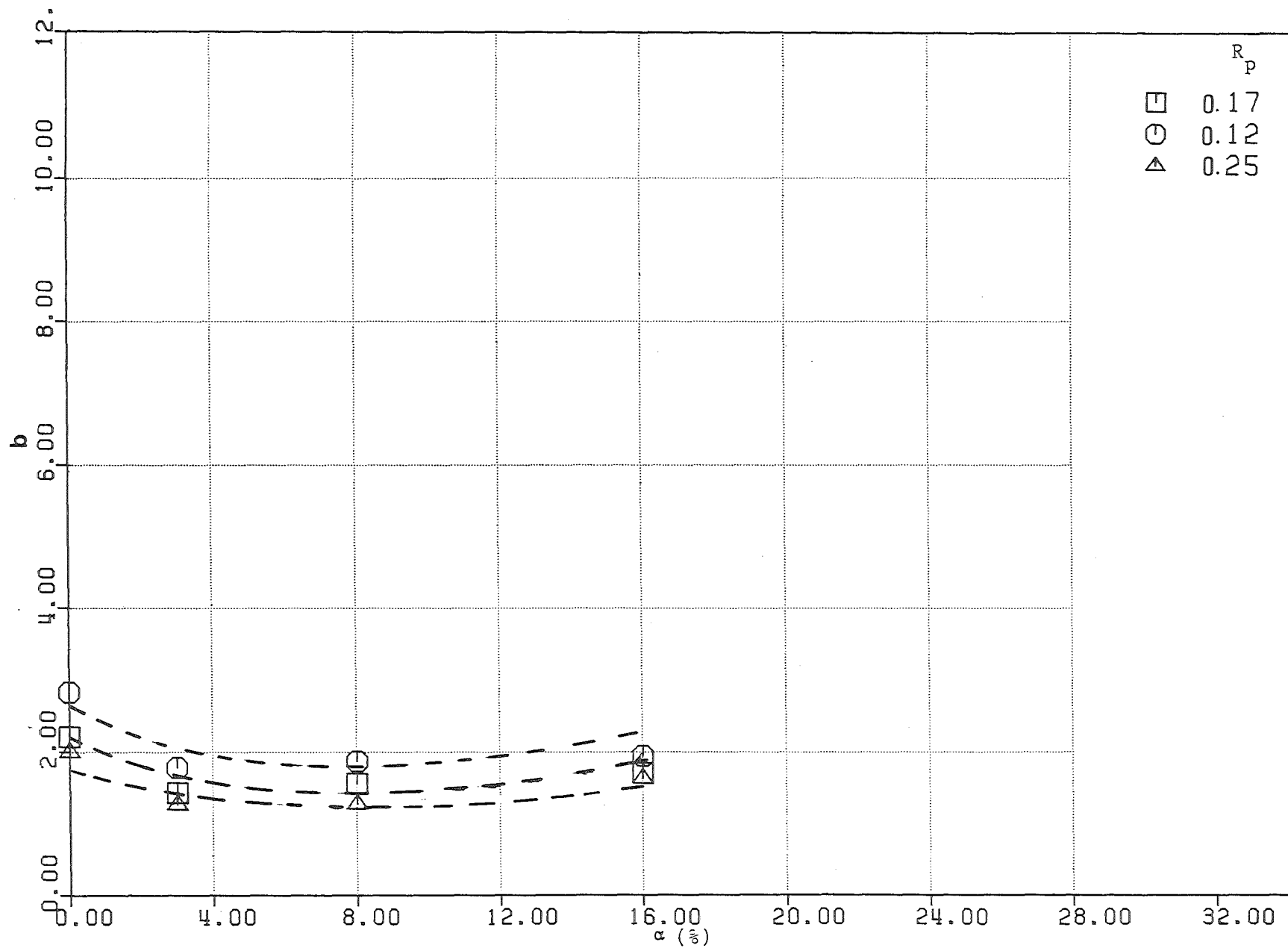


Abb.11.7- Versuche mit Explosionsmutter,  $R_p = 0.12, 0.17, 0.25$   
Anpassung des Koeffizienten  $b$  für den Mischungsflächenweg.

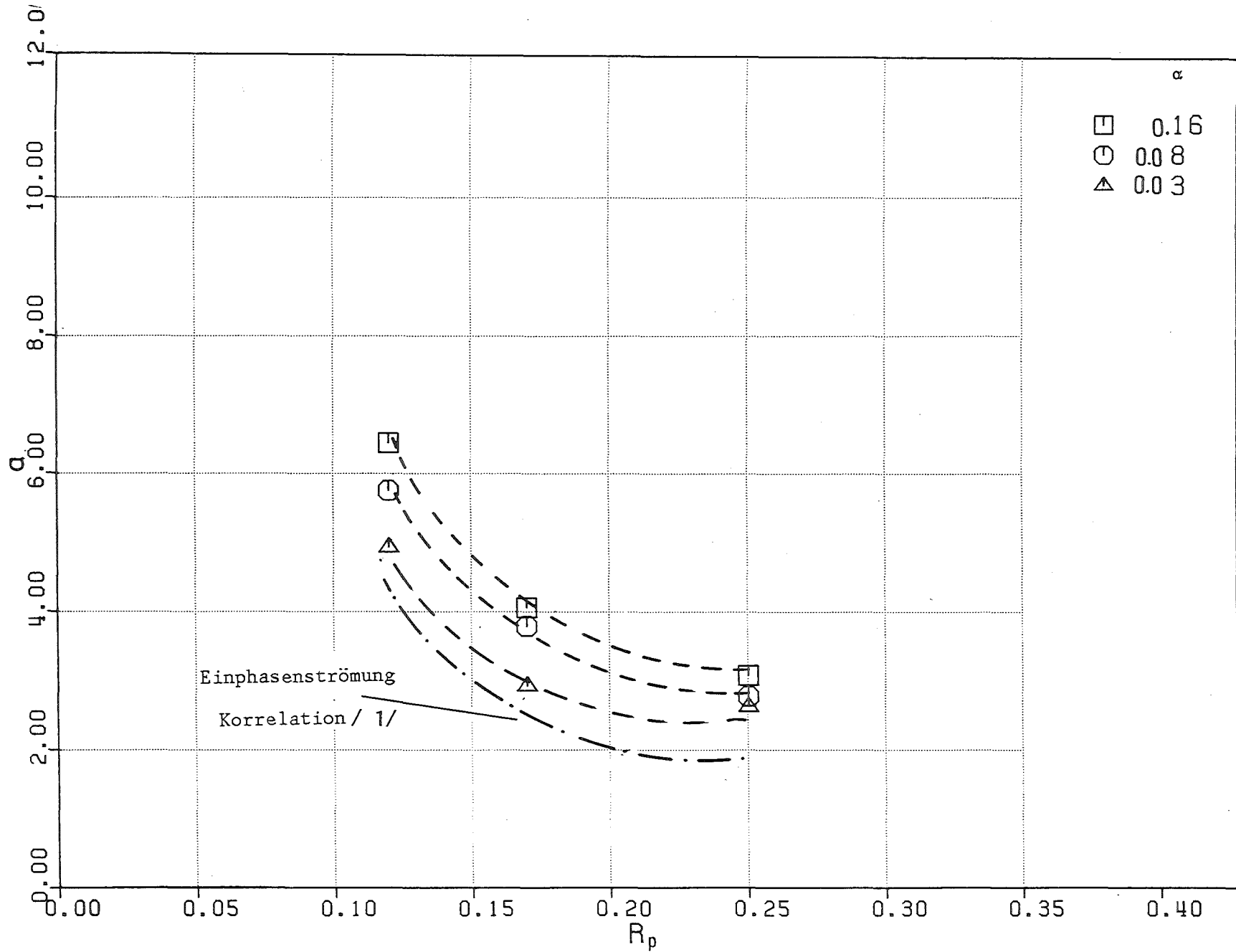


Abb.11.8- Versuche mit Explosionsmutter,  $\alpha = 0.03, 0.08, 0.16$   
 Anpassung des Koeffizienten  $\alpha$  für den Mischungsoberflächenweg.

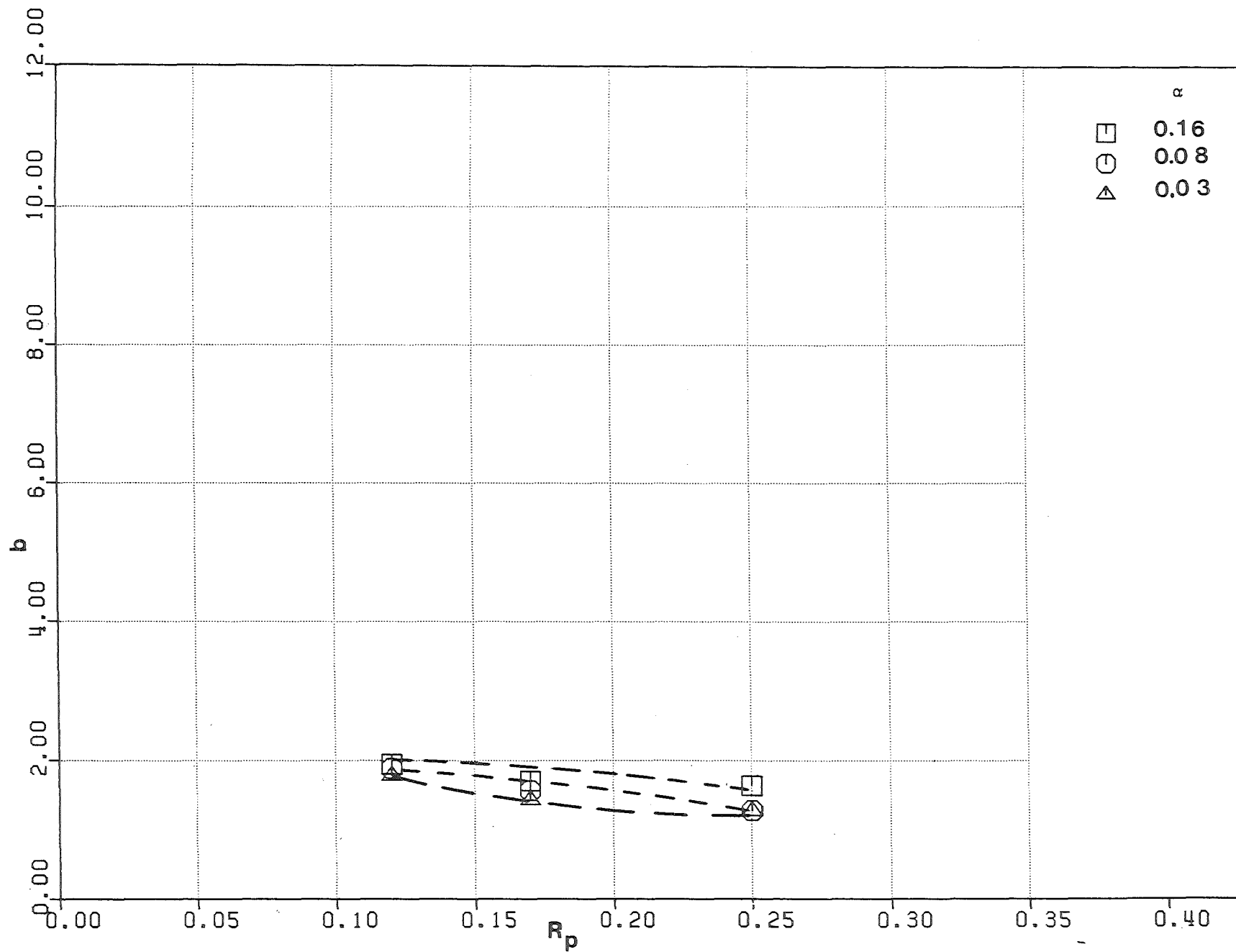


Abb.11.9 - Versuche mit Explosionsmutter,  $\alpha = 0.03, 0.08, 0.16$   
Anpassung der Koeffizienten  $b$  für den Mischungsoberflächenweg



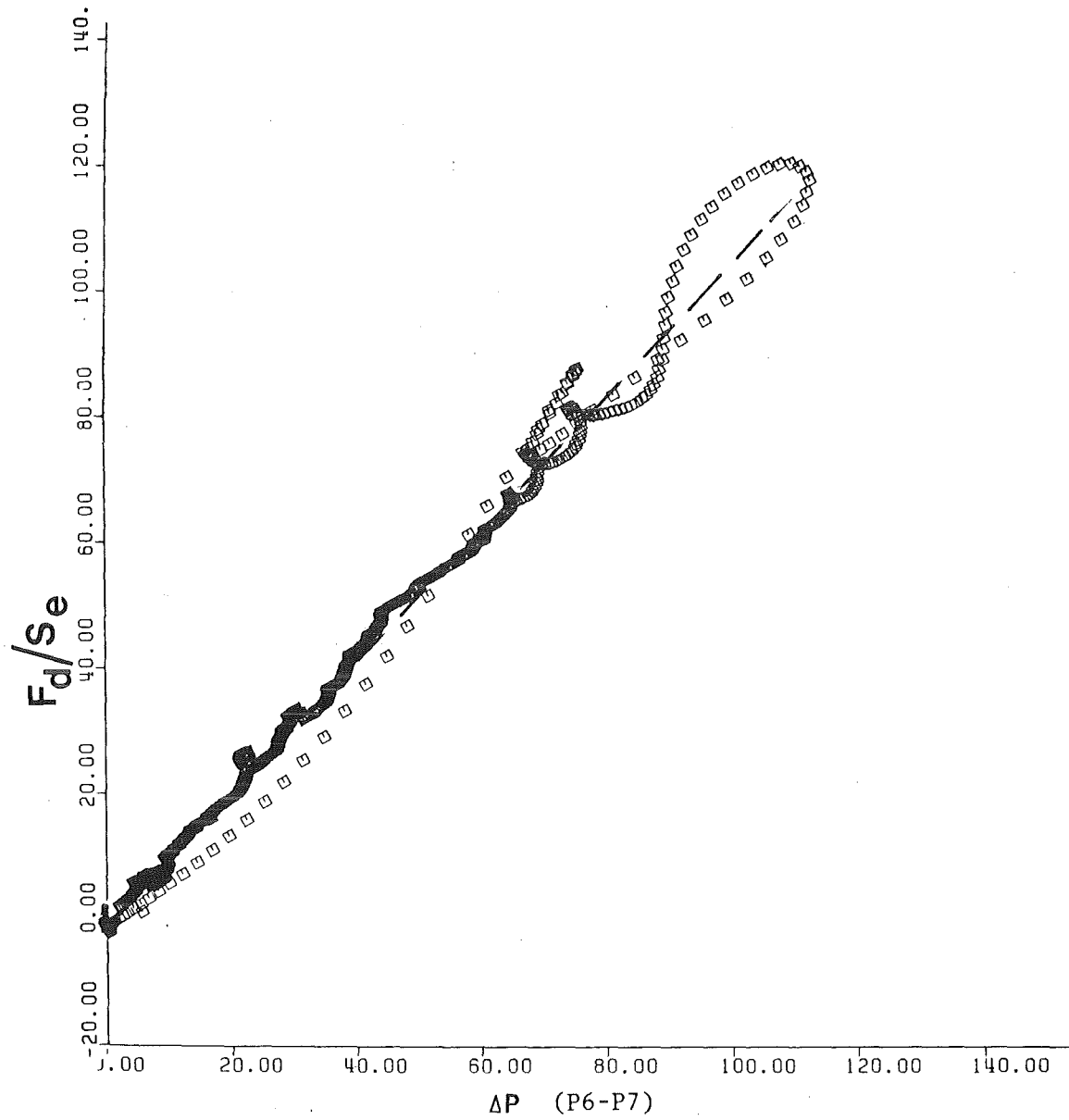


Abb. 12.1- Versuch Nr.105 - Vergleich des Verhältnisses der Kraft auf die Tauchplatte und der effektiven Tauchplattenoberfläche mit dem Druckverlust an der Tauchplatte (P6-P7).

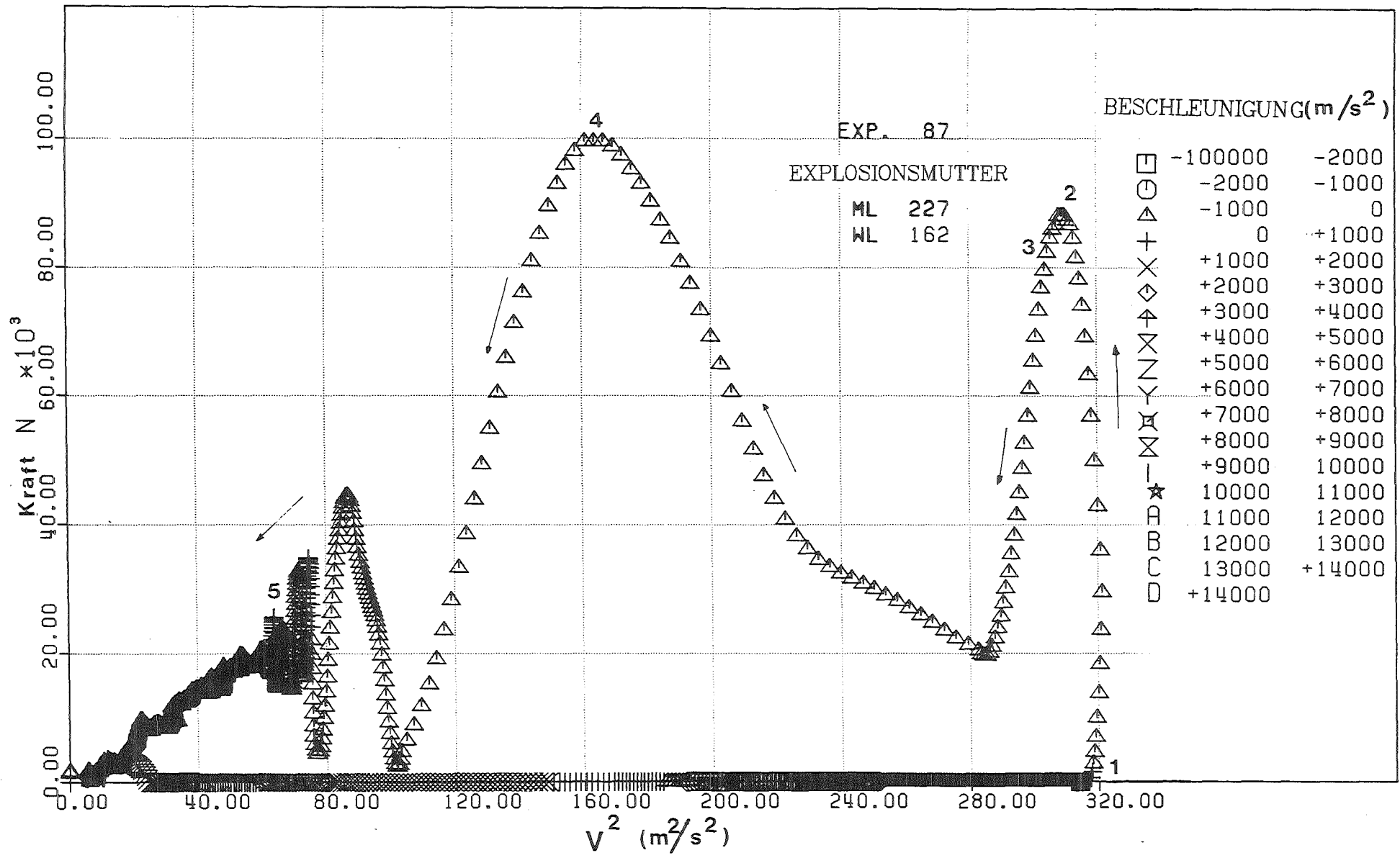


Abb.12.2- Versuch Nr. 87 -Kraft auf die Tauchplatte als Funktion des Quadrats der Kolbengeschwindigkeit.

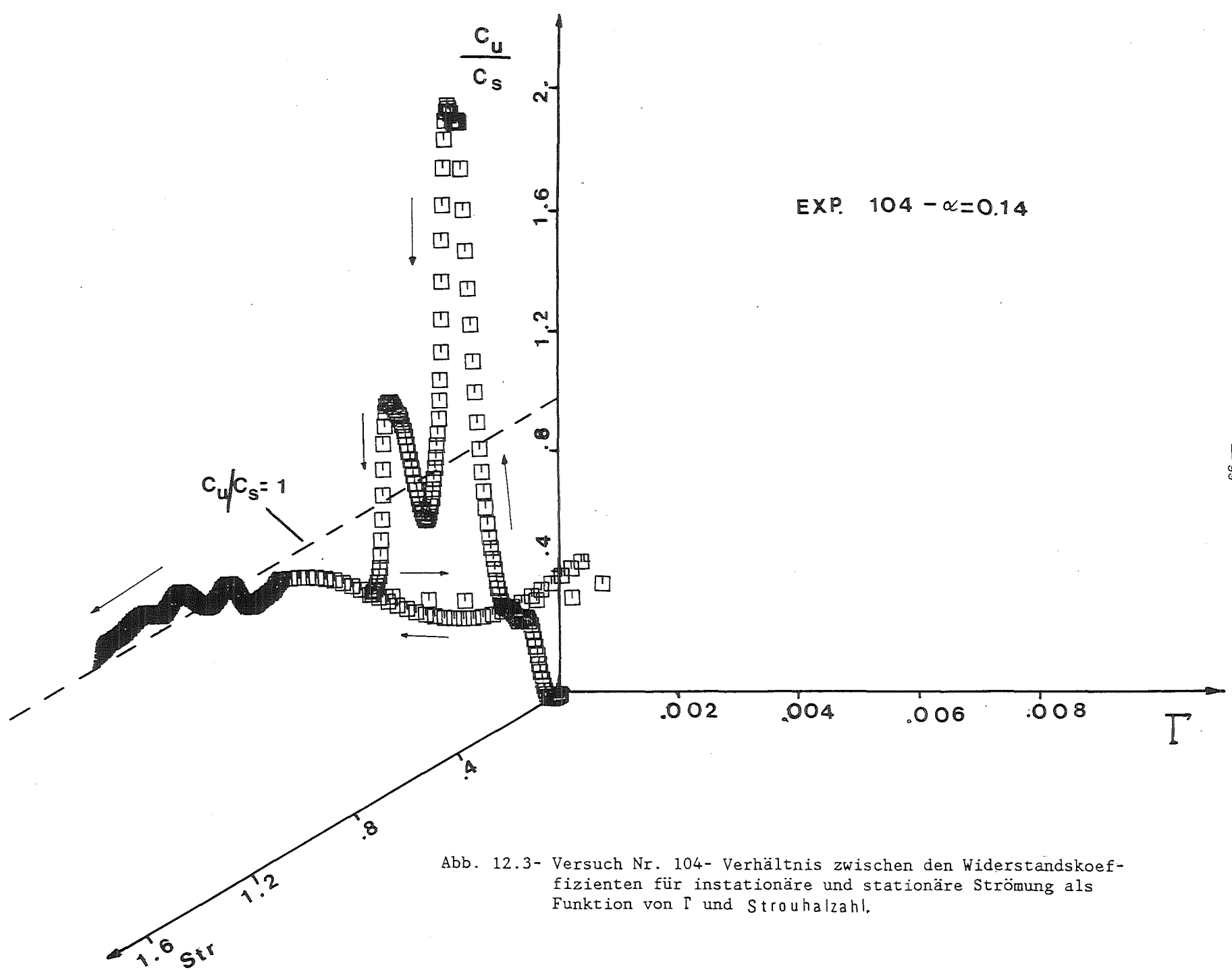


Abb. 12.3- Versuch Nr. 104- Verhältnis zwischen den Widerstandskoeffizienten für instationäre und stationäre Strömung als Funktion von  $\Gamma$  und Strouhalzahl.

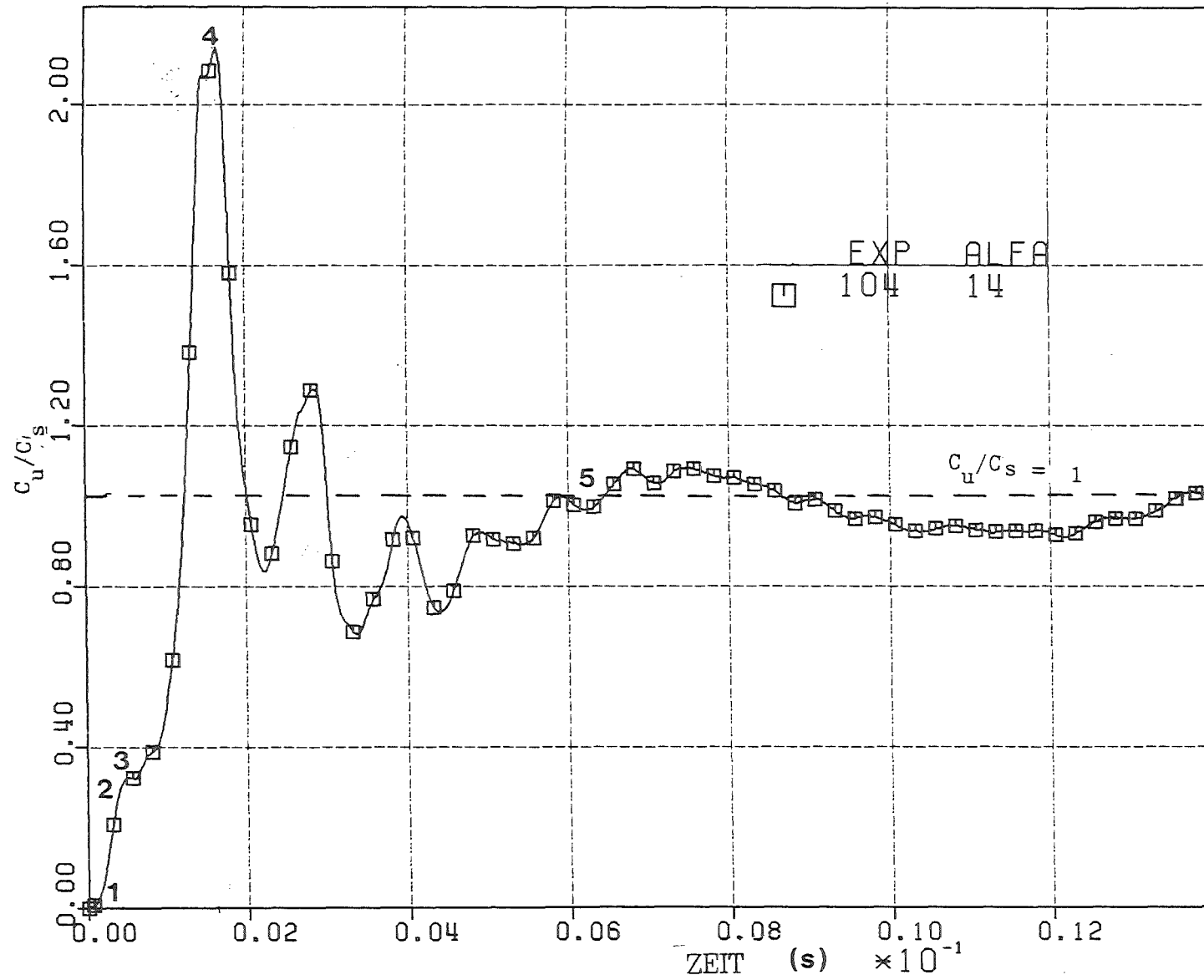


Abb. 12.4- Versuch Nr. 104- Verhältnis zwischen den Widerstandskoeffizienten bei instationärer und stationärer Strömung als Funktion der Zeit (Zweiphasenströmung).

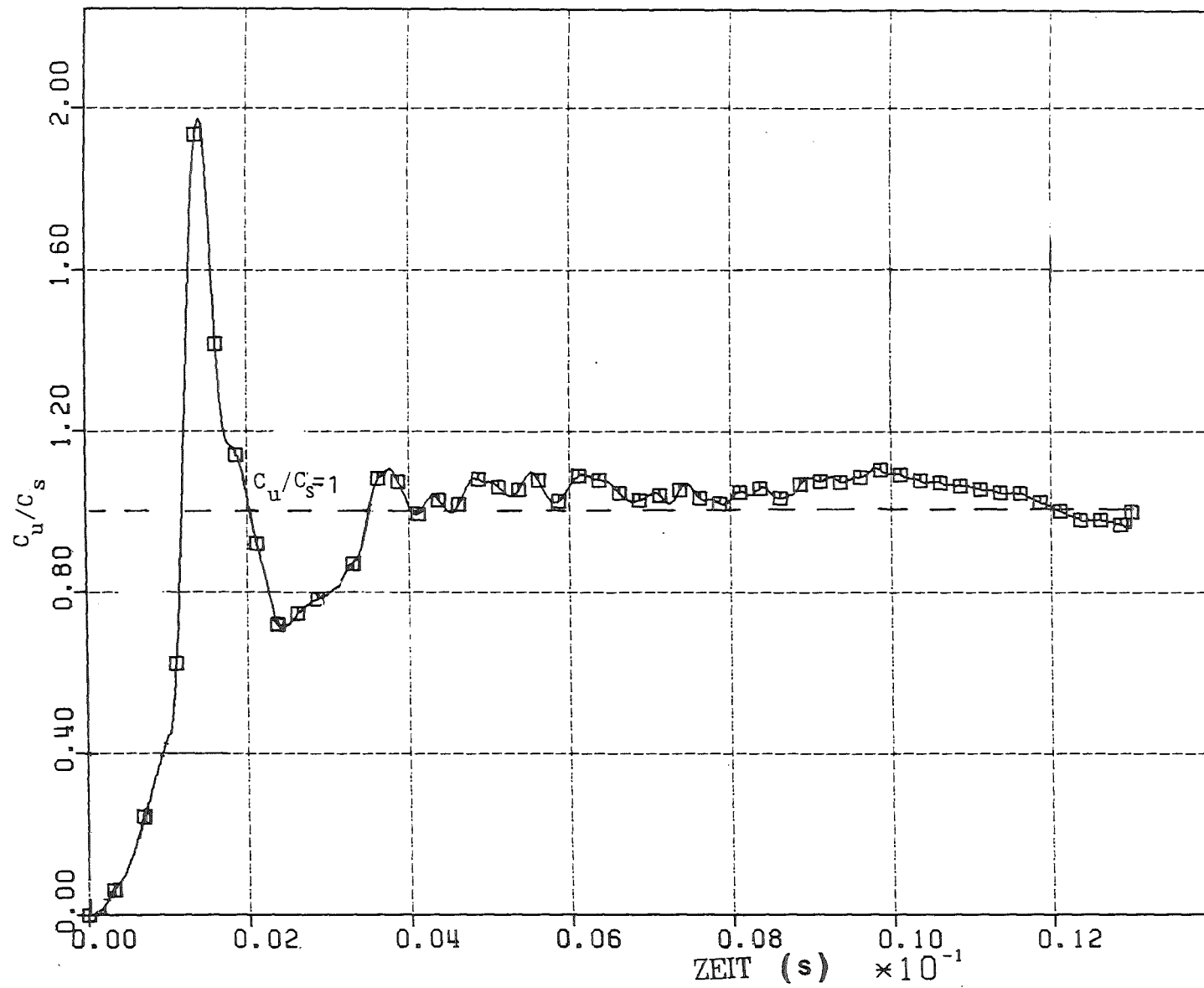


Abb. 12.5- Versuch Nr. 12 - Verhältnis zwischen den Widerstandskoeffizienten bei instationärer und stationärer Strömung als Funktion der Zeit (Einphasenströmung).

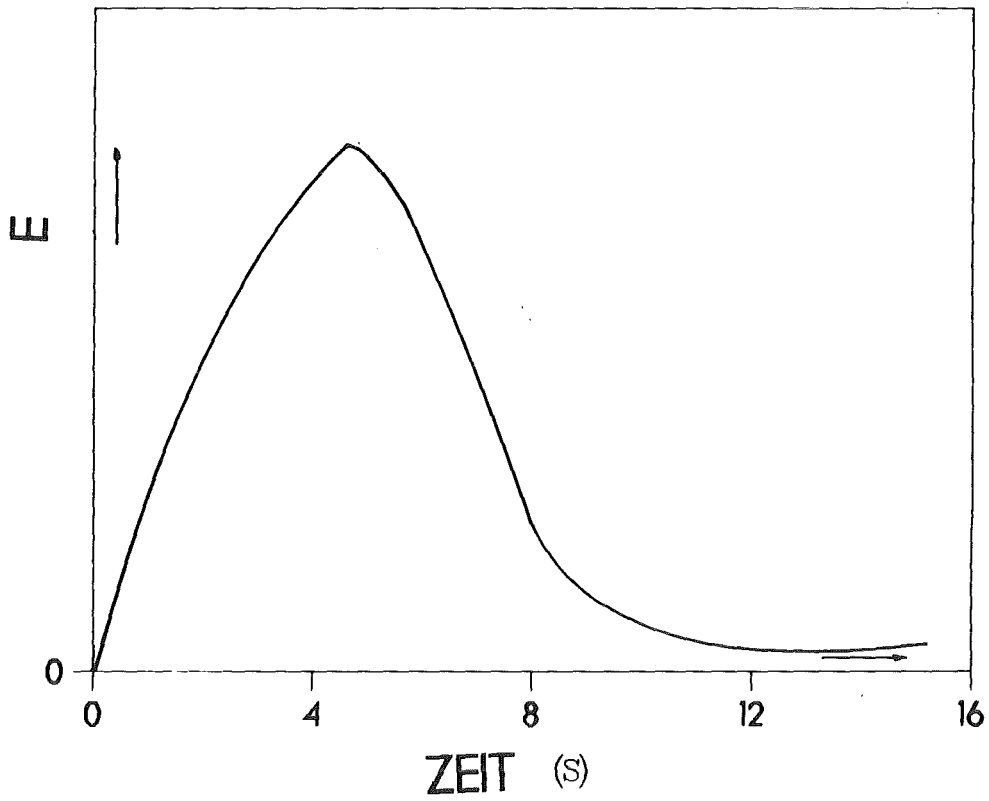


Abb. 12.6- Zeitlicher Verlauf der Energie des Anfahrwirbels.

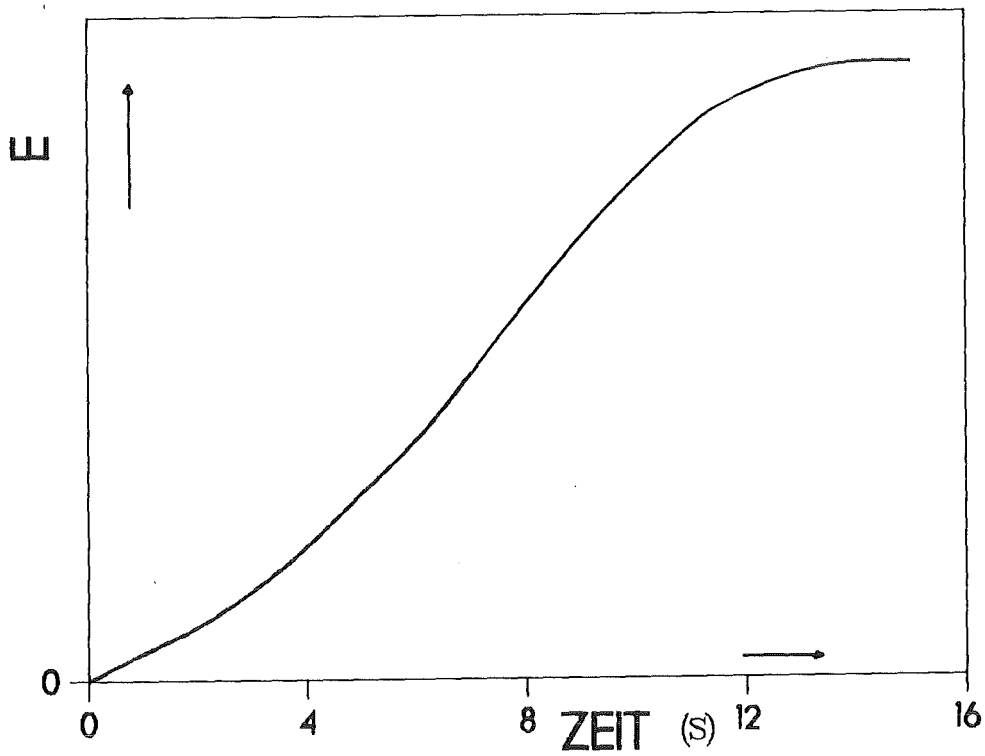


Abb. 12.7- Zeitlicher Verlauf der Energie der Strömungseinschnürung.

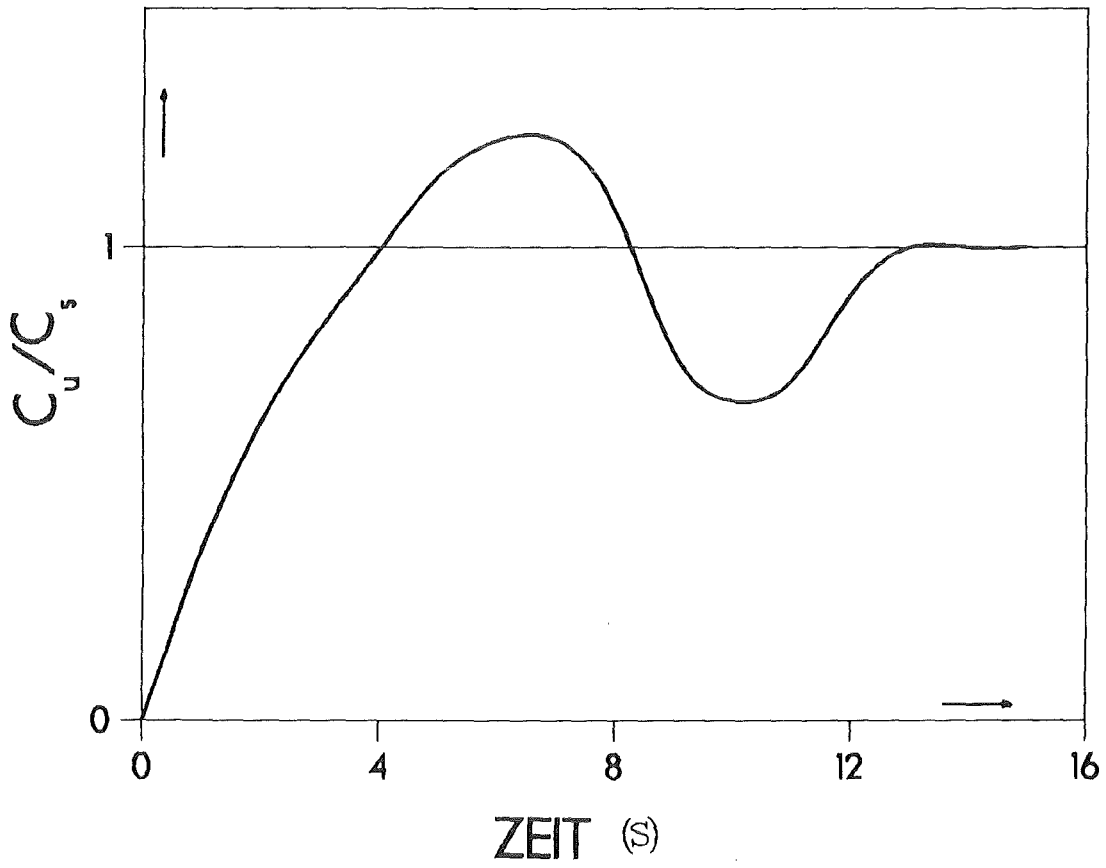


Abb. 12.8- Zeitlicher Verlauf des Verhältnisses der Widerstands-  
koeffizienten bei instationärer und stationärer Strömung  
nach Smolderen et al. /37,38/.

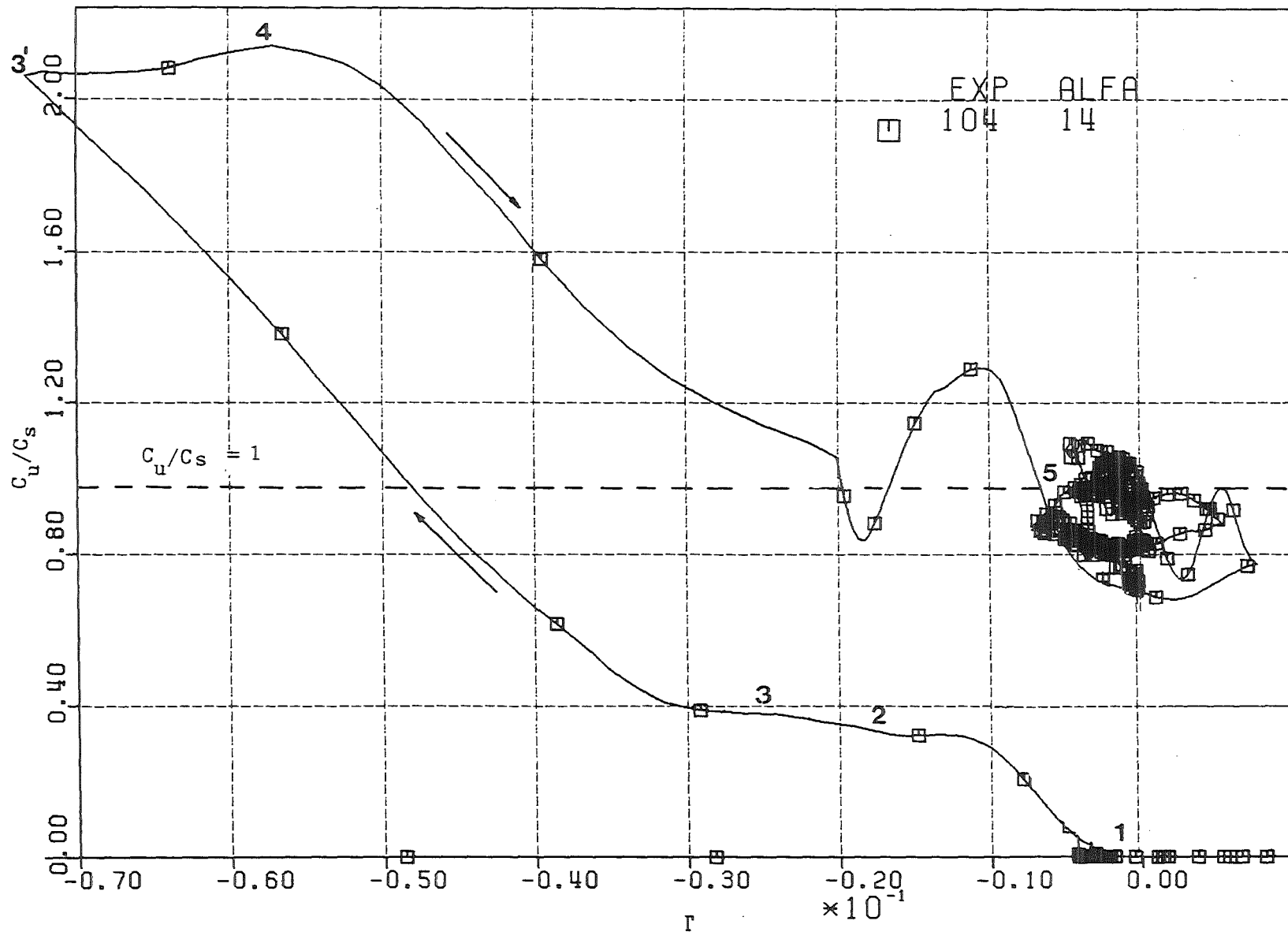


Abb. 12.9- Versuch Nr.104 - Verhältnis zwischen den Widerstandskoeffizienten bei instationärer und stationärer Strömung als Funktion von  $\Gamma$ .



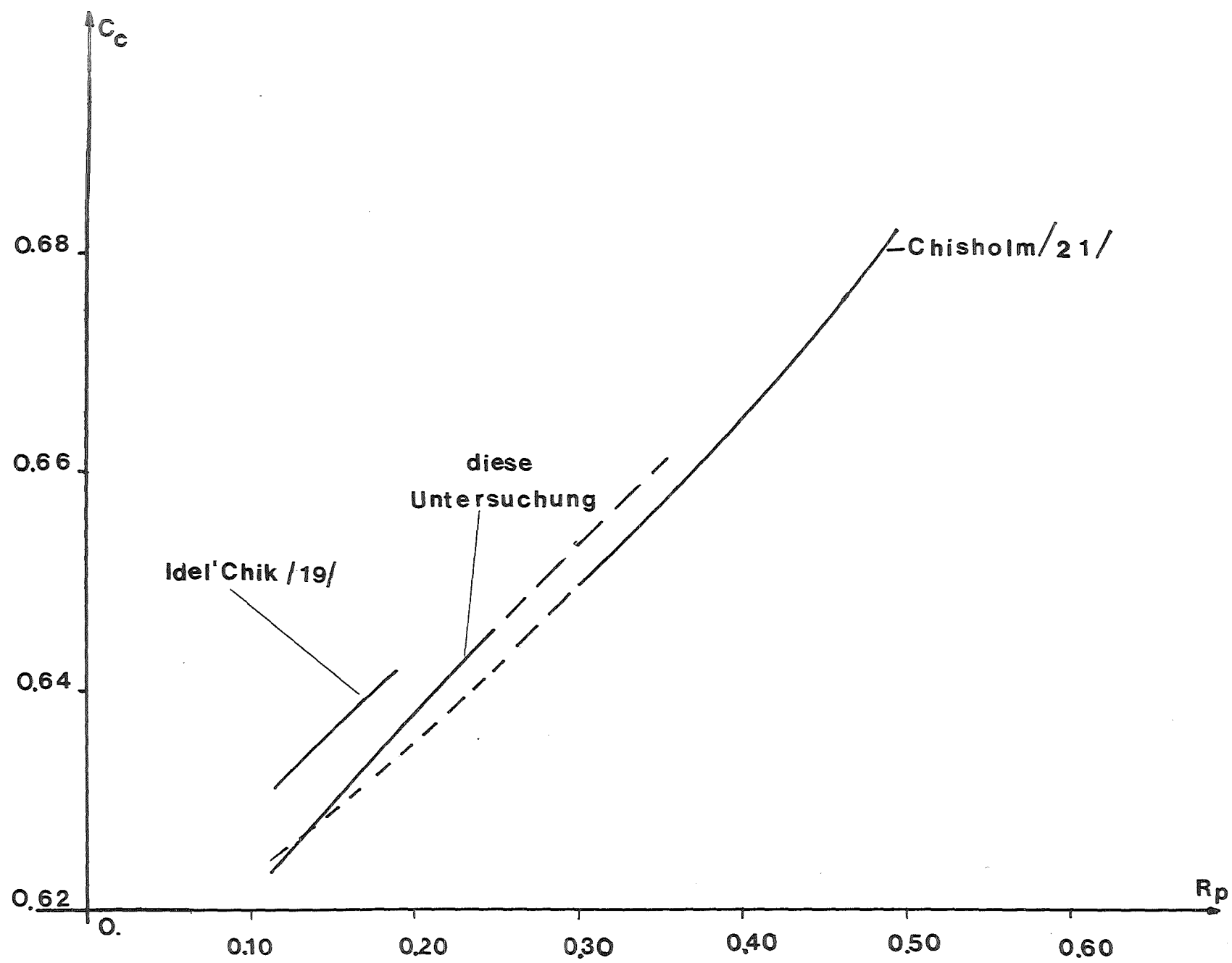


Abb.12.10-Kontraktionskoeffizient als Funktion des Perforationsverhältnisses.

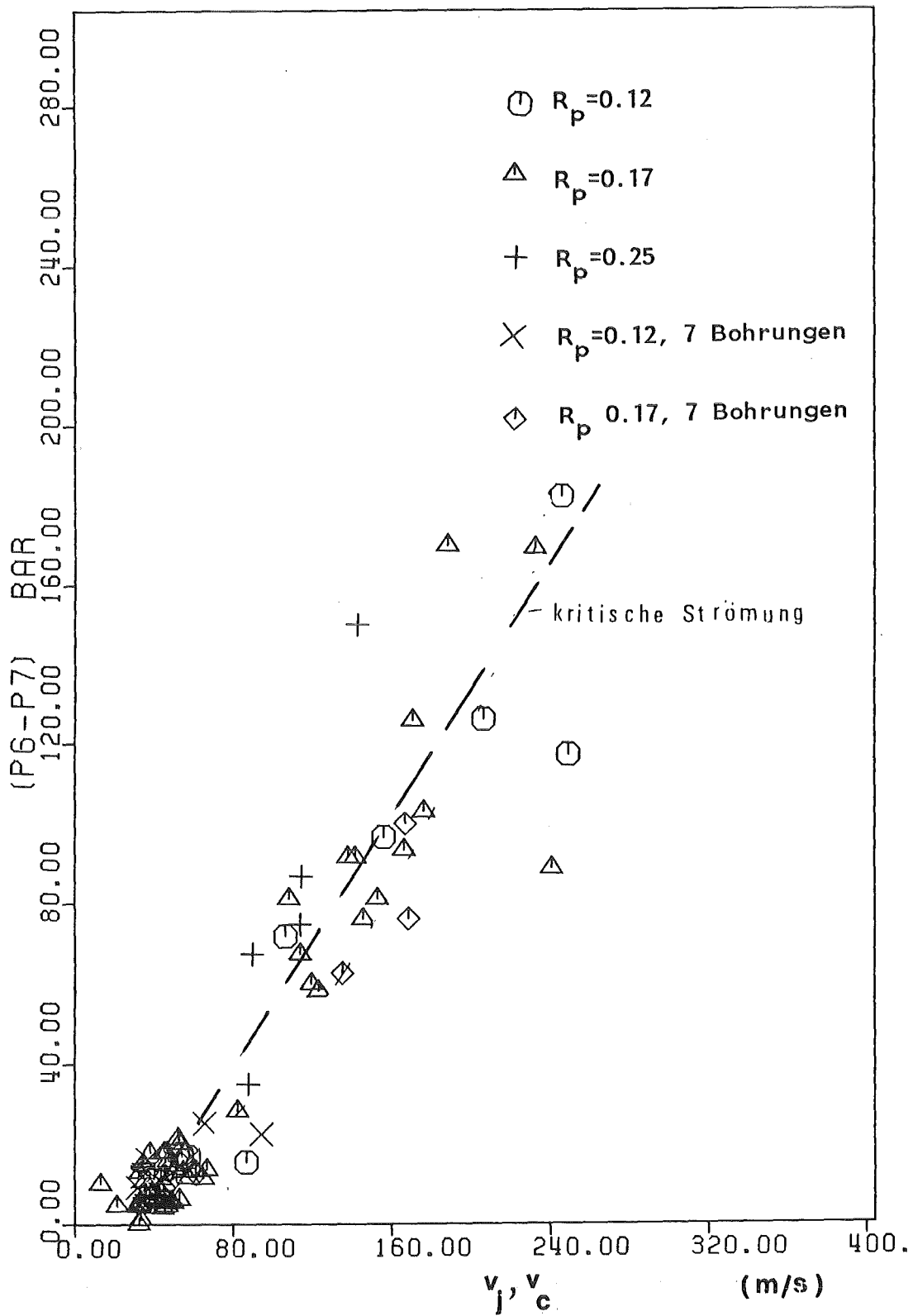


Abb. 12.11-Druckdifferenz P6-P7 als Funktion der Strahlgeschwindigkeit (kritische Strömung).

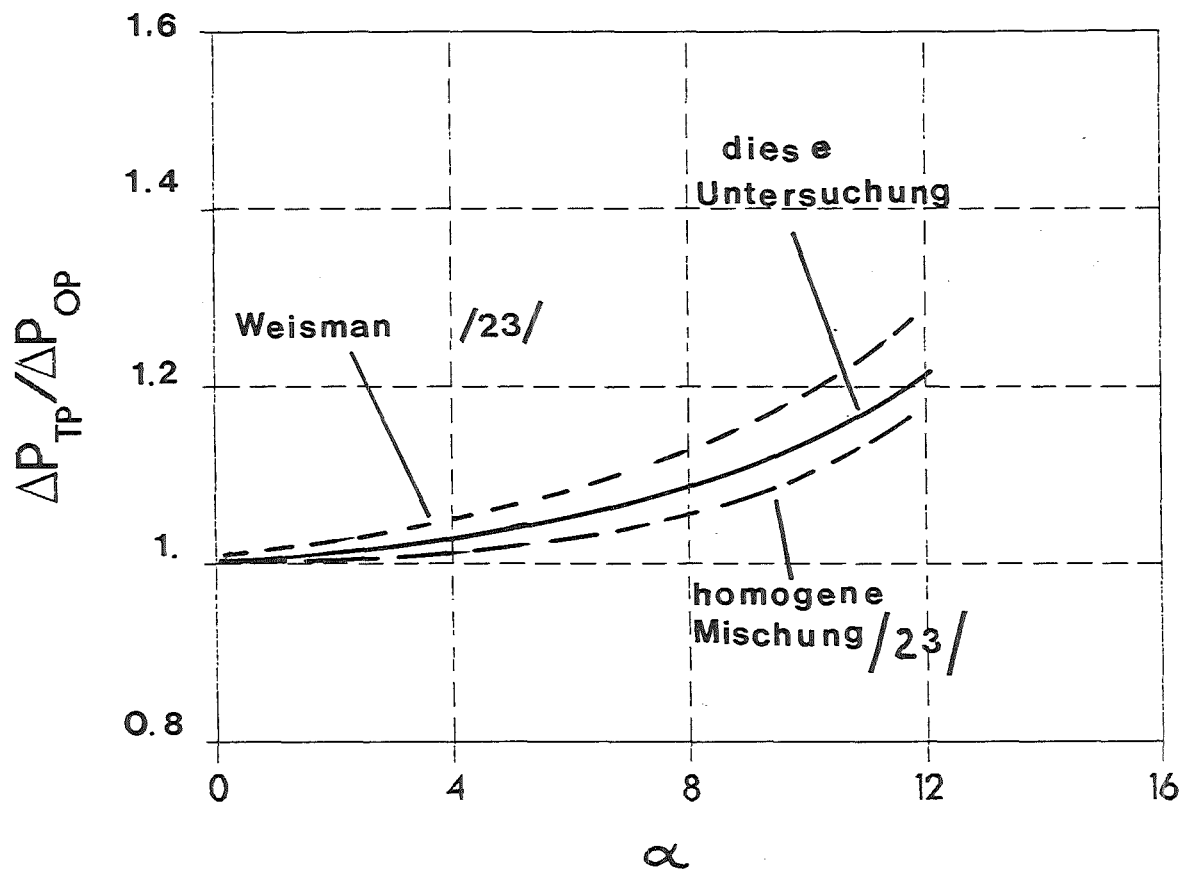


Abb. 12.12-Verhältnis zwischen den Druckdifferenzen für Zweiphasen- und Einphasenströmung als Funktion des Luftvolumenanteiles.

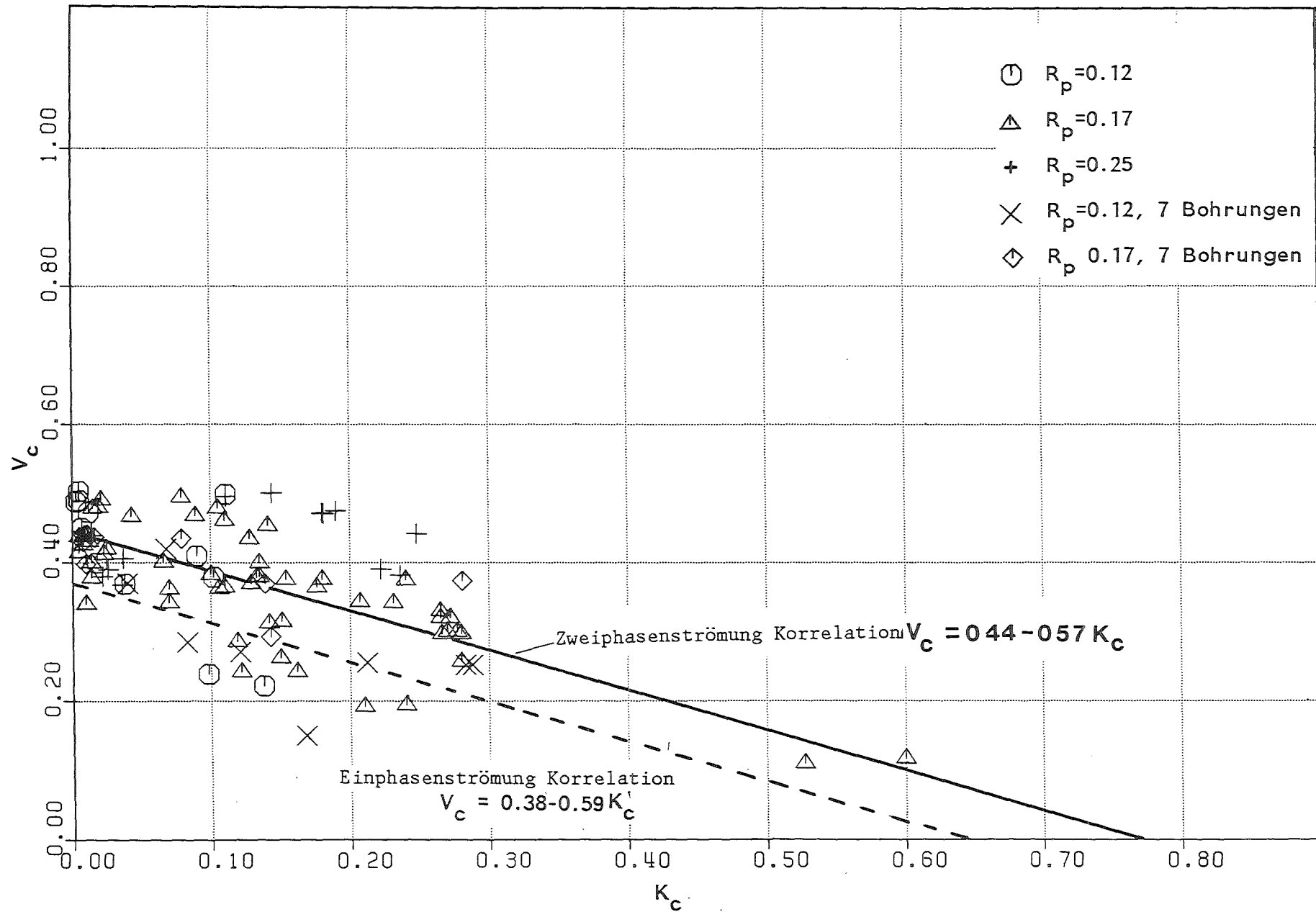


Abb.13.1- Kavitationsvolumen als Funktion der Kavitationszahl bei den Zweiphasenströmungsversuchen.

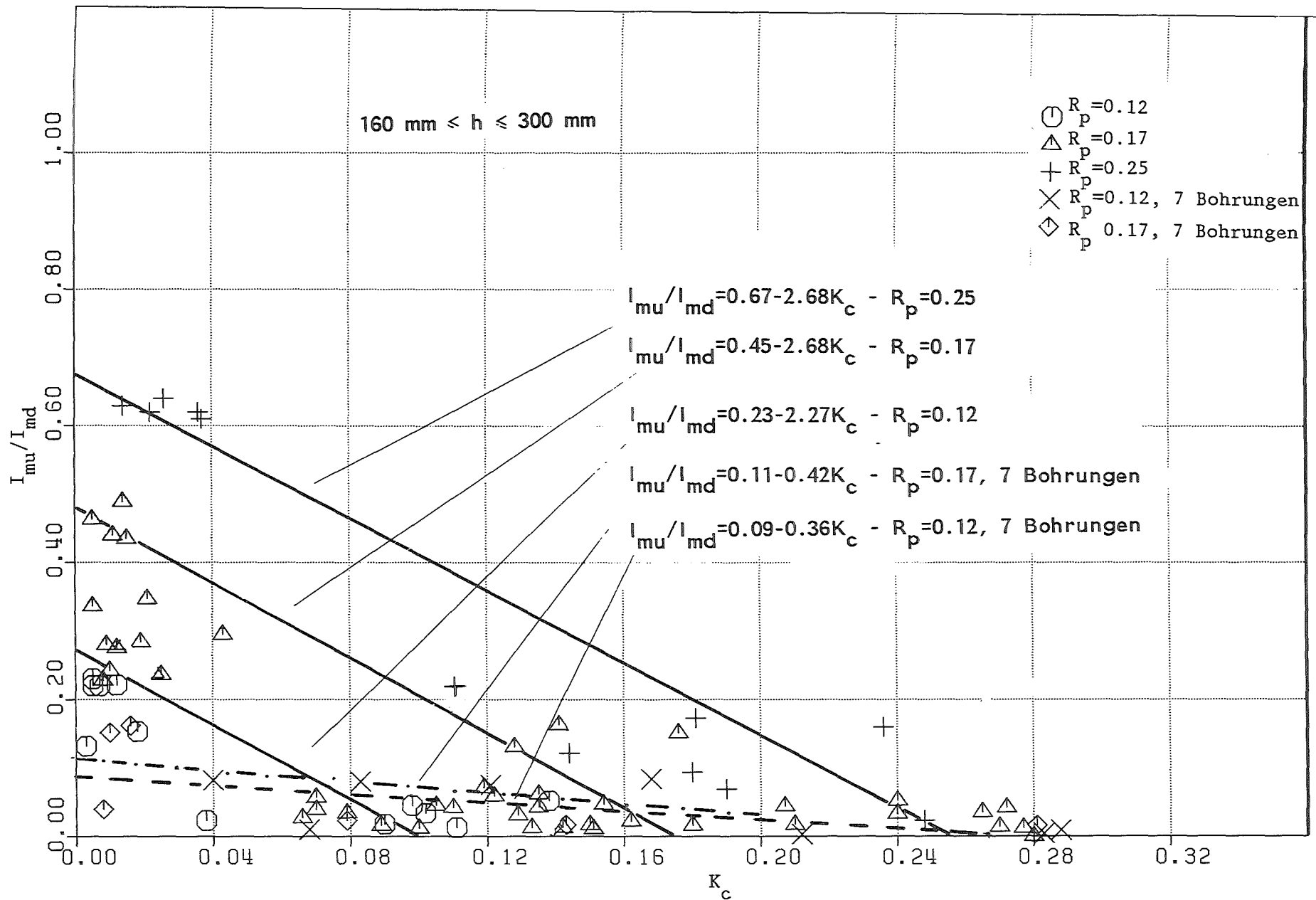


Abb. 13.2- Verhältnis zwischen den Gesamtpulsen auf die obere Platte und auf die Tauchplatte als Funktion der Kavitationszahl (Hohes Mischungs-niveau).

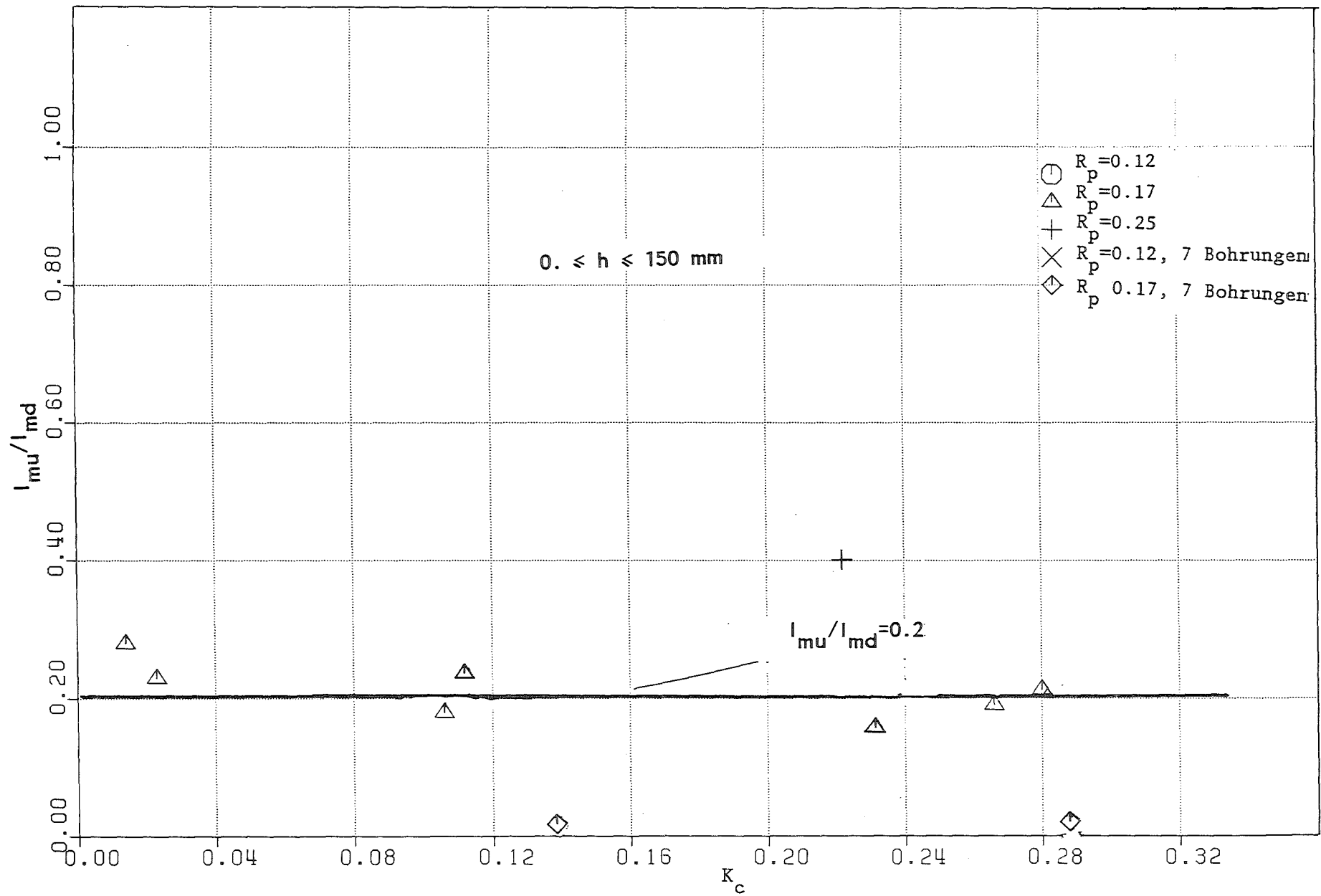


Abb. 13.3- Verhältnis zwischen den Gesamtpulsen auf die obere Platte und auf die Tauchplatte als Funktion der Kavitationszahl (Niedriges Mischungsniveau).

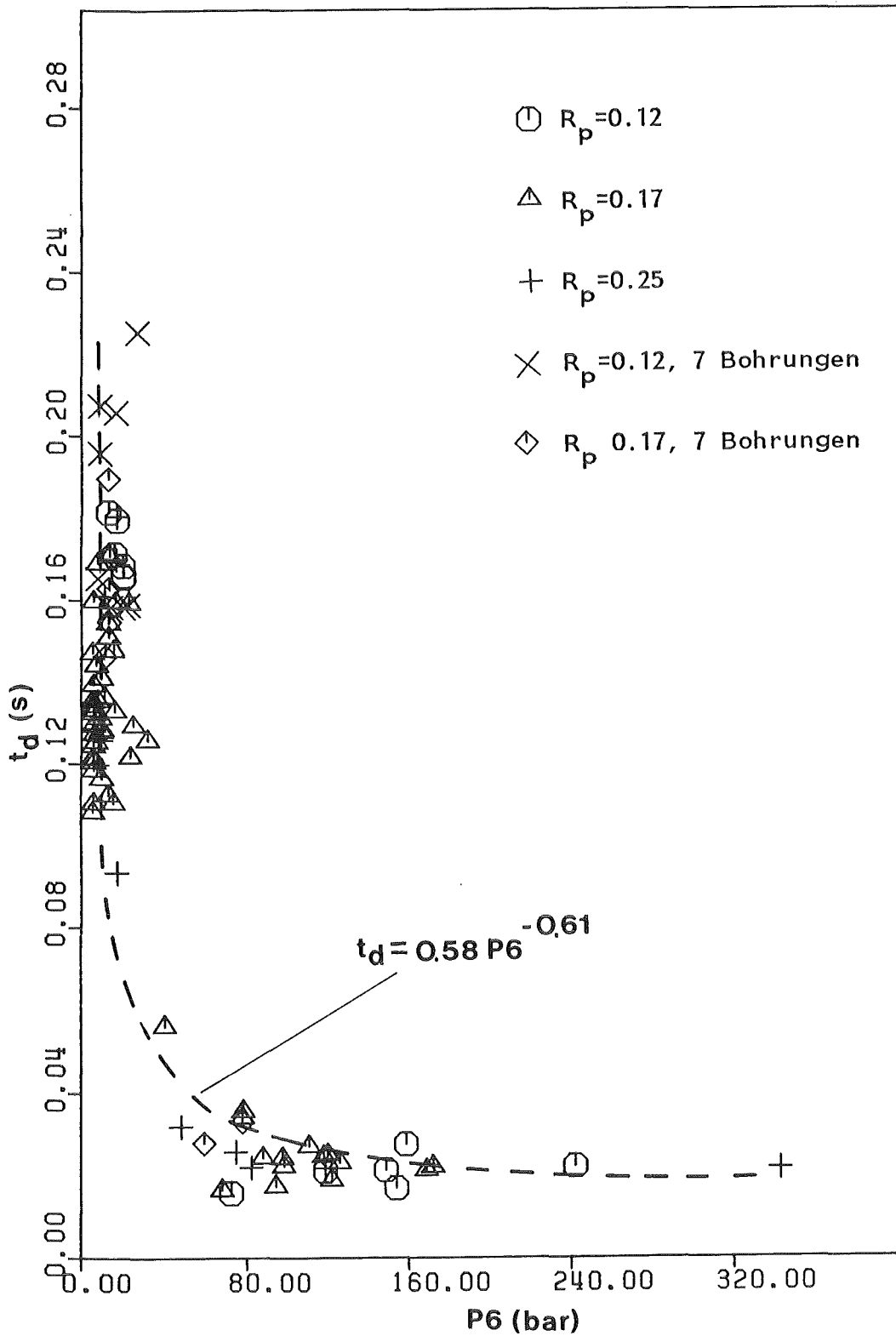


Abb. 13.4- Zeitverzögerung zwischen der Kraft auf die obere Platte und der Kraft auf die Tauchplatte als Funktion des höchsten Druckes im Stahlzylinder.





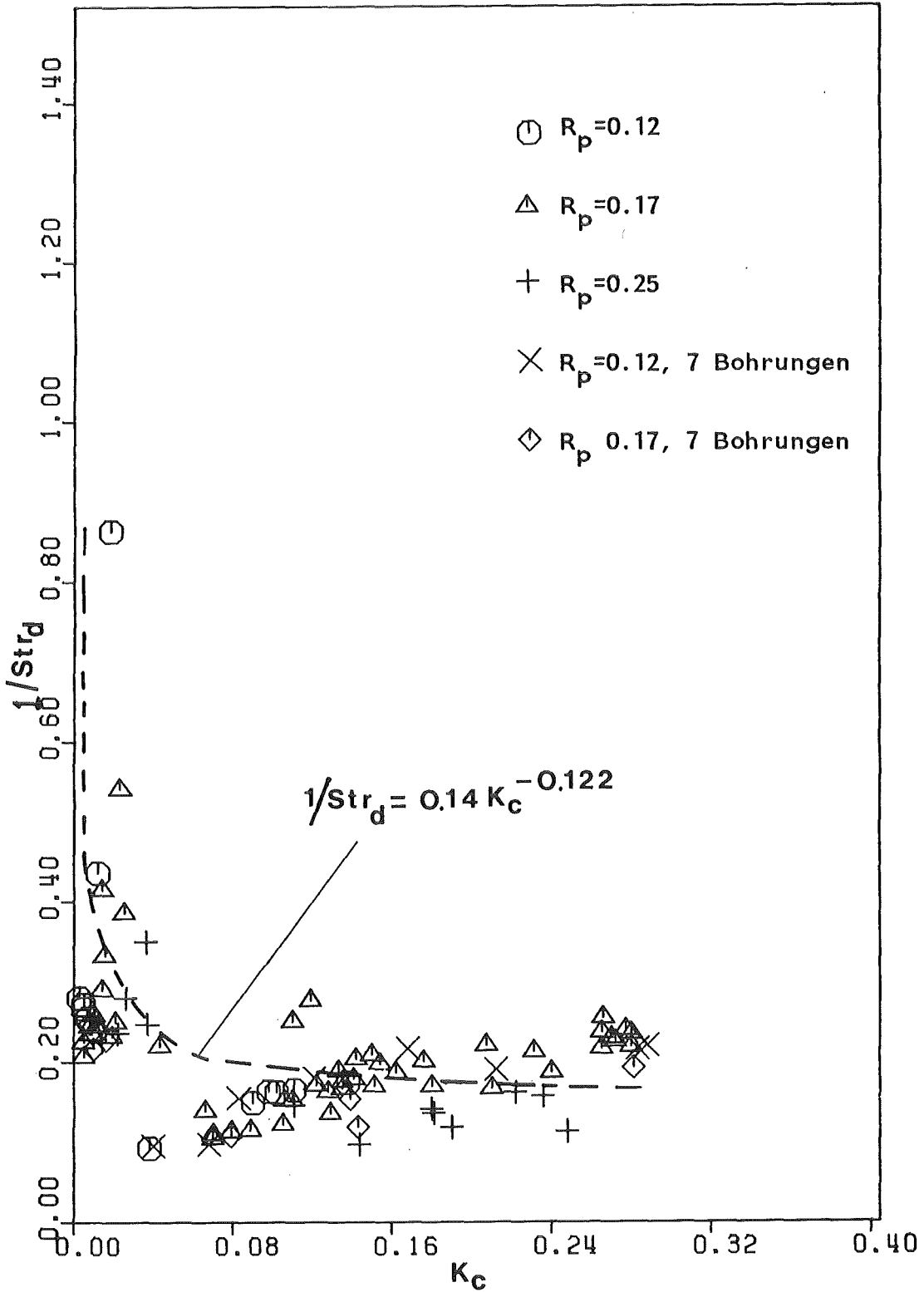


Abb. 13.6- Dimensionslose Zeitverzögerung ( $Str_d$ ) zwischen der Kraft auf die obere Platte und der Kraft auf die Tauchplatte als Funktion der Kavitationszahl.

## A1.- Versuchstand

-----

Die Abbildungen A1.1 bis A1.8 sind Photographien von Details des Versuchstandes.

In Abb. A1.2 kann man den durchsichtigen Plexiglasteil sehen.  
Die Abb. A1.4 stellt den unteren Stahlzylinder dar.

In Abb. A1.5 ist die Explosionsmutter dargestellt.

Die Kolben - aus PVC bei den Versuchen mit Ventilen und aus Hartaluminium bei denen mit Explosionsmutter - werden in den Abbildungen A1.6 und A1.8 gezeigt.

### A1.1 - Tauchplatten

-----

Da der Einfluß des Perforationsverhältnisses auf die Strömung und die Kräfte, welche auf die Strukturen übertragen werden, erforscht werden sollte, wurden drei Einzellochplatten mit folgenden Perforationsverhältnissen ( $R_p$ ) :

0.12            0.171            0.25

untersucht.

Um die Wechselwirkung mehrerer nebeneinanderströmender Fluidstrahlen zu untersuchen, wurden auch Platten mit sieben Bohrungen in dreieckiger Anordnung verwendet. Zwei verschiedene Perforationsverhältnisse wurden für diese Platten untersucht ( $R_p = 0.12$   $R_p = 0.171$ )  
Um das Verhältnis zwischen Plattendicke und Durchmesser der Bohrungen

einzuhalten, wurde die Dicke dieser Platten kleiner als die der Einzellochplatten gewählt.

Eine Liste der verwendeten Tauchplatten und deren geometrischen Einzelheiten ist in Tab. A1.1 angegeben.

In Abb. A1.9 und in dem Foto A1.7 ist die Tauchplatte mit einem Perforationsverhältnis  $R_p$  von 0.17 dargestellt.

Nr.	Anzahl der Bohrungen	Perforationsverhältnis ( $R_p$ )	Durchmesser der Bohrungen (mm)	Dicke (mm)	Gesamtdurchmesser (mm)
1	1	0.17	45.5	38.8	110
2	1	0.25	55.0	38.8	110
3	1	0.12	38.1	38.8	110
4	7	0.12	12.8	13.1	102
5	7	0.17	17.2	14.7	102

Tabelle A1.1 - Liste der Tauchplatten

## A2.- Instrumentierung

-----

Die Instrumentierung wurde schon im Kap. 7 diskutiert. Hier werden zusätzliche Einzelheiten dargestellt.

Das Foto A2.1 zeigt die Instrumentierung .

### A2.1 - Kraftaufnehmer

-----

Die Kräfte wurden mit piezoelektrischen Meßunterlagscheiben gemessen, die zwischen den Meßplatten und der Struktur eingebaut wurden. Diese Kräfte sind an zwei verschiedenen Stellen gemessen worden : an der Tauchplatte und an der oberen Platte.

(s. Abb. A2.2).

Die Kraftaufnehmer werden durch dünne Schrauben mit der Struktur verbunden. Die kleine Kraft dieser Schrauben kann vor jedem Versuch bei der Eichung des Nullpunkts am Signalverstärker kompensiert werden.

Eine Liste der verwendete Kraftaufnehmer ist in Tab A2.1 angegeben.

A2.2 - Druckaufnehmer

-----

Die Position der Druckaufnehmer im unteren und oberen Zylinder für die Versuche mit Ventil bzw. mit Explosionsmutter sind in den Tabellen A2.2, A2.3 angegeben. Die gemessene Drücke sind :

P1- Druck unter dem Kolben.

Bei den Versuchen mit Explosionsmutter ist dies der Druck, der in der Kammer unter dem Kolben herrscht. Bei den Versuchen mit Ventil befindet sich der Kolben am Versuchsanfang ganz unten im Zylinder, dadurch kann der P1-Aufnehmer den Druck unter dem Kolben erst nach einem Kolbenweg von etwa 100 mm messen.

P2- Druck oberhalb des Kolbens.

Bei den Versuchen mit Ventil befand sich dieser Aufnehmer an Position 2 (s. Abb. 2.1). Bei den Versuchen mit Explosionsmutter befand sich dieser Aufnehmer an Position 4 so daß er den Druck oberhalb des Kolbens bis zu einem Kolbenweg von etwa 152 mm messen konnte.

P3, P4, P5- Drucke an verschiedenen Stellen des Stahlzylinders.

P6- Druck unterhalb der Tauchplatte.

P7- Druck oberhalb der Tauchplatte.

Die Druckaufnehmer wurden so eingebaut, daß ihre Membrane in einer kleinen Kammer liegt, die mit dem Zylinder durch kleine Bohrungen in Verbindung stehen. Eine kleine Bohrung, die während des Versuches mit einer Schraube geschlossen wurde, ermöglicht die Entlüftung der Kammer vor jedem Versuch(s. Abb. A2.3).

### A2.3 - Start eines Versuches

-----

Der Versuch wurde durch ein Steuereinheit gestartet, die die Öffnung des Magnetsventils bzw. die Zündung der Explosionsmutter betätigte. Zuerst mußte das Magnetband bis zur gewünschten Geschwindigkeit (120 Zoll/s) beschleunigt werden. Durch Drücken eines Knopfes auf der Steuereinheit (s. Abb. 7.1) wurde der Versuch nach einer einstellbaren Zeitverzögerung gestartet.

Da die Hochgeschwindigkeitskamera eine gewisse Zeit zum Erreichen der benötigten Filmgeschwindigkeit braucht, gab es in der Steuereinheit eine einstellbare Zeitverzögerungsvorrichtung, welche für den gewünschten Zeitversatz zwischen dem Augenblick der Betätigung des Startknopfes und dem tatsächlichen Versuchsbeginn sorgte. Letzteres erfolgte durch einen elektrischen Puls, der das Ventil öffnet bzw. die Sprengmutter zündet.

Eine Liste der wichtigsten Meßinstrumente ist in Tab. A2.1 angegeben.

Gemessene Grösse	Bereich	Typ	Anzahl der verwendeten Geräte	Merkmale
Druck	0 - 10 bar	Kistler 4041 a	2	Piezoresistiv
Druck	0 - 20 bar	Kistler 4041 a	1	Piezoresistiv
Druck	0 - 50 bar	Kistler 4041 a	4	Piezoresistiv
Druck	0 - 200 bar	Kistler 4041 a	4	Piezoresistiv
Druck	0 - 250 bar	Kistler 6001	4	Piezoelektrisch
Beschleunigung	- 50000 +100000 g	Kistler 8042	1	Piezoelektrisch
Kraft	0 -60000 n	Kistler 9031	8	Piezoelektrisch
Kraft	0 -15000 n	Kistler 9011	8	Piezoelektrisch
Piezoresistiver Verstärker		Kistler 4601	4	Für piezores. Druckaufnehmer
Ladungs-Verstärker		Kistler 5007	6	Für piezoel. Aufnehmer
Hochgeschwindigkeitskamera		Nac 16 HD	2	
Digitaluhr		ROC - Realtime online clock		
Registriergeräte		SE - 7000 A		
Schreibgerät		Siemens Oszillomink - 8		

Tabelle A2.1- Liste der Meßinstrumente

Signal	Position im Zylinder	Abstand vom unteren Ende des Zylinders (mm)	Abstand von der unteren Tauchplattenoberfläche (mm)
p1	1	100	-792
p2	2	225	-667
p3	3	350	-542
p4	4	475	-417
p5	5	635	-257
p6	6	883	-009
p7	7	943	+051.83

Tabelle A2.2- Position der Druckaufnehmer bei den Versuchen mit Ventil.

Signal	Position im Zylinder	Abstand vom unteren Ende des Zylinders (mm)	Abstand von der unteren Tauchplattenoberfläche (mm)
p1	1	100	-792
p2	-	-	-
p3	-	-	-
p4	4	475	-417
p5	5	635	-257
p6	6	883	-009
p7	7	943	+051.83

Tab. A2.3- Position der Druckaufnehmer bei den Versuchen mit Explosionsmutter.



A3. - Signalverarbeitung

-----

Bei jedem Versuch wurden die verschiedenen Signale( max.13) auf ein Magnetband bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 120 Zoll/s aufgenommen.

Die Signale, die registrierte wurden, sind in Tabelle A3.1 aufgelistet.

Kanal	Signal	Zahl der Signale
1	Lichtschrankensignal	1
2 - 8	Drucksignale	7
9 -10	Kraftsignale	2
11	Beschleunigungssignal	1
12	Zeitsignal	1
13	Anfangssignal	1

Tab. A3.1 - Registrierte Signale

Nach einem Versuch ist es möglich, die Signale mittels eines Schreibers zu kontrollieren (Oszillomink 8 - s. Tab. A2.1). Die Genauigkeit dieses Apparates ist sehr gut für die Zeitachse (X - Achse), aber mangelhaft für die Y - Achse (gemessene Größe). Deshalb wurden die aufgezeichneten Analogsignale digitalisiert.

### A3.1 - Digitalisierung

-----

Die Daten wurden mittels eines PDP11-Rechners digitalisiert und auf ein 7-Spur Digitalband gespeichert um danach auf der IBM-Großrechenanlage weiterverarbeitet zu werden /46/.

Die Wiedergabegeschwindigkeit während der Digitalisierung hatte folgende Werte :

15/16 Zoll/s,            1<sup>7</sup>/<sub>8</sub> Zoll/s,            3<sup>3</sup>/<sub>4</sub> Zoll/s

Damit ergeben sich die ' speed-down ' Faktoren :

128                            64                            32

Alle Angaben in diesem Kapitel berücksichtigen schon die oben-gegebene 'speed-down' Faktoren.

Es ist sehr wichtig eine hohe Abtastfrequenz zu benutzen, um die Signale mit guter Genauigkeit zu diskretisieren.

Da der Speicherplatz im PDP11 Computer nicht sehr groß ist, wurden die Signale eines Versuches in verschiedenen Teilen digitalisiert.

Die Synchronisierung der Teile wurde durch das Lichtschrankensignal sichergestellt.

Die Signale wurden dann in dem Abtastfrequenzbereich :

$$32000 \text{ Hz} < F_o < 64000 ,$$

je nach Versuchsdauer, digitalisiert.

Alle Lichtschrankensignale wurden zusätzlich als Einzelkanal digitalisiert, weil die Frequenz für die Bestimmung der Zeitpunkte bei den schnellsten Versuchen nicht genügend hoch war. Deshalb wurden diese Signale mit einer Abtastfrequenz in dem Bereich

$$210 \text{ KHz} \leq F_1 \leq 300 \text{ KHz}$$

digitalisiert.

Mit dieser Abtastfrequenz beträgt der maximale Fehler :

$$1/210 \text{ KHz} = 4.76 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Die andere Signale wurden dann mit diesem Lichtschrankensignal synchronisiert. Der maximale Synchronisierungsfehler beträgt :

$$1/32 \text{ KHz} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

### A3.2 - Tiefpaßfilter

-----

Bei allen Versuchen wurde eine zusätzliche Digitalisierung durchgeführt, dabei wurden die Druck-, Beschleunigung- und Kraftsignale vor der Digitalisierung gefiltert.

Die Signale der ersten Versuche (1-40) wurden elektronisch gefiltert /47/. Später wurde mit einem numerischen Filter gearbeitet/48/.

Die mit dem numerischen Filter berechneten Ergebnisse stimmen sehr gut überein mit denen, welche aus analogen Filtern stammen.

Weil die numerische Methode viel schneller ist, wurden die Daten der späteren Versuche immer numerisch gefiltert.

### A3.3 - Umwandlung der Daten

-----

Die Prozedur, um gültige Meßsignale zu bekommen, kann so zusammengefaßt werden :

-----

1-Übersetzung der digitalisierten Daten .	BAND
2-Formattierung der Daten .	DIGN
3-Grafische Darstellung der Signale in Volt .	PLDIP1
4-Numerische Filterung der Signale .	FSMOF
5-Korrektur und Umwandlung der Signale .	CORDIF
Bei der Eichung des Bandgeräts wurde festgestellt, daß bei Aufnahme und Wiedergabe eines Signals ein gewisser Fehler auftritt. Durch die Ermittlung einer Kalibrierungskurve vor jedem Versuch, kann dieser Fehler korrigiert werden.	
6-Vergleich zwischen den gefilterten und ungefilterten Signalen und der grafischen Darstellung .	BIPLO
7-Auswahl der Signale : nur diejenigen Signalteile die physikalisch sinnvoll waren, wurden zur späteren Auswertung benutzt.	TRUNF
8-Grafische Darstellung der gültigen Signale und deren Speicherung.	PLOTRU
9-Verarbeitung der Kolbensignale.	DISPLA
10-Grafische Darstellung des Kolbensignals.	PLDVAF
11-Verarbeitung des Beschleunigungsaufnehmersignals, Vergleich mit dem Kolbensignal und grafische Darstellung .	VERVAF

-----

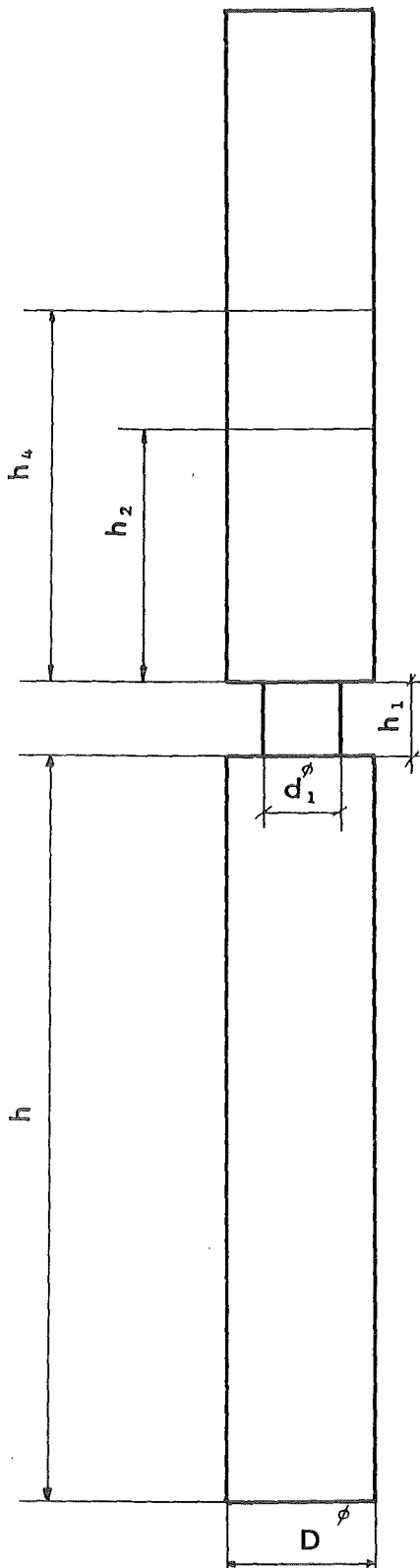
Die Abb. A3.1 gibt die aufeinanderfolgende Aufbereitungen der Ergebnisse eines Versuches wieder.

Die Original Signale eines Versuches (in Volt) und die Signale nach der Umwandlung (gültige Signale) sind in den Abbildungen A3.2, A3.3 dargestellt.

A4. - Bestimmung des Luftvolumenanteils

-----

Vor jedem Versuch wird der Luftvolumenanteil ( $\alpha$ ) im Wasser berechnet. Zuerst gibt es nur Wasser im Stahlzylinder, dann wird die Luft eingeblasen. Der Luftvolumenanteil wird folgendermaßen berechnet (Abb. A4.1):



$$\alpha = AA / (BB + CC)$$

wobei :

$$AA = D^2 h_3$$

$$BB = D^2 (h + h_4)$$

$$CC = d_1^2 h_1$$

$D$  = Durchmesser des Stahlzylinders

$d_1$  = Durchmesser der Bohrung der  
Tauchplatte

$h_4$  = Mischungsniveau

$h_1$  = Dicke der Tauchplatte

$h$  = Länge des Stahlzylinders

$h_2$  = Wasserniveau

$h_3 = h_4 - h_2$

Abb. A4.1- Bestimmung des Luftvolumenanteiles.

A5. - Verhalten der Mischung im Stahlzylinder.

-----  
Vorversuche in einem Plexiglaszylinder  
-----

Der untere Teil des Versuchstandes besteht aus Stahl(s.Kap. 5).  
Man kann deshalb das Zweiphasengemisch unterhalb der Tauchplatte  
vor einem Versuch nicht beobachten.

Zur Beobachtung des Zweiphasengemisches wurde eine kleine durch-  
sichtige Vorrichtung gebaut(s. Abb. A5.1). Diese besteht aus einem  
Plexiglasrohr mit einem Innendurchmesser, der gleich dem des Stahl-  
zylinders ist. Zur Vermeidung der durch die Änderung des Brechungs-  
indexes an der Phasengrenze Wasser-Luft auftretenden Verzerrung  
wird um das Rohr ein Quader aus dünnen Plexiglasscheiben montiert  
und der Zwischenraum mit Wasser gefüllt.

Somit ist ein verzerrungsfreies Betrachten der Strömungseffekte möglich.

Am Boden des Plexiglasrohres wird durch eine Scheibe aus Sinter-  
bronze eine kleine Luftkammer gebildet. Diese wird aus einer  
Druckluftflasche mit einem gleichmässigen Luftstrom versorgt,  
der durch die poröse Schicht strömt und in der Form  
gleichgroßer Luftbläschen in das Wasser eintritt.

Zur Untersuchung weiterer Blasenerzeugungsmethoden wurde anstelle  
der porösen Schicht einfach an vier auf gleicher Höhe montierten  
Tüllen Druckluft eingeblasen. Die Vorgänge wurden mit einer Hoch-  
geschwindigkeitskamera gefilmt.

A5.1 - Ergebnisse von Sinterplattenexperimenten  
-----

Die Hauptdaten der Platten, die für diese Versuche verwendet wurden,  
sind in Tab. A5.1 angegeben.

Platte	Filter- feinheit ( $\mu\text{m}$ )	Anzahl der Bohrungen	Durchmesser der Platte (mm)	Dicke
1	8	15	110	5
2	20	15	110	5
3	30	800	110	5
4	30	800	110	4
5	30	800	110	6
6	45	800	110	5
7	60	800	110	5

Tab. A5.1 - Platten aus Sinterbronze.

Das Wasser-Luft-Niveau ( $W_1$ ) wurde in folgendem Bereich variiert :

$$250 \text{ mm} \leq W_1 \leq 770 \text{ mm}$$

Der Eingangsdruck ( $P_0$ ) wurde in folgendem Bereich variiert :

$$0.2 \text{ bar} \leq P_0 \leq 1.5 \text{ bar}$$

Die folgenden Größen beeinflussen die Blasenbildung :

- a - Filterfeinheit der Sinterbronzeplatte
- b - Eingangsdruck der Luft
- c - Höhe des Wasserspiegels
- d - Volumen des unteren Raums (R in Abb. A5.1)
- e - Anzahl der Bohrungen der Sinterbronzeplatte



- a - Der Einfluß der Filterfeinheit der Sinterbronzeplatte auf den Durchmesser der Luftblasen ist in Abb. A5.2 dargestellt. Im untersuchten Bereich - Filterfeinheit zwischen 8  $\mu\text{m}$  und 30  $\mu\text{m}$  - ist der Unterschied der verschiedenen Durchmesser der Blasen nicht sehr groß.
- b - Abb. A5.3 stellt den Einfluß des Eingangsdruckes der Luft auf den Durchmesser der Blasen dar. Eine Erhöhung des Eingangsdruckes bedeutet eine Erhöhung des Blasendurchmessers - dieser steigt sehr langsam an - . Im stehenden Wasser bedeutet eine Erhöhung des Blasendurchmessers eine Erhöhung der Blaseschwindigkeit, weil der Auftrieb größer wird. Im bewegtem Wasser dagegen werden größere Blasen langsamer, weil die Reibungskraft zwischen Blase und Wasser größer wird.
- Für größere Werte des Eingangsdruckes (>3 bar), erhöht sich die Blasenkonzentration und die Blasen koaleszieren. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit der Blasen größer.
- c - Wenn das Wasserniveau abnimmt, gibt es eine sehr geringe Verminderung der Geschwindigkeit der Blasen. Eine Variation des Wasserniveaus hat praktisch einen vernachlässigbaren Einfluß auf den Blasendurchmesser.
- d - Der Einfluß des Volumens des unteren Raumes (R in Abb A5.1) ist vernachlässigbar ; es wurde kein Einfluß auf den Blasendurchmesser beobachtet.
- e - Der Einfluß der Anzahl der Bohrungen in der Sinterbronzeplatte ist auch vernachlässigbar : der Blasendurchmesser bleibt konstant. Manche Autoren /49/ finden einen kleinen Einfluß auf den Blasendurchmesser, wenn die Anzahl der Bohrungen in der Platte kleiner als 15 ist, dabei steigt der Blasendurchmesser mit der Anzahl der Bohrungen an.

### A5.2 - Einfluß der Tauchplatte auf den Blasendurchmesser

-----

Der Effekt der Tauchplatte wurde mit einer Scheibe aus Teflon ( T in Abb. A5.1) mit den Abmessungen einer Tauchplatte (s. Kap. 8) im 'kleinen Versuchstand' simuliert. In den Abbildungen A5.4 und A5.5 sind zwei Versuche ohne 'Tauchplatte' und zwei Versuche mit 'Tauchplatte' dargestellt. Aus dem Vergleich der zwei Abbildungen sieht man, daß sich bei vorhandener Tauchplatte eine Koaleszenz zwischen den Luftblasen oberhalb der Tauchplatte ausbildet. Die Anzahl der Blasen wird oberhalb der Tauchplatte geringer, der Blasendurchmesser größer. Manchmal bildet sich sogar eine Blasenraube. Eine Erhöhung des Perforationsverhältnisses der Tauchplatte bedeutet eine Verringerung des 'Koaleszenzeffekts'.

### A5.3 - Ergebnisse von Tüllenexperimenten

-----

Die Hauptdaten der Tüllen, die für diese Versuche verwendet wurden, sind in Tab. A5.2 angegeben.

Typ	$\phi$ (mm)	l (mm)
1	0.20	2
2	0.35	2
3	0.50	2
4	1.00	2

$\phi$  = Durchmesser der Bohrung der Tülle

l = Länge der Tülle

Tab. A5.2 - Tüllen

Der Durchmesser der Blasen erhöht sich, wenn der Eingangsdruck erhöht wird. Der Blasendurchmesser ist in Abb. A5.6 als Funktion des Druckes dargestellt. Wenn der Druck höher als drei bar ist, bildet sich ein Blasentraube und die Koaleszenz zwischen den Blasen wird der maßgebende Faktor. Eine theoretische Beschreibung des Problems findet man in der Literatur /50/.

## A6. - Beschreibung der Versuche

-----

Die durchgeführten Versuche sind in Tab. A6.1 aufgelistet.

Die ersten vier Versuche wurden durchgeführt, um den Aufbau und die Apparaturen zu überprüfen.

Danach wurden vier zusätzliche Versuche durchgeführt, um die verschiedenen Teile des Versuchstandes und die Genauigkeit der Meßinstrumente zu testen.

Danach begann die Serie der gezielten Meßversuche.

Die ersten 12 Versuche wurden nur mit Wasser als Fluid durchgeführt, um die Ergebnisse der Versuche mit Einphasenströmung nachzuprüfen.

Der Versuch Nr. 13 wurde als erster Versuch bei Zweiphasenströmung durchgeführt.

Die Versuche Nr. 14 bis Nr. 22 wurden alle mit den Tüllen als Blasenvorrichtung und mit dem Ventil V1 als Beschleunigungsvorrichtung gefahren.

Die benutzte Tauchplatte hatte das Perforationsverhältnis  $R_p = 0.171$  (s. Anhang A1.1).

Der Druck in der Kammer K1 (s. Abb. 5.1) wurde von 60 bis 80 bar variiert.

Der Versuch Nr. 23 wurde als Wiederholung des Versuches Nr. 11 durchgeführt, jedoch mit entlüftetem Wasser (s. Abschnitt A6.9).

Die Versuche Nr. 24 bis 35 wurden mit den Scheiben aus Sinterbronze als Einblasvorrichtung und mit dem Ventil V1 als Beschleunigungsvorrichtung durchgeführt. Die anderen Parameter (s. Kap. 8) wurden in den darauf folgenden Versuchen variiert.

Tabelle A6.1- Liste der Versuche

LISTE DER VERSUCHE - ERKLÄRUNG DER NUMMERN IN KLAMMERN AM ENDE DER TABELLE

VERS. NR. (1)	DATUM	BESCH. VORR. (2)	DRUCK NOMINELL (bar)(3)	PLATTE (4)	MISCH. HÖHE mm(5)	WASSER HÖHE mm(6)	L.S. (7)	FILM (8)	IP (9)	ROC (10)	TEMP. W °C (11)	TEMP L °C (12)	LUFT % (13)	BLASEN VORR. (14)	FEINH. mm-mu (15)	DRUCK (bar) (16)
1	25. 4.83	1	40.- 80.	3	227.0	227.0	1	1	1	1	21.70	20.00	0.0	0	0.0	0.0
2	28. 4.83	1	40.-120.	3	227.0	227.0	1	1	1	1	19.00	20.00	0.0	0	0.0	0.0
3	4. 5.83	1	40.- 60.	3	227.0	227.0	1	1	1	1	22.00	22.00	0.0	0	0.0	0.0
4	9. 5.83	1	40.- 60.	3	227.0	227.0	1	1	1	1	20.00	20.00	0.0	0	0.0	0.0
5	13. 5.83	1	40.- 80.	3	220.0	220.0	1	1	1	1	17.30	17.00	0.0	0	0.0	0.0
6	16. 5.83	3	40.- 80.	3	227.0	227.0	1	1	1	1	20.20	20.00	0.0	0	0.0	0.0
7	17. 5.83	3	40.- 92.	3	195.0	195.0	1	1	1	1	22.80	22.50	0.0	0	0.0	0.0
8	17. 5.83	3	40.- 90.	3	220.0	220.0	1	1	1	1	22.00	22.00	0.0	0	0.0	0.0
9	18. 5.83	3	40.- 60.	3	210.0	210.0	1	1	1	1	21.20	21.00	0.0	0	0.0	0.0
10	19. 5.83	3	40.-105.	3	227.0	227.0	1	1	1	1	19.90	19.00	0.0	0	0.0	0.0
11	27. 5.83	2	100.- 0.	3	233.0	233.0	1	1	1	1	17.20	17.00	0.0	0	0.0	0.0
12	8. 6.83	2	130.- 0.	3	233.0	233.0	1	1	1	1	23.80	23.00	0.0	0	0.0	0.0
13	15. 6.83	2	110.- 0.	3	260.0	227.0	1	1	1	1	21.50	21.00	3.8	1	0.2	5.0
14	20. 6.83	1	40.- 80.	1	164.0	139.0	1	1	1	1	20.00	20.00	2.8	1	0.2	3.5
15	21. 6.83	1	40.- 80.	1	160.0	139.0	1	1	1	1	25.20	24.00	2.3	1	0.2	3.5
16	24. 6.83	1	40.- 85.	1	164.0	139.0	1	1	1	1	24.20	23.00	2.8	1	0.2	3.5
17	26. 6.83	1	40.-105.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	23.03	23.00	3.3	1	0.2	3.5
18	30. 8.83	1	40.-105.	1	172.0	142.0	1	1	1	1	23.80	23.00	3.3	1	0.2	3.5
19	30. 8.83	1	40.-118.	1	170.0	140.0	1	1	1	1	26.00	24.50	3.3	1	0.2	3.5
20	7. 9.83	1	40.- 85.	1	286.0	144.0	1	1	1	1	25.00	24.50	14.4	2	20.0	0.7
21	6.10.83	1	40.- 62.	1	315.0	142.0	1	1	1	1	20.00	19.50	17.1	2	20.0	0.7
22	7.10.83	1	40.- 50.	1	370.0	64.0	1	1	1	1	20.00	19.50	21.0	2	20.0	0.7
23	18.10.83	2	100.- 0.	3	233.0	233.0	1	1	1	1	20.80	19.50	0.0	0	0.0	0.0
24	6.12.83	1	40.- 60.	1	218.0	147.0	1	1	1	1	17.00	17.00	7.0	2	8.0	0.3
25	7.12.83	1	40.- 60.	1	228.0	38.0	1	1	1	1	20.00	20.00	18.7	2	8.0	1.6
26	8.12.83	1	40.- 59.	1	240.0	98.0	1	1	1	1	18.00	18.00	13.8	2	8.0	0.7
27	11.12.83	1	40.- 80.	1	231.0	98.0	1	1	1	1	17.50	17.20	13.0	2	8.0	0.4
28	12.12.83	1	40.-100.	1	227.0	98.0	1	1	1	1	18.00	18.00	12.7	2	8.0	0.4
29	12.12.83	1	40.- 84.	1	227.0	98.0	1	1	1	1	19.00	19.00	12.7	2	8.0	0.4
30	13.12.83	1	40.-116.	1	227.0	98.0	1	1	1	1	19.00	18.80	12.7	2	8.0	0.4
31	15.12.83	1	40.- 60.	1	246.0	-4.0	1	1	1	1	18.00	18.00	24.2	2	8.0	2.5
32	18.12.83	1	40.- 60.	1	106.0	33.0	1	1	1	1	18.00	18.00	8.1	2	8.0	0.3
33	20.12.83	1	40.- 60.	1	162.0	93.0	1	1	1	1	18.00	18.00	7.2	2	8.0	0.3
34	23.12.83	1	40.- 80.	1	149.0	98.0	1	1	1	1	19.00	19.00	5.3	2	8.0	0.3
35	23.12.83	1	40.- 80.	1	300.0	98.0	1	1	1	1	18.50	18.50	18.6	2	8.0	1.4
36	30.12.83	3	46.- 80.	1	200.0	106.0	1	1	1	1	18.50	18.50	9.4	2	8.0	0.4
37	2. 1.84	3	44.- 76.	1	200.0	98.0	1	1	1	1	18.50	18.00	10.3	2	8.0	0.8
38	2. 1.84	3	46.-100.	1	232.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.00	6.8	2	8.0	0.4
39	4. 1.84	3	46.-104.	1	235.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.00	7.0	2	8.0	0.7
40	4. 1.84	3	46.- 76.	1	235.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.00	7.0	2	8.0	0.4
41	4. 1.84	3	46.- 60.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.00	7.0	2	8.0	0.4
42	7. 1.84	3	46.- 80.	1	197.0	106.0	1	1	1	1	18.50	18.00	9.2	2	30.0	0.3
43	8. 1.84	3	46.- 70.	1	203.0	106.0	1	1	1	1	18.50	18.00	9.7	2	30.0	0.3
44	10. 1.84	3	46.-100.	1	208.0	106.0	1	1	1	1	18.50	18.00	10.2	2	30.0	0.3
45	10. 1.84	3	46.- 80.	1	0.0	-200.0	1	1	1	1	18.50	18.00	2.3	2	30.0	0.2

Tabelle A6.1- Liste der Versuche (Fortsetzung).

LISTE DER VERSUCHE - ERKLÄRUNG DER NUMMERN IN KLAMMERN AM ENDE DER TABELLE

VERS. NR. (1)	DATUM	BESCH. VORR. (2)	DRUCK NOMINELL (bar)(3)	PLATTE (4)	MISCH. HÖHE mm(5)	WASSER HÖHE mm(6)	L.S. (7)	FILM (8)	IP (9)	ROC (10)	TEMP. W °C (11)	TEMP L °C (12)	LUFT % (13)	BLASEN VORR. (14)	FEINH. mm-mu (15)	DRUCK (bar) (16)
46	11. 1.84	3	46.- 80.	1	227.0	98.0	1	1	1	1	18.50	18.00	12.7	2	30.0	0.4
47	11. 1.84	3	46.- 70.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.00	6.3	2	30.0	0.4
48	11. 1.84	3	46.- 90.	1	233.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.00	6.9	2	30.0	0.3
49	12. 1.84	3	46.- 62.	1	197.0	106.0	1	1	1	1	18.50	18.00	9.2	2	60.0	0.4
50	13. 1.84	3	46.-100.	1	197.0	106.0	1	1	1	1	18.50	18.00	9.2	2	60.0	0.5
51	13. 1.84	3	46.- 80.	1	227.0	98.0	1	1	1	1	18.22	18.00	12.7	2	60.0	0.9
52	13. 1.84	3	46.- 80.	1	234.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	7.0	2	60.0	0.3
53	17. 1.84	3	46.- 80.	4	227.0	98.0	1	1	1	1	18.20	18.00	12.7	2	8.0	0.5
54	17. 1.84	3	46.-100.	4	227.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	7.1	2	8.0	0.3
55	17. 1.84	3	46.- 80.	4	0.0	-200.0	1	1	1	1	18.20	18.00	2.0	2	8.0	0.2
56	18. 1.84	3	46.- 80.	4	228.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	6.3	2	8.0	0.3
57	19. 1.84	3	46.-120.	4	228.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	6.3	2	8.0	0.4
58	19. 1.84	3	46.-120.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	6.3	2	8.0	0.4
59	20. 1.84	3	46.-100.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	6.3	2	8.0	0.4
60	21. 1.84	3	46.- 80.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	18.10	18.00	6.3	2	8.0	0.3
61	21. 1.84	3	46.- 80.	2	227.0	98.0	1	1	1	1	18.20	17.90	12.6	2	8.0	0.8
62	22. 1.84	3	46.-100.	2	233.0	98.0	1	1	1	1	18.20	18.00	13.1	2	8.0	0.9
63	22. 1.84	3	46.- 80.	2	155.0	98.0	1	1	1	1	18.20	18.00	5.9	2	8.0	0.3
64	22. 1.84	3	46.- 80.	2	0.0	-252.0	1	1	1	1	18.30	18.00	2.6	2	8.0	0.3
65	22. 1.84	3	46.- 80.	2	227.0	185.0	1	1	1	1	18.20	18.00	4.0	2	8.0	0.3
66	24. 1.84	3	46.-120.	3	227.0	162.0	1	1	1	1	18.10	18.00	6.3	2	8.0	0.3
67	25. 1.84	3	46.-100.	3	227.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.20	6.3	2	8.0	0.3
68	25. 1.84	3	46.- 80.	3	230.0	162.0	1	1	1	1	18.50	18.20	6.6	2	8.0	0.3
69	26. 1.84	3	46.- 80.	3	222.0	98.0	1	1	1	1	18.40	18.20	12.3	2	8.0	0.9
70	26. 1.84	3	46.- 80.	3	156.0	98.0	1	1	1	1	18.20	20.00	6.1	2	8.0	0.3
71	27. 1.84	3	46.- 80.	3	233.0	185.0	1	1	1	1	18.20	18.00	4.6	2	8.0	0.3
72	28. 1.84	3	46.-100.	4	233.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	6.7	2	8.0	0.4
73	28. 1.84	3	46.- 80.	4	227.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	6.2	2	8.0	0.4
74	2. 2.84	3	46.- 80.	4	227.0	98.0	1	1	1	1	20.40	19.40	12.7	2	8.0	0.4
75	3. 2.84	3	46.- 80.	5	227.0	162.0	1	1	1	1	20.30	19.50	7.1	2	8.0	0.3
76	3. 2.84	3	46.- 80.	5	268.0	162.0	1	1	1	1	20.40	20.00	9.8	2	8.0	0.3
77	3. 2.84	3	46.- 80.	5	227.0	98.0	1	1	1	1	21.00	20.50	12.4	2	8.0	0.7
78	3. 2.83	3	46.- 80.	5	83.0	40.0	1	1	1	1	21.00	20.40	4.7	2	8.0	0.3
79	30. 5.84	3	80.	1	227.0	162.0	1	1	1	0	21.00	20.50	7.1	1	8.0	0.3
80	1. 6.84	2	80.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	21.50	20.30	7.9	2	8.0	0.4
81	1. 6.84	2	80.	1	227.0	200.0	1	1	1	1	21.50	21.00	3.2	2	8.0	0.3
82	5. 6.84	2	80.	1	245.0	110.0	1	1	1	1	21.50	21.00	16.2	2	8.0	0.6
83	5. 6.84	2	40.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	21.50	21.00	7.9	2	8.0	0.4
84	5. 6.84	2	60.	1	233.0	162.0	1	1	1	1	22.50	22.00	8.5	2	8.0	0.4
85	6. 6.84	2	40.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	22.50	22.00	7.9	2	60.0	0.3
86	6. 6.84	2	80.	1	232.0	162.0	1	1	1	1	23.00	22.00	8.4	2	60.0	0.3
87	7. 6.84	2	60.	1	235.0	162.0	1	1	1	1	23.00	22.00	8.8	2	60.0	0.3
88	7. 6.84	2	60.	1	166.0	100.4	1	1	1	1	22.00	21.50	8.6	2	8.0	0.3
89	8. 6.84	2	60.	1	100.0	45.3	1	1	1	1	22.00	21.50	7.8	2	8.0	0.3
90	8. 6.84	2	60.	1	40.0	-9.9	1	1	1	1	22.00	21.50	7.8	2	8.0	0.3

Tabelle A6.1- Liste der Versuche (Fortsetzung)

LISTE DER VERSUCHE - ERKLÄRUNG DER NUMMERN IN KLAMMERN AM ENDE DER TABELLE

VERS. NR. (1)	DATUM	BESCH. VORR. (2)	DRUCK NOMINELL (bar)(3)	PLATTE (4)	MISCH. HÖHE mm(5)	WASSER HÖHE mm(6)	L.S.	FILM (8)	IP (9)	ROC (10)	TEMP. W °C (11)	TEMP L °C (12)	LUFT % (13)	BLASEN VORR. (14)	FEINH. mm-mu (15)	DRUCK (bar) (16)
91	9. 6.84	2	20.	1	227.0	162.0	1	1	1	1	22.70	21.00	7.9	2	8.0	0.3
92	9. 6.84	2	80.	1	297.0	227.0	1	1	1	1	22.00	21.00	7.8	2	8.0	0.5
93	9. 6.84	2	80.	1	230.0	98.0	1	1	1	1	22.50	22.00	16.1	2	8.0	0.3
94	11. 6.84	2	60.	1	0.0	-200.0	1	1	1	1	22.00	21.00	3.1	2	8.0	0.3
95	11. 6.84	2	40.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	22.30	21.80	7.9	2	8.0	0.3
96	11. 6.84	2	60.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	22.20	21.40	7.9	2	8.0	0.3
97	12. 6.84	2	80.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	22.80	22.30	7.9	2	8.0	0.3
98	12. 6.84	2	80.	2	227.0	200.0	1	1	1	1	22.00	21.50	3.1	2	8.0	0.2
99	12. 6.84	2	80.	2	227.0	110.0	1	1	1	1	22.20	21.80	14.2	2	8.0	0.5
100	13. 6.84	2	60.	3	227.0	162.0	1	1	1	1	22.90	22.00	7.9	2	8.0	0.3
101	13. 6.84	2	80.	3	227.0	162.0	1	1	1	1	22.20	21.80	7.9	2	8.0	0.3
102	14. 6.84	2	80.	3	227.0	162.0	1	1	1	1	22.80	22.00	7.9	2	8.0	0.3
103	14. 6.84	2	80.	3	227.0	200.0	1	1	1	1	22.50	22.00	3.2	2	8.0	0.3
104	14. 6.84	2	80.	3	227.0	110.0	1	1	1	1	20.00	21.50	14.3	2	8.0	0.6
105	15. 6.84	2	60.	5	224.0	162.0	1	1	1	1	25.20	24.80	7.3	2	8.0	0.3
106	15. 6.84	2	80.	5	226.0	162.0	1	1	1	1	24.20	23.50	7.6	2	8.0	0.3
107	11. 12.84	2	50.	2	180.0	164.0	1	1	1	1	18.20	18.00	2.8	1	0.2	2.4
108	12. 12.84	2	60.	2	227.0	162.0	1	1	1	1	18.20	18.00	7.9	2	8.0	0.3

Erklärungen :

- (1) Nummer des Versuches
- (2) Beschleunigungsvorrichtung
  - 1 = Ventil 1
  - 2 = Explosionsmutter
  - 3 = Ventil 2
- (3) Druck
  - für die Versuche mit Ventil sind die Drücke in Kammer K1 und Kammer K2 (s. Abb. 5.1) angegeben.
  - für die Versuche mit Explosionsmutter ist der Druck in Kammer K unterhalb des Kolbens angegeben.
- (4) Tauchplatten
  - 1 = 0.17 Perforationsverhältnis - 1 Bohrung
  - 2 = 0.25 Perforationsverhältnis - 1 Bohrung
  - 3 = 0.12 Perforationsverhältnis - 1 Bohrung
  - 4 = 0.12 Perforationsverhältnis - 7 Bohrung
  - 5 = 0.17 Perforationsverhältnis - 7 Bohrung
- (5) Mischungshöhe - Mischungsniveau oberhalb der Tauchplatte
- (6) Wasserhöhe - Wasserniveau oberhalb der Tauchplatte
- (7) Lichtschrankensignal
  - 1 = ja
  - 0 = nein
- (8) Hochgeschwindigkeitsfilm
  - 1 = ja
  - 0 = nein
- (9) Anfangsspitze auf Band
  - 1 = ja
  - 0 = nein
- (10) Codiertes Zeitsignal auf Band und Film
  - 1 = ja
  - 0 = nein
- (11) Temperatur des Wassers
- (12) Temperatur in der Umgebung des Versuchstandes
- (13) Luftvolumenanteil



(14) Blasenvorrichtung

0 = Einphasenströmung - keine Blasenvorrichtung

1 = Tüllen

2 = Scheiben aus Sinterbronze

(15) Durchmesser der Bohrung der Tüllen (mm) oder Filterfeinheit der  
Scheiben aus Sinterbronze ( $\mu\text{m}$ )

(16) Druck - Eingangsdruck der Luft ins Wasser durch die Tüllen oder  
durch die Scheiben aus Sinterbronze.

Die Versuche Nr. 36 bis Nr. 78 wurden mit dem Ventil V2 als Beschleunigungsvorrichtung durchgeführt. Der Druck dieser Versuche wurde im Bereich 62 - 100 bar verändert.

Diese Versuche wurden mit allen Tauchplatten, sowie mit verschiedenen Scheiben aus Sinterbronze, und verschiedenen Höhen des Mischungsniveau durchgeführt.

Die Versuche von Nr. 79 bis Nr. 108 waren solche mit Sprengmutter. Der Anfangsdruck im Zylinder hatte verschiedene Werte von 20 bis 80 bar. Alle Parameter wurden für diese Versuche variiert.

Bei einigen Versuche fehlen einige Signale oder Daten von den Meßinstrumenten. Diese Versuche sind :

Versuch Nr. 17

Versuch Nr. 42

Versuch Nr. 55

Wegen der teilweise redundanten Instrumentierung und der Wiederholung einiger Versuche, waren diese Fehler für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse ohne Bedeutung.

#### A6.1-Meßergebnisse

-----

In Tabelle A6.2 werden einige der wichtigsten Meßergebnisse aufgelistet, und zwar :

a - maximaler gemessener Druck P1

b - maximaler gemessener Druck P2

- c - maximaler gemessener Druck P3
- d - maximaler gemessener Druck P4
- e - maximaler gemessener Druck P5
- f - maximaler gemessener Druck P6
- g - maximaler gemessener Druck P7
- h - maximale gemessene Kraft auf die Tauchplatte  $F_d$
- i - maximale gemessene Kraft auf die obere Platte  $F_u$
- l - Zeitintegral der auf die Tauchplatte wirkenden Kraft  $F_d$ , oder Gesamtimpuls auf die Tauchplatte.
- m - Zeitintegral der auf die obere Platte wirkenden Kraft  $F_u$ , oder Gesamtimpuls auf die obere Platte.
- n - maximaler Kolbenweg
- o - maximale Kolbengeschwindigkeit
- p - maximale Kolbenbeschleunigung
- q - Gesamtdauer des Versuches
- r - Maximale Druckdifferenz an der Tauchplatte

Die Drücke an den Meßstellen P3, P4, P5 wurden in den Versuchen mit Explosionsmutter wegen der Anfangsposition des Kolbens im Stahlzylinder, wie im Kapitel 5 geschrieben wurde, nicht gemessen. NG in Tabelle A6.2 bedeutet nicht gemessen.

Die Ergebnisse sind in /51/ im Detail dargestellt.

Tabelle A6.2- Experimentelle Ergebnisse

VERS. NR.	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	P5 (bar)	P6 (bar)	P7 (bar)	F <sub>d</sub> (KN)	F <sub>u</sub> (KN)	I <sub>d</sub>	I <sub>u</sub>	DMAX (m)	VMAX (m/s)	AMAX (m/s <sup>2</sup> )	TMAX ( S )	P6-P7 (bar)
1	5.95	6.01	5.87	5.90	5.91	6.22	0.80	5.33	1.31	690.00	14.00	0.60	2.8	300.80	0.24	6.31
2	5.93	5.99	5.88	5.92	5.95	6.30	0.83	5.33	1.30	690.00	14.00	0.60	2.8	301.90	0.23	6.31
3	5.93	5.74	5.72	5.71	5.68	5.62	1.08	4.67	0.72	670.60	13.81	0.60	2.7	313.74	0.24	5.62
4	6.12	6.20	6.05	6.07	6.09	6.15	0.80	5.11	1.15	650.00	13.00	0.60	2.7	259.07	0.24	6.15
5	6.11	6.41	6.59	6.51	6.46	6.30	0.68	5.33	1.30	650.80	13.42	0.60	2.8	266.60	0.23	6.30
6	8.03	8.04	7.91	8.18	8.10	8.07	0.82	6.85	1.40	685.20	13.90	0.52	3.0	291.28	0.24	7.88
7	>8.02	14.10	5.25	7.86	8.02	9.27	0.67	7.77	1.49	700.60	15.00	0.55	3.3	240.97	0.24	9.27
8	7.99	14.80	8.02	7.94	8.63	8.33	0.52	6.78	1.41	688.00	12.90	0.57	3.0	158.69	0.25	8.33
9	1.99	1.57	1.98	2.01	2.00	1.98	0.13	1.68	0.19	120.00	3.00	0.41	1.7	54.26	0.29	1.98
10	>8.00	7.16	7.98	9.79	9.74	9.65	1.25	7.69	1.48	650.00	13.70	0.57	3.3	626.81	0.21	10.62
11	102.00	80.00	80.0	79.50	78.40	>60.00	>15.24	139.30	18.00	2210.00	405.00	0.56	8.7	8830.11	0.18	70.00
12	129.20	110.00	112.0	111.04	113.00	115.00	>40.60	193.00	17.30	2740.00	400.00	0.55	10.0	4279.41	0.16	81.90
13	111.20	102.00	101.0	101.00	100.88	100.00	>40.71	50.00	16.00	900.00	71.50	0.57	12.1	6906.63	0.13	86.89
14	8.60	8.00	8.0	8.00	7.90	8.20	3.10	>3.10	0.11	>120.00	6.20	0.48	2.3	105.75	0.19	4.70
15	6.50	7.87	8.2	8.00	8.20	15.80	4.12	6.20	0.14	1010.00	13.70	0.60	3.6	493.53	0.18	13.04
16	5.24	9.92	9.0	8.50	8.50	9.91	>2.00	5.40	0.13	414.00	14.30	0.60	3.6	576.82	0.17	8.24
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
18	4.95	8.13	8.16	8.54	8.03	7.80	2.50	4.80	0.11	780.00	10.01	0.60	3.5	467.79	0.18	4.18
19	4.94	9.12	9.05	9.10	8.60	8.80	2.56	5.16	0.13	852.00	10.00	0.60	3.5	421.20	0.18	4.71
20	4.43	5.98	5.73	6.55	5.32	5.38	1.97	4.60	0.19	637.00	10.20	0.61	4.4	882.56	0.17	4.37
21	4.21	4.10	5.29	5.61	5.38	5.41	1.87	4.33	0.22	664.00	14.00	0.60	4.8	923.83	0.17	4.19
22	3.60	8.66	5.60	5.37	5.81	5.60	1.87	4.79	0.42	502.00	6.33	0.44	5.0	522.90	0.17	4.72
23	100.00	79.02	78.00	79.00	78.20	72.60	25.80	138.60	20.10	2200.00	336.00	0.56	8.1	8759.90	0.16	71.75
24	4.65	6.57	6.26	6.11	6.10	5.90	2.87	1.00	0.10	183.00	7.69	0.58	3.5	499.36	0.18	5.57
25	4.47	2.62	5.53	5.47	5.08	5.57	0.86	1.07	0.16	153.00	8.97	0.58	5.3	879.46	0.17	5.57
26	4.20	2.83	4.08	6.00	5.44	5.81	2.32	1.09	0.18	146.00	10.00	0.58	5.0	879.46	0.17	5.50
27	4.99	6.41	6.29	6.54	6.28	6.04	2.15	1.19	0.20	169.00	12.82	0.58	4.7	832.33	0.17	6.04
28	4.99	6.41	6.80	7.17	6.55	6.88	2.62	1.19	0.31	139.00	22.60	0.58	4.9	874.84	0.17	6.79
29	4.85	6.24	6.51	6.67	5.72	5.52	4.47	1.04	0.25	137.02	20.60	0.58	4.4	738.81	0.17	5.43
30	5.02	2.62	6.53	6.83	6.08	6.37	3.13	1.10	0.30	128.00	16.70	0.58	5.2	905.36	0.17	5.65
31	4.08	5.83	5.86	5.91	5.69	6.33	1.01	1.32	0.17	134.00	11.30	0.58	5.7	1025.00	0.17	6.33
32	4.96	6.45	5.99	5.92	7.18	5.48	2.39	0.96	0.32	215.00	48.70	0.58	3.4	696.27	0.18	5.01
33	4.74	6.56	6.14	5.83	5.94	5.53	2.84	1.07	0.48	173.00	36.80	0.58	3.5	963.28	0.18	5.17
34	5.06	6.56	6.25	6.46	5.10	5.86	3.46	1.03	0.37	172.00	32.70	0.58	3.6	665.38	0.17	4.95
35	4.72	4.92	5.55	6.03	5.64	6.04	1.36	1.04	0.17	522.90	12.70	0.58	3.6	665.38	0.17	5.91
36	7.79	9.14	7.84	9.44	9.69	9.43	1.24	6.42	0.16	523.00	11.30	0.40	4.6	200.22	0.14	8.92
37	6.24	8.17	8.99	7.88	8.54	12.70	4.26	7.68	0.16	649.00	9.86	0.58	6.2	918.62	0.18	11.66
38	10.20	11.60	17.70	19.20	21.10	24.90	9.41	13.00	0.41	862.00	35.80	0.58	5.6	1224.43	0.15	21.61
39	11.70	17.80	19.60	21.60	23.30	23.00	11.70	13.60	0.63	940.00	41.60	0.58	5.7	914.69	0.15	20.35
40	11.20	16.95	18.48	20.80	22.50	23.30	11.50	13.40	0.65	938.00	40.80	0.58	4.1	125.21	0.20	18.10
41	6.39	15.00	8.03	10.10	0.52	31.60	4.11	7.36	0.12	2400.00	27.90	0.52	1.4	68.23	0.49	10.15
42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	7.23	7.89	3.98	10.20	9.94	9.77	1.70	6.62	0.15	648.00	8.26	0.58	5.0	248.44	0.20	18.06

Tabelle A6.2- Experimentelle Ergebnisse(Fortsetzung)

VERS. NR.	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	P5 (bar)	P6 (bar)	P7 (bar)	F <sub>d</sub> (KN)	F <sub>u</sub> (KN)	I <sub>d</sub>	I <sub>u</sub>	DMAX (m)	VMAX (m/s)	AMAX (m/s <sup>2</sup> )	TMAX ( S )	P6-P7 (bar)
44	10.20	13.20	14.30	14.30	14.00	13.50	1.75	9.97	0.43	854.00	32.90	0.58	5.9	346.99	0.17	13.35
45	9.91	11.50	11.80	11.70	11.90	11.10	1.11	10.20	0.64	735.00	116.00	0.58	3.8	677.26	0.19	10.99
46	8.28	12.90	12.50	12.90	17.40	15.30	5.25	14.10	0.34	699.00	18.90	0.58	7.2	970.03	0.16	13.78
47	7.63	17.70	13.40	13.60	15.80	12.90	5.89	11.40	0.17	747.00	12.20	0.58	4.7	844.33	0.18	11.45
48	11.60	16.90	17.40	24.30	27.00	16.50	7.32	11.10	0.37	852.00	25.80	0.58	5.1	285.18	0.17	15.84
49	5.77	1.83	6.46	5.86	5.94	6.02	1.05	4.20	0.30	550.00	18.00	0.58	3.7	76.45	0.23	6.00
50	9.03	19.80	15.20	14.90	18.40	15.00	5.32	33.30	1.11	1840.00	62.60	0.58	6.6	1315.83	0.15	13.60
51	7.32	12.80	13.90	13.50	12.30	12.80	3.86	9.82	0.45	742.00	41.80	0.58	7.0	1122.63	0.17	11.58
52	6.88	7.13	6.65	7.02	7.63	8.16	3.02	5.40	0.17	761.00	12.60	0.58	3.9	624.86	0.18	6.87
53	8.14	11.70	6.98	7.51	8.19	8.17	1.64	7.37	0.29	1440.00	16.70	0.58	3.7	629.66	0.28	8.16
54	11.10	15.80	15.80	17.10	17.20	17.00	1.71	14.30	0.09	1960.00	5.01	0.58	2.8	106.14	0.26	16.28
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	8.24	5.96	8.56	9.29	8.64	9.25	2.15	7.30	0.13	1510.00	13.50	0.58	2.4	512.41	0.29	9.25
57	13.10	25.60	24.30	24.40	15.70	27.40	6.50	15.20	0.23	2130.00	21.50	0.58	5.0	871.51	0.23	25.28
58	7.52	2.07	7.91	7.96	0.09	7.87	4.00	4.70	0.39	255.00	127.90	0.58	6.2	421.05	0.13	7.18
59	6.64	2.72	7.56	7.44	1.99	6.99	4.04	5.02	1.16	386.00	190.50	0.58	6.0	450.65	0.13	6.85
60	6.20	10.30	4.82	12.80	13.40	16.70	4.85	10.80	0.26	315.00	160.60	0.58	5.5	845.82	0.14	15.27
61	5.81	9.90	6.29	11.70	13.30	11.20	6.23	5.37	0.36	305.00	150.10	0.58	7.1	1175.86	0.13	8.60
62	7.29	9.91	12.80	13.90	12.90	17.00	7.96	9.59	0.88	401.00	200.80	0.52	8.1	645.22	0.10	13.54
63	6.66	6.26	6.23	13.00	14.10	17.00	8.58	9.63	0.36	287.00	149.43	0.58	5.4	894.20	0.13	14.62
64	8.53	10.70	10.20	10.20	10.10	7.68	0.24	4.13	1.83	228.00	164.00	0.58	5.7	255.48	0.15	7.54
65	7.06	7.84	5.76	10.30	9.24	9.09	5.36	4.07	0.48	287.00	153.90	0.58	5.6	235.18	0.15	6.68
66	11.40	7.14	11.90	12.40	15.40	12.80	3.71	10.10	0.89	1530.00	79.00	0.58	3.5	429.61	0.21	14.09
67	10.80	20.20	11.80	19.80	19.90	20.00	3.52	13.60	0.99	1260.00	55.90	0.58	4.1	171.39	0.22	16.96
68	8.45	9.74	7.14	16.10	16.10	15.90	3.39	11.40	0.17	1130.00	14.00	0.58	3.9	159.89	0.24	15.22
69	7.46	11.00	6.24	15.70	15.10	16.90	1.97	14.70	0.31	997.00	22.40	0.58	6.6	1066.81	0.24	15.53
70	8.01	11.20	15.00	16.50	18.00	20.50	4.98	15.00	0.52	1210.00	40.50	0.58	4.1	935.09	0.23	17.68
71	8.54	9.95	6.50	18.70	22.00	19.90	4.70	18.20	0.47	1170.00	21.10	0.58	4.4	1069.43	0.22	16.85
72	10.20	8.10	6.85	13.50	13.90	14.10	4.59	8.95	0.96	1700.00	142.00	0.58	3.2	557.59	0.25	11.21
73	8.84	10.40	5.39	19.30	19.10	20.10	4.98	14.10	0.06	1380.00	130.00	0.58	4.5	802.79	0.28	17.13
74	8.08	10.30	6.75	22.50	21.90	22.50	2.93	18.20	0.03	1350.00	141.01	0.58	7.2	1023.52	0.26	22.43
75	7.93	10.50	6.34	11.60	11.20	11.40	4.51	5.98	1.61	813.00	111.00	0.58	4.9	734.65	0.16	9.40
76	8.48	5.42	12.10	12.80	12.10	13.20	1.76	7.78	0.15	568.00	7.99	0.58	3.5	429.61	0.21	11.81
77	8.39	7.94	12.60	13.00	12.80	13.40	1.88	8.03	0.21	608.00	13.70	0.58	6.6	431.67	0.19	12.70
78	8.54	11.90	12.00	12.50	12.80	12.80	3.94	7.61	0.23	618.00	10.30	0.58	4.9	223.82	0.17	12.86
79	79.30	143.00	NG	NG	NG	116.00	66.05	154.60	34.20	1990.00	565.00	0.57	18.0	8700.00	0.10	101.10
80	79.40	142.00	NG	NG	NG	118.00	67.70	157.00	34.30	2020.00	565.00	0.57	19.0	8743.31	0.10	102.90
81	80.70	110.00	NG	NG	NG	87.90	46.50	80.90	21.10	1200.00	283.00	0.57	11.7	6846.59	0.10	81.20
82	76.30	157.00	NG	NG	NG	169.00	6.26	135.00	20.10	975.00	312.00	0.57	25.1	12357.74	0.10	169.07
83	38.90	87.20	NG	NG	NG	77.90	27.60	56.20	8.40	712.00	247.00	0.50	12.9	3101.07	0.13	60.30
84	60.70	124.00	NG	NG	NG	111.00	37.20	79.90	18.80	1270.00	349.00	0.57	16.5	6091.60	0.12	81.80
85	39.00	88.10	NG	NG	NG	78.30	25.50	61.40	7.37	694.00	197.00	0.50	13.3	4973.28	0.13	58.20
86	81.30	149.00	NG	NG	NG	172.00	53.20	115.00	40.70	967.00	220.00	0.57	20.3	10114.00	0.10	169.80

Tabelle A6.2- Experimentelle Ergebnisse(Fortsetzung)

VERS. NR.	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	P5 (bar)	P6 (bar)	P7 (bar)	F <sub>d</sub> (KN)	F <sub>u</sub> (KN)	I <sub>d</sub>	I <sub>u</sub>	DMAX (m)	VMAX (m/s)	AMAX (m/s <sup>2</sup> )	TMAX ( S )	P6-P7 (bar)
87	57.20	130.00	NG	NG	NG	120.00	40.20	99.50	20.30	796.00	246.00	0.57	17.9	5649.37	0.12	93.30
88	60.10	117.00	NG	NG	NG	97.50	28.60	81.20	13.70	860.00	276.00	0.57	15.7	9287.97	0.12	76.10
89	61.80	125.00	NG	NG	NG	98.60	25.50	87.80	9.70	947.00	303.00	0.57	14.9	10229.69	0.12	91.52
90	60.20	116.00	NG	NG	NG	94.40	12.50	86.20	4.65	1020.00	285.00	0.57	15.3	5703.26	0.12	91.56
91	20.30	48.10	NG	NG	NG	39.90	17.20	27.00	2.21	545.00	158.70	0.41	8.9	1945.81	0.14	28.30
92	78.50	132.00	NG	NG	NG	126.00	7.24	81.30	31.80	1040.00	251.00	0.57	18.4	8462.11	0.10	125.68
93	80.20	133.00	NG	NG	NG	122.00	39.80	134.00	14.30	1290.00	433.00	0.57	26.0	8029.41	0.10	88.70
94	61.20	81.00	NG	NG	NG	68.00	2.61	58.00	8.77	991.00	236.00	0.57	12.3	6170.63	0.13	67.30
95	39.60	61.80	NG	NG	NG	48.20	26.40	34.60	11.00	527.00	321.00	0.57	14.0	3958.08	0.10	35.00
96	60.20	94.00	NG	NG	NG	74.80	0.02	44.80	27.20	534.00	331.00	0.57	18.1	6552.53	0.07	74.79
97	3.85	132.00	NG	NG	NG	119.00	55.50	79.20	32.70	1230.00	787.00	0.57	18.2	7932.82	0.06	86.69
98	3.95	97.60	NG	NG	NG	82.60	48.50	59.10	43.10	665.00	412.00	0.57	14.3	8676.79	0.06	67.40
99	3.78	158.00	NG	NG	NG	343.00	47.20	107.00	71.20	493.00	310.00	0.57	22.7	7584.20	0.06	150.80
100	59.90	130.00	NG	NG	NG	159.00	44.10	95.40	11.20	1090.00	239.00	0.50	15.7	6383.87	0.19	126.90
101	80.30	145.00	NG	NG	NG	242.00	45.60	128.00	18.00	1390.00	305.00	0.57	18.7	7827.84	0.18	182.40
102	78.80	148.00	NG	NG	NG	149.00	49.40	115.00	19.10	1150.00	264.00	0.57	19.0	9039.94	0.18	117.60
103	79.60	127.00	NG	NG	NG	119.00	39.70	86.90	10.80	1590.00	350.00	0.57	11.9	7096.46	0.18	96.30
104	79.90	149.00	NG	NG	NG	154.00	40.80	162.00	9.43	950.00	209.00	0.57	23.2	19644.61	0.18	126.20
105	60.50	84.00	NG	NG	NG	77.90	25.20	54.30	11.30	929.00	284.00	0.57	14.6	5134.98	0.12	62.70
106	79.40	58.60	NG	NG	NG	59.20	33.20	75.90	15.90	1100.00	252.00	0.57	18.2	8165.00	0.13	76.00
107	79.40	58.60	NG	NG	NG	59.20	33.20	78.90	16.90	1100.00	253.00	0.57	18.2	8165.00	0.13	26.00
108	79.40	58.60	NG	NG	NG	59.20	33.20	73.90	14.90	1100.00	253.00	0.57	18.2	8165.00	0.13	26.00

## A6.2- Effekt der Luftmikroblasen

-----

Die Versuche mit Einphasenströmung wurden mit destilliertem - aber nicht entlüftetem - Wasser durchgeführt. In diesen Versuchen hat die Kavitation oberhalb der Tauchplatte einen starken Effekt auf die Strömung.

Im Prinzip könnte diese Kavitation von der Größe der im Wasser gelösten Luftblasen beeinflusst werden /40/. Um diese Frage zu untersuchen wurden zwei identische Versuche mit Einphasenströmung (Versuche Nr. 11 und Nr. 23) durchgeführt.

Dazu wurde normales (Nr.11) und mit einer Vakuumpumpe entlüftetes Wasser (Nr. 23) benutzt. In Abb. A6.1 und Tabelle A6.3 sind die die Ergebnisse der zwei Versuche dokumentiert.

Die Abweichung zwischen beiden Versuchsergebnissen ist gering.

Größe	Versuche	
	11	23
P1(bar)	102	100
P2(bar)	80	79
P3(bar)	80	78
P6(bar)	>60	72
P7(bar)	>15	25
Fu(KN)	139	138
Fo(KN)	18	20
Iu	2210	2200
Io	305	336
Dmax(m)	0.56	0.56
Vmax(m/s)	8.7	8.1
Amax(m/s <sup>2</sup> )	8830	8759
Tmax(s)	0.18	0.16
Kc	0.015	0.017
Vc	0.487	0.481

Tabelle A6.3- Vergleich zwischen den  
Meßdaten der Versuche Nr.11 und Nr. 23



## A7. - Beobachtung der Strömung und Filmauswertung

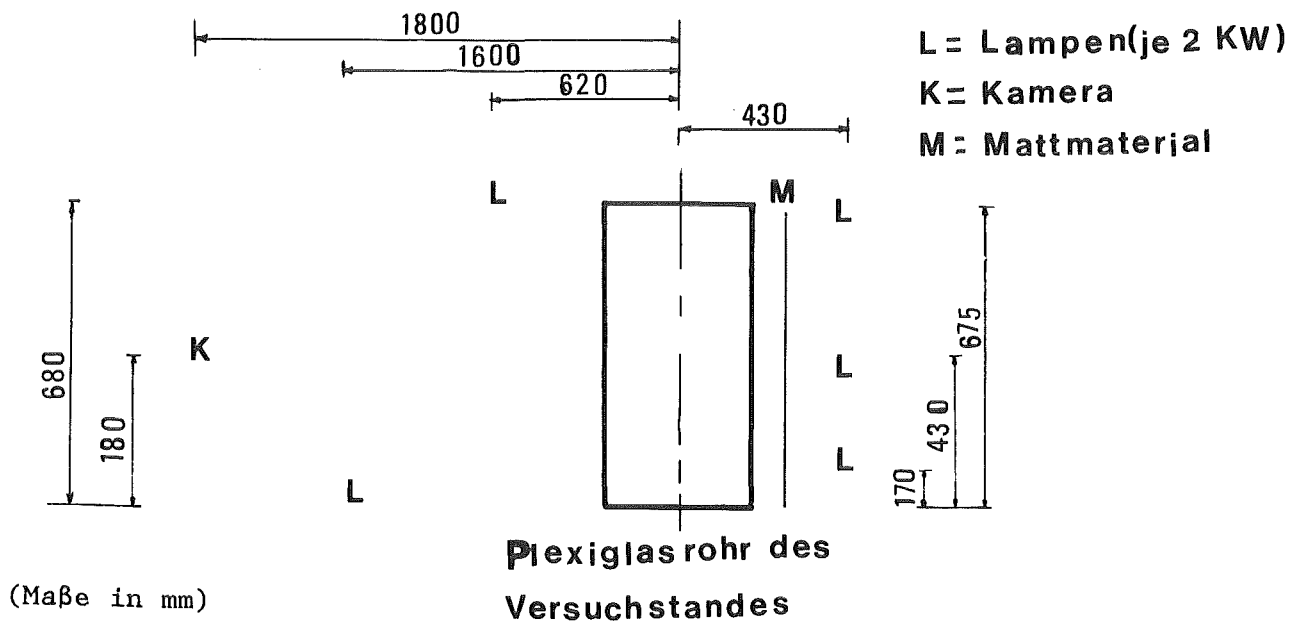
-----

In jedem Versuch wurde die Strömung abwärts der perforierten Platte mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt, deswegen war der obere Teil des Versuchstandes aus Plexiglas gefertigt. Zwei verschiedene Kanäle aus Plexiglas wurden verwendet. Der erste Typ (s. Abb. A1.6) wurde für die Versuche 1 bis 78 benutzt. Er besteht aus einem normalen Rohr mit 5 mm Wandstärke. Der zweite Typ, für die Versuche 78 bis 108, besteht aus einem durchgebohrten Quader (s. Abb. A1.2). Die Benutzung dieses zweiten Rohres mit einer minimalen Wanddicke von 50 mm war für die Versuche bei höheren Drücken notwendig, um die mechanische Festigkeit des Rohres zu gewährleisten. Außerdem wurde die Doppelbrechung des Lichts durch die flache Außenwand des Parallelepipedes vermieden /52,53,54/.

### A7.1 - Beleuchtung

-----

Die Beleuchtung ist für das Filmen einer Zweiphasenströmung sehr wichtig. Die Grenzfläche zwischen den Luftblasen und dem Wasser bewirkt eine Brechung sowie Reflektion des Lichts. Daraus ergibt sich eine lineare Verzerrung /53,54/. Um diese Verzerrung zu verkleinern wurde die folgende Lampenanordnung benutzt :



Ein Ultraphanfolie(Mattmaterial) hängt zwischen den Lampen und dem Versuchstand um den richtigen Lichtkontrast zu realisieren.

## A7.2 - Beispiele der Beobachtung der Strömung

-----

In Abb. A7.1 sind einige Bilder aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm vom Versuch Nr. 2 dargestellt. Dieser Versuch wurde mit einer Platte mit Einzelloch mit 0.12 Perforationsverhältnis , Einphasenströmung (Wasser) und hohem Wasserstand ( 227 mm) durchgeführt. Als Beschleunigungsvorrichtung wurde das Ventil Nr. 1 benutzt. Die Filmgeschwindigkeit war in diesem Fall 5500 Bilder/s.

Im Bild Nr. 1 ist das Wasser noch in Ruhe. Der Blitz auf dem Film befindet sich 19 ms früher. In den folgenden Bildern (bis zum Bild Nr. 6) sieht man einen torusförmigen Wirbel, der sich 62 mm oberhalb der Tauchplatte bildet. Im Bild Nr. 7 kommt der Strahl aus der Tauchplatte. In dem Bild Nr. 8 durchbricht der Strahl den torusförmigen Wirbel. Man kann deutlich die Bewegung der Wasseroberfläche erkennen. In den Bildern 9-14 sieht man, wie der Strahl sich nach oben bewegt und wie sich die Turbulenz oberhalb der Tauchplatte verbreitet. Die Geschwindigkeit des Strahls ist größer als die der Wasseroberfläche. Der Strahlkopf setzt seine Bewegung fort und ist 18 ms nach Beginn der Wasserbewegung fast so breit wie das Testrohr (Bild Nr. 15). In dem Bild Nr. 21 erreicht der Strahl die Mischungsoberfläche und durchbricht sie. Vor der Durchbohrung (Bilder 16-20) hat die Mischungsoberfläche eine Deformation, die proportional zur Höhe des Wassers oberhalb der Tauchplatte ist. In den Bildern 22-34 nach der Durchbohrung ist der Strahl sehr unregelmäßig, allerdings breiter als die Bohrung der Tauchplatte, er strömt in den letzten Teil des Plexiglasrohres und verschwindet in dem unsichtbaren Teil des Versuchstandes.

In Abb. A7.2 sind einige Bilder von Versuch Nr. 15 gezeigt. Dieser Versuch wurde mit Zweiphasenströmung und einer Platte mit Einzelloch mit 0.171 Perforationsverhältnis und hohem Mischnugsniveau (160 mm) durchgeführt. Die Luft wurde durch vier Tüllen ins Wasser eingeblasen. Der Luftvolumenanteil war 0.023. Das Ventil Nr. 1 war die Beschleunigungsvorrichtung dieses Versuches. In den ersten Bildern (1-3) ist die Mischungsoberfläche in Ruhe. Kleine Luftblasen strömen aus der Tauchplatte heraus und stoßen gegen die Mischungsoberfläche. Im Bild Nr. 4 kommt der Strahl aus der Platte. Die Luftblasen oberhalb der Tauchplatte werden beschleunigt. Der Strahl setzt seine Bewegung fort und im Bild Nr. 11, 17 ms nach der erster Bewegung der Mischungsoberfläche, durchbricht er sie. Dann verschwindet der Strahl in den unsichtbaren Teil des Versuchstandes.

In Abb. A7.3 sind einige Bilder von Versuch Nr.65 gezeigt. Dieser Versuch wurde bei Zweiphasenströmung, mit einer Einzellochplatte (0.25 Perforationsverhältnis) und mit einem hohem Mischnugsniveau oberhalb der Tauchplatte (227 mm) durchgeführt. Die Luft wurde durch Scheiben aus Sinterbronze ins Wasser eingeblasen. Der Luftvolumenanteil war 0.04. Das Ventil 2 war die Beschleunigungsvorrichtung dieses Versuches. Die Filmgeschwindigkeit betrug 4750 Bilder/s. In diesem Fall findet keine Durchbohrung der Mischungsoberfläche im sichtbaren Teil des Plexiglasrohrs statt.

#### A7.3 - Filmauswertung

-----

Aus den Hochgeschwindigkeitsfilmen wurden mit dem Apparat 'HD-Projektor-Digitalschirm' (Abb. A7.4) die experimentellen Daten ermittelt. Diese

wurden auf einen Commodore-Computer gespeichert /55/ und dann auf Magnetbänder geschrieben, um auf der Großrechenanlage (IBM) weiterverarbeitet zu werden. Eine Liste der entwickelten Programme für die Auswertung wird in Tab. A7.1 gegeben.

Die vollständige Darstellung der Ergebnisse wird in /51/ angegeben.

---

a- Formattierung der Daten (von Floppy-Disk oder direkt)	FILMF
b- Berechnung der Kamera-, Blasen-, Mischungsoberflächen-, Strahl- geschwindigkeit und grafische Darstellung	FIL2F
c- Synchronisierung zwischen den Filmdaten und den Meßergebnissen vom Bandgerät. Mischungsoberflächenweg und Strahlweg werden als Funktion des Kolbenwegs dargestellt. Zahlenmäßige Erfassung weiterer Meßgrößen für die Auswertung(z.B. Kavitationsvolumen).	FID1

---

Tab. A7.1 - Liste der Programmen für die Filmauswertung.

Für die Berechnung der Bewegung der Mischungsoberfläche ist es notwendig den Einfluß der Luftblasen zu berücksichtigen. Die Luftblasen, die im Wasser steigen, beschleunigen eine kleine Wassermenge. Die Form dieser Wassermenge ist eine Halbkugel. Ein Strahl bildet sich oberhalb der Mischungsoberfläche aus, wenn diese Blasen gegen sie stoßen. Die Form eines solchen Strahls ist ein Hyperboloid /56,57,58/. Durch die Beschleunigung der zweiphasigen Mischung werden die Luftbläschen senkrecht zur Hauptströmungsrichtung abgeflacht. Dieser Effekt führt auch zur Strahlaufweitung. (s. Abb. A7.5).

Die Form dieser Strahlen wurde mit zylinderförmigen Elementen angenähert und deren Volumen für die Berechnung der Bewegung der Mischungsoberfläche benutzt.

Zur Bestimmung des Durchmessers einer Blase wurde eine weitere Korrektur eingeführt. Die wirkliche Blasengröße  $d_b$  liegt wegen der Linsenwirkung des Wassers und des Plexiglasrohs unterhalb der scheinbaren  $d_a$ . Der Korrekturfaktor dieser Effekte wurde der Literatur entnommen /59/.

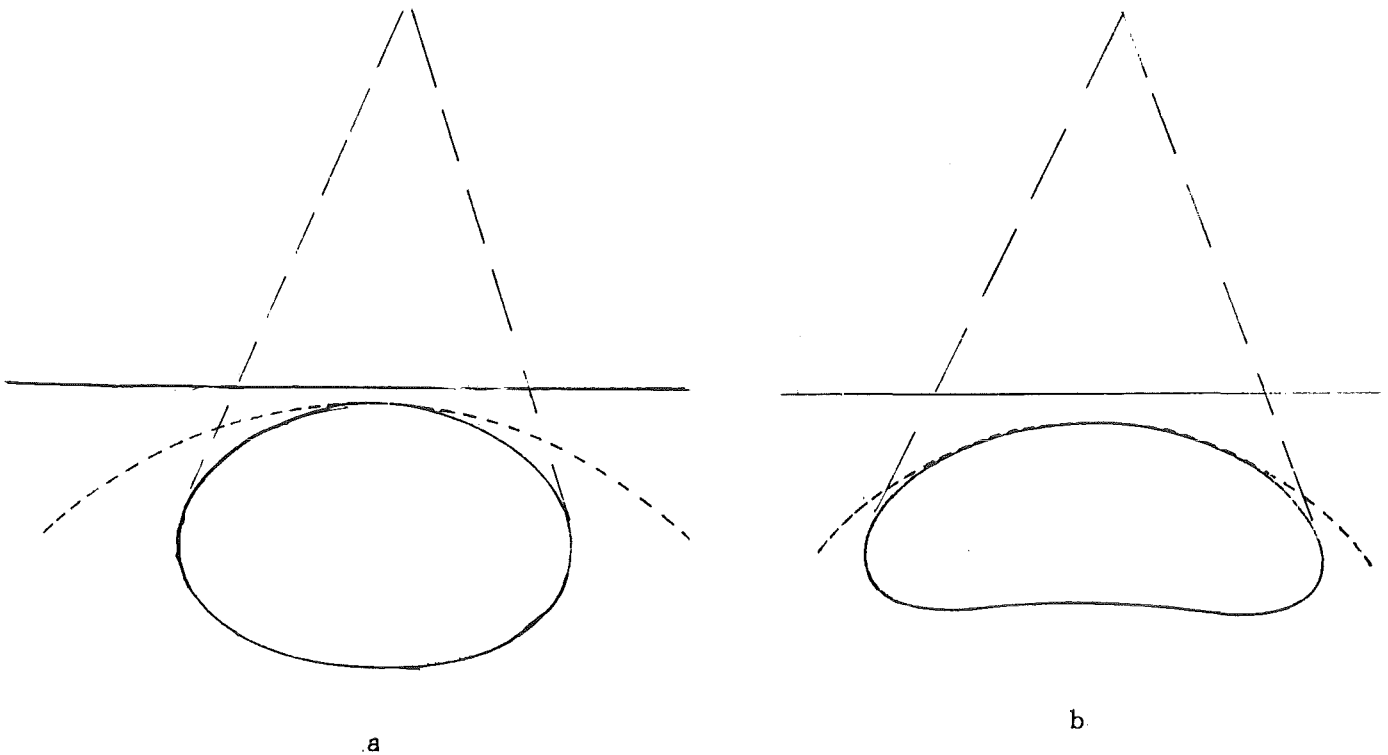


Abb. A7.5 - Blasen gegen die Mischungsoberfläche  
a- Im stehenden Wasser; b- Im beschleunigten Wasser

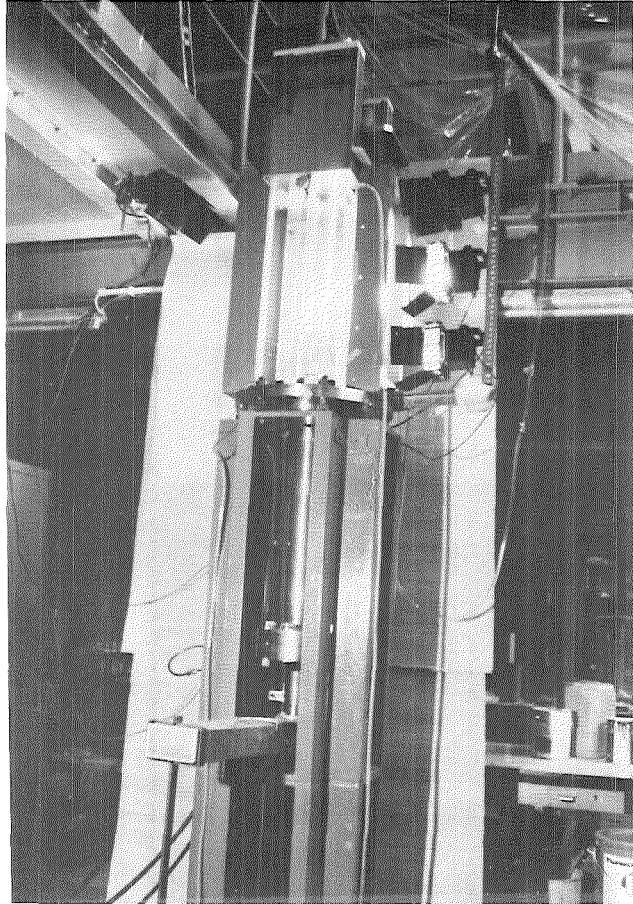


Abb. A1.1- Gesamtansicht des Versuchstandes.

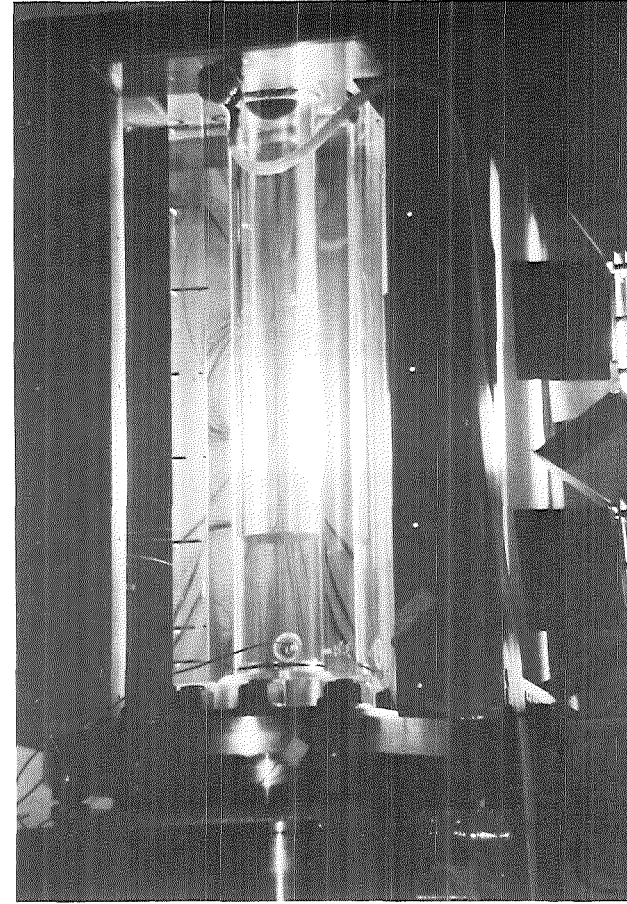


Abb. A1.2- Durchsichtiger Testzylinder.

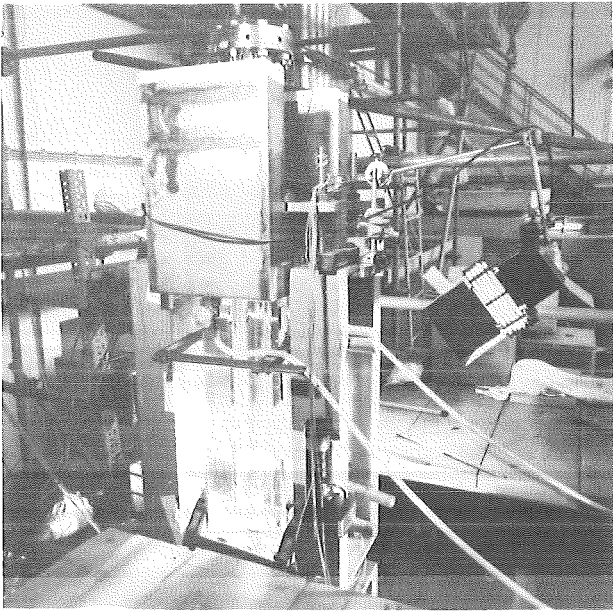


Abb. A1.3- Oberer Teil des Versuchstandes.

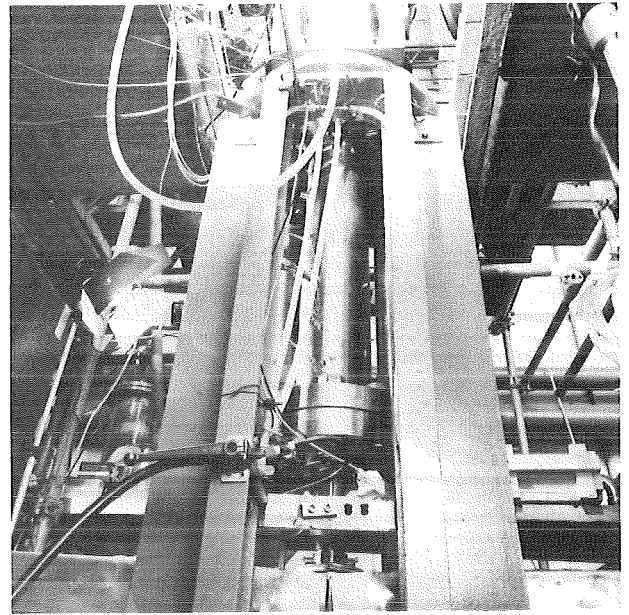


Abb. A1.4- Unterer Zylinder.

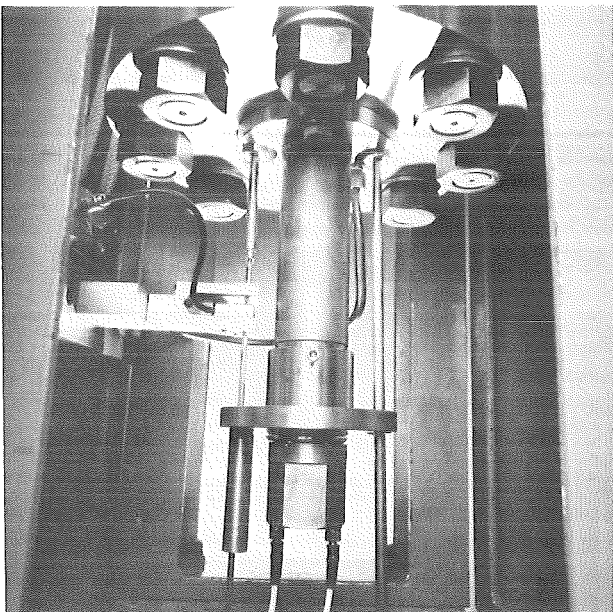


Abb. A1.5- Vorrichtung mit Explosionsmutter.

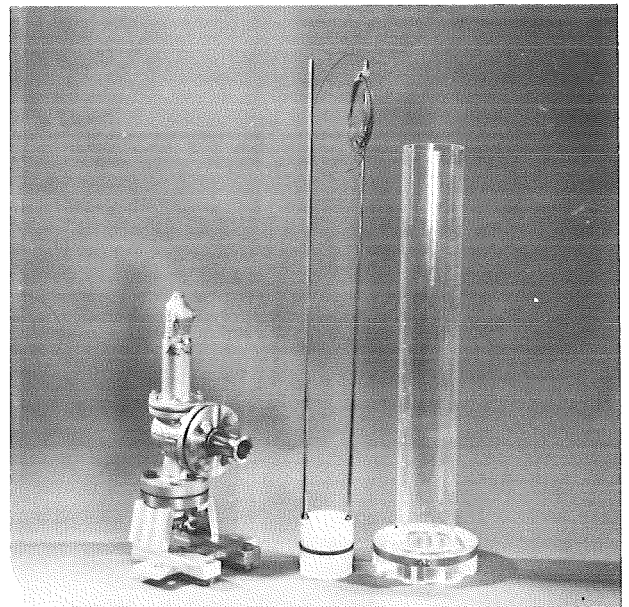


Abb. A1.6- Ansicht des Ventils 2,  
des Kolbens aus PVC und des  
Plexiglaszylinders.



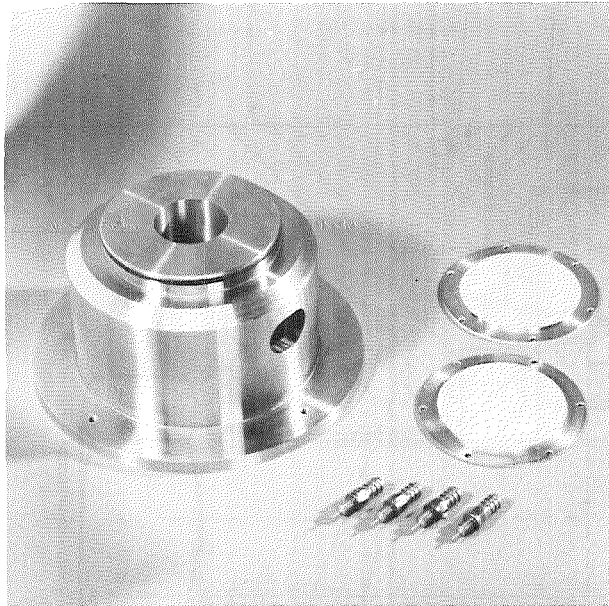


Abb. A1.7- Ansicht der Tauchplatte, der Scheiben aus Sinterbronze und der Tüllen.



Abb. A1.8- Ansicht des Kolbens aus Hartaluminium und der Sprengkapseln.

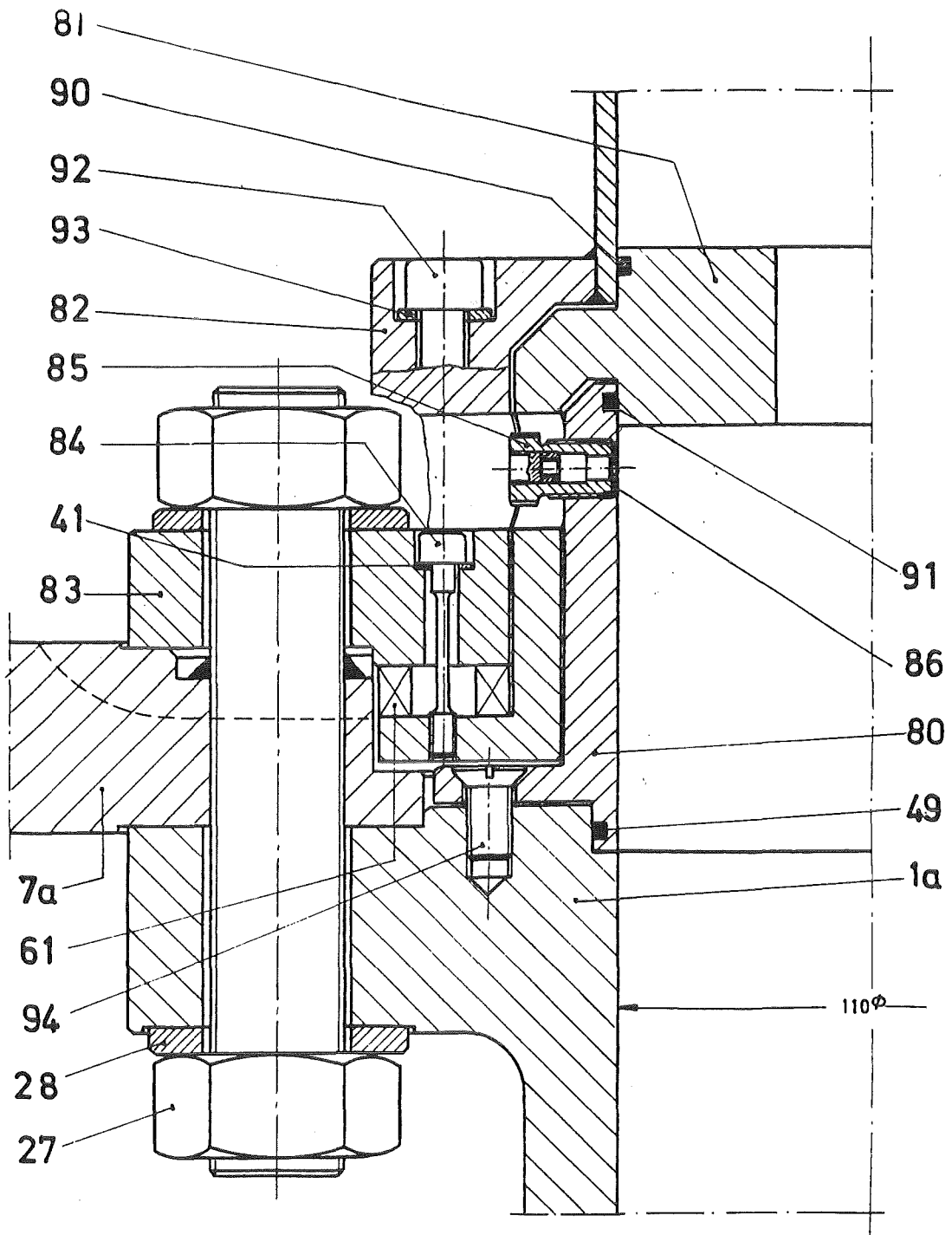


Abb. A1.9- Tauchplatte

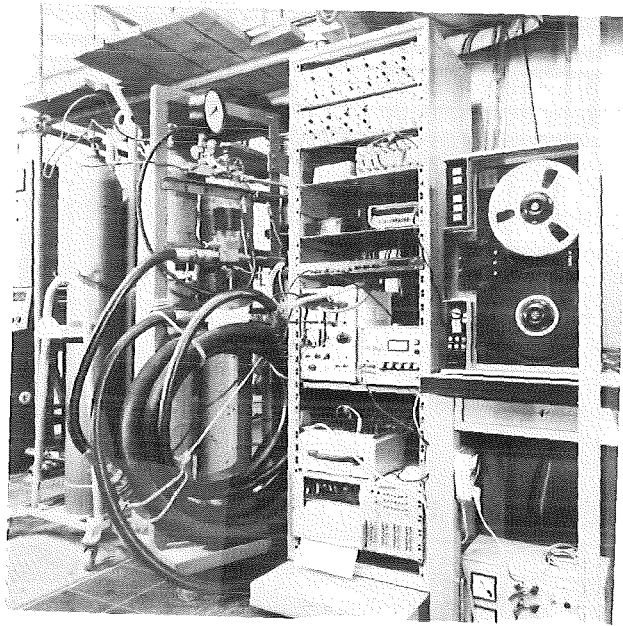


Abb. A2.1- Instrumentierung.

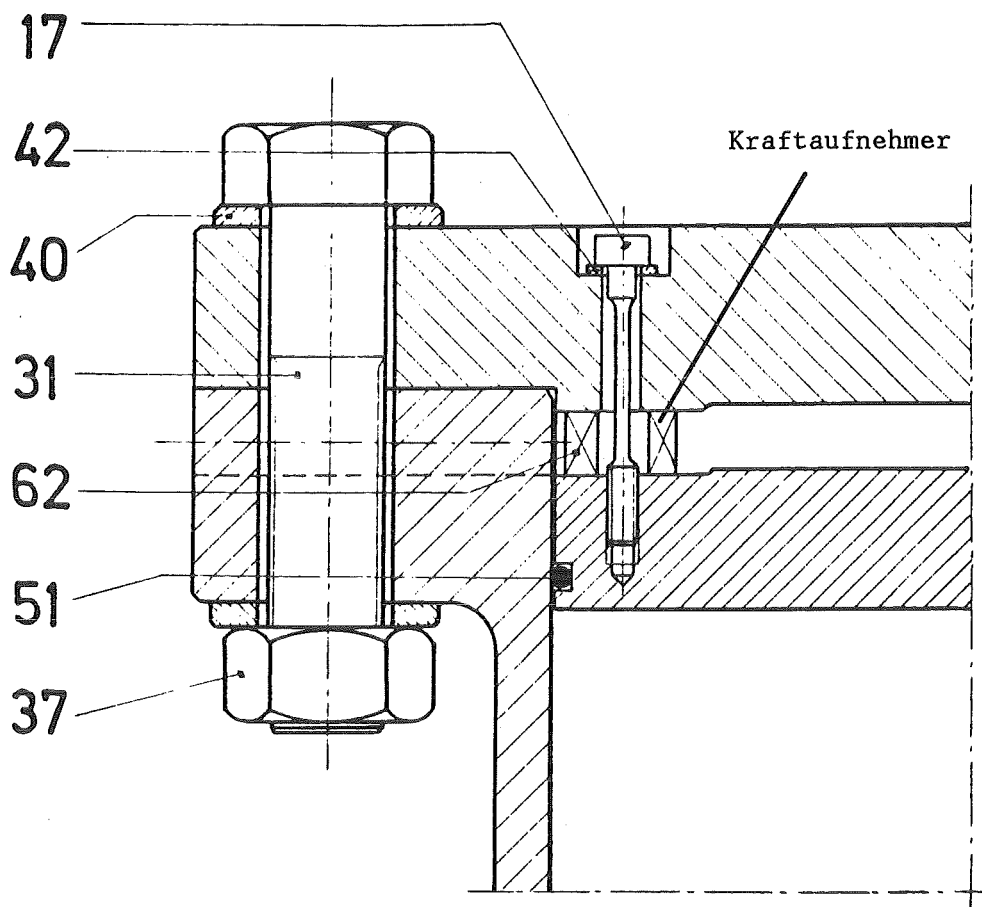


Abb. A2.2- Detail eines Kraftaufnehmers.

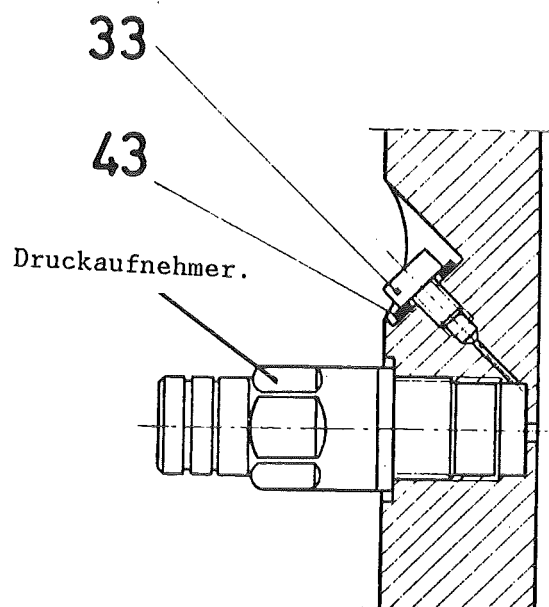
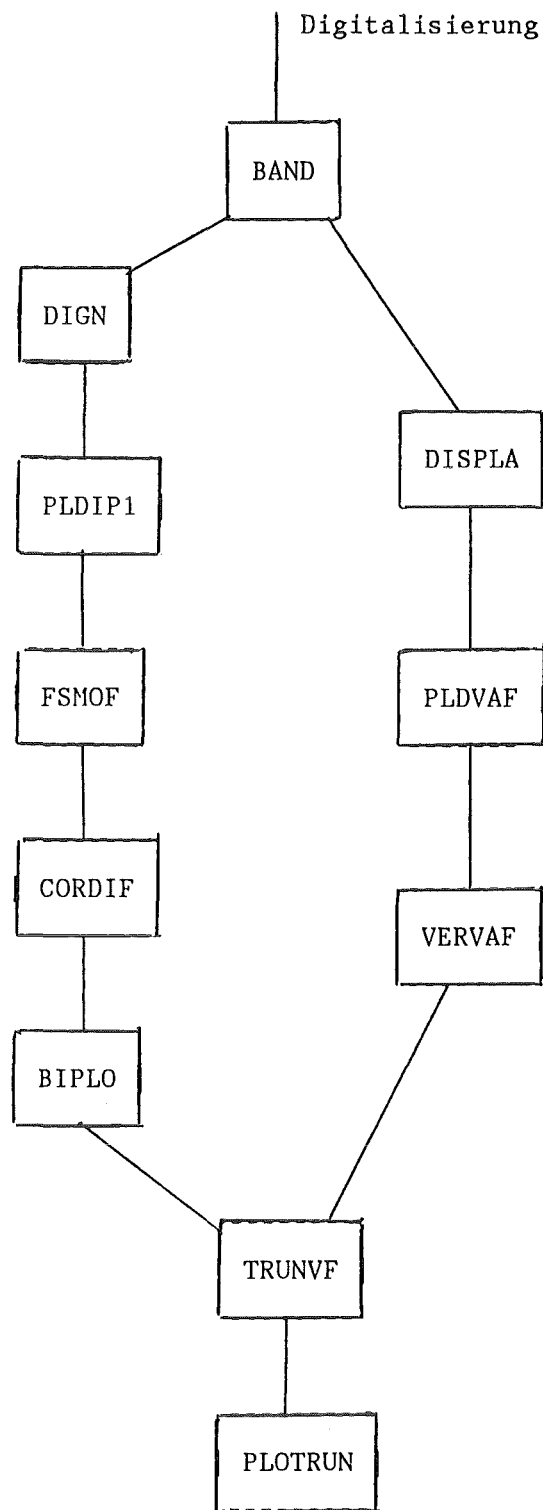


Abb. A2.3- Detail eines Druckaufnehmers.



(gültige Signale)

Abb. A3.1 - Umwandlung der Signale.

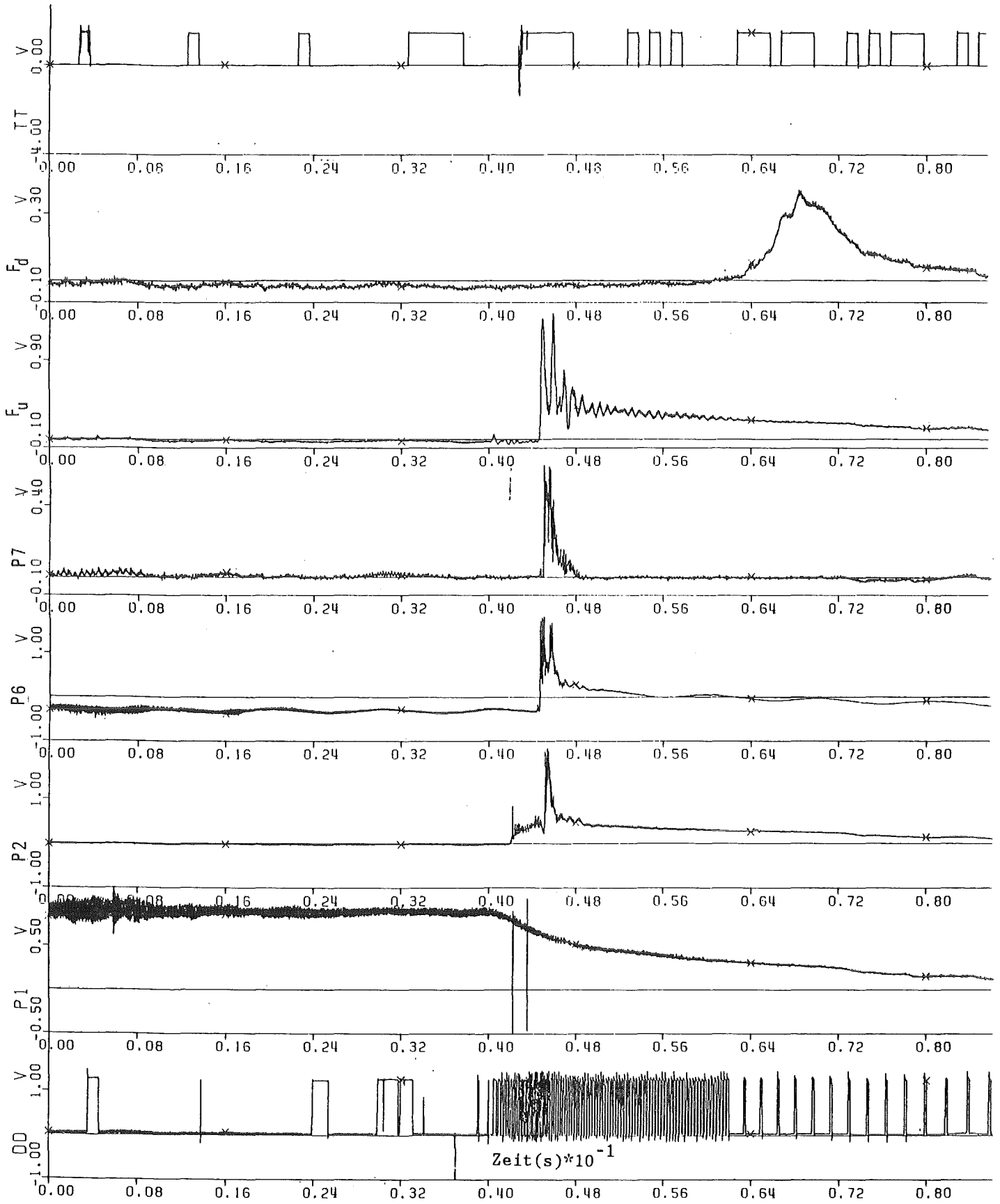
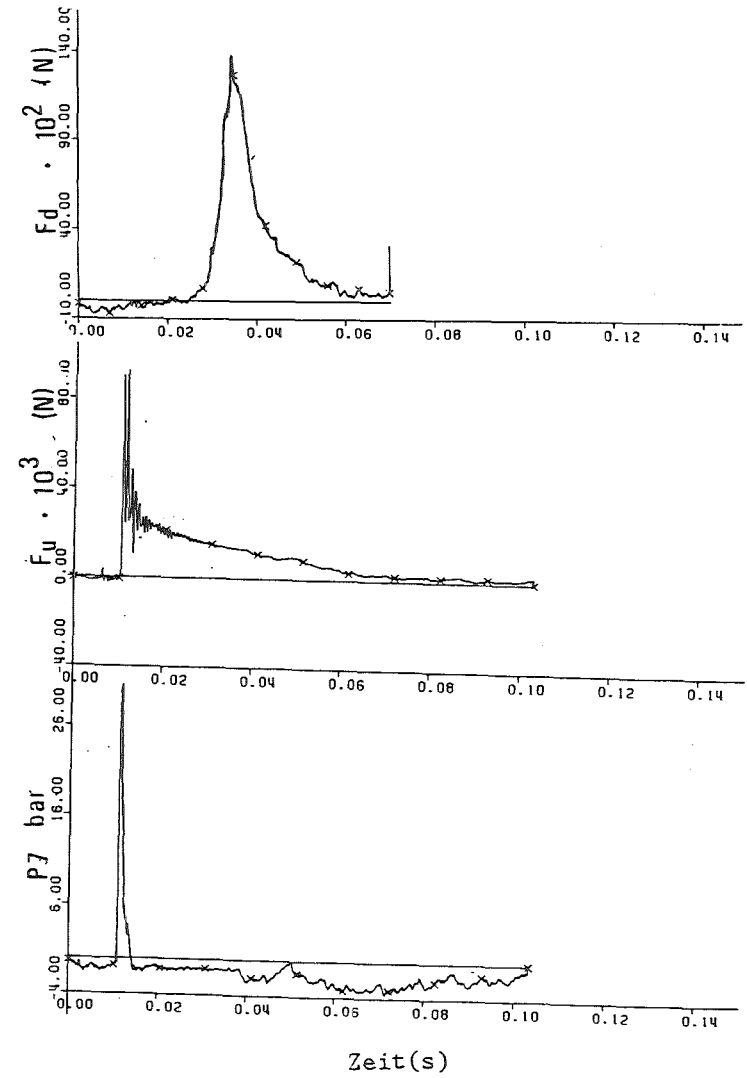
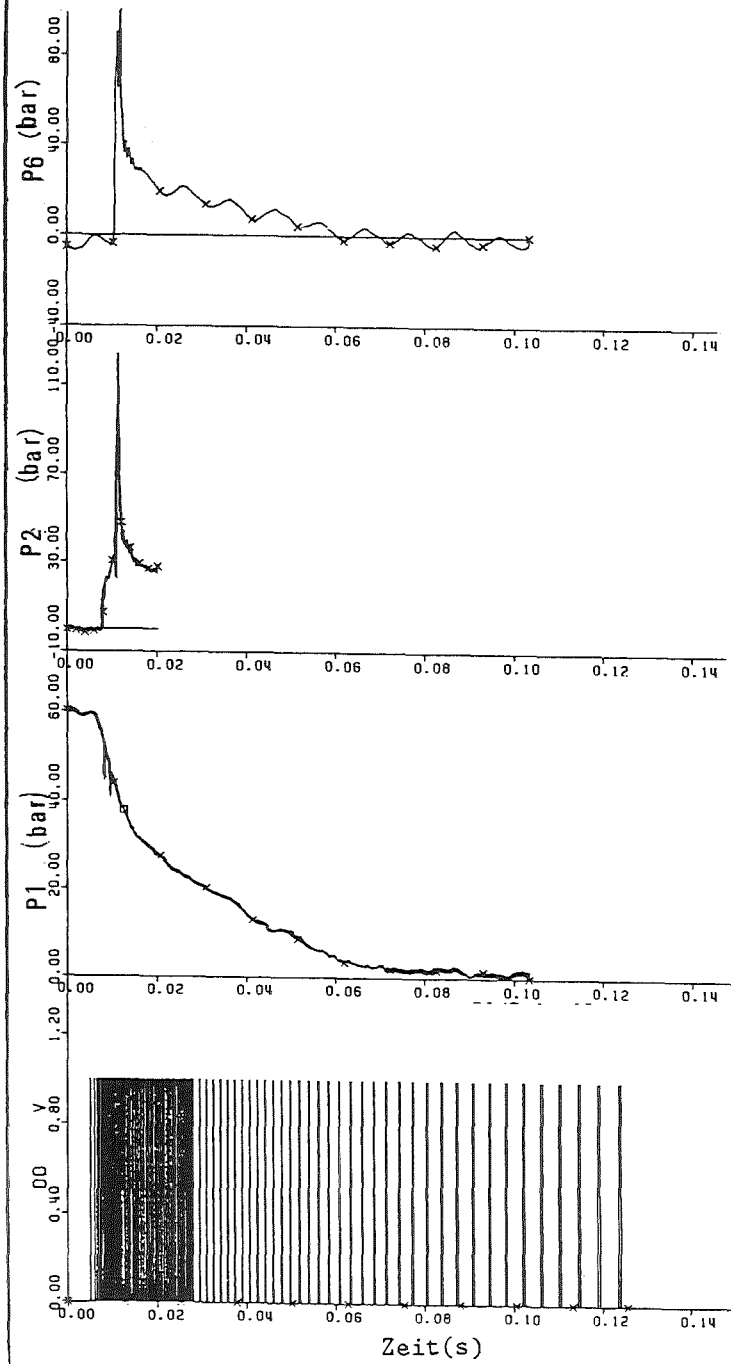


Abb. A3.2- Digitalisierte Meßsignale (Volt ).

Abb. A3.3- Gültige digitalisierte Meßsignale.



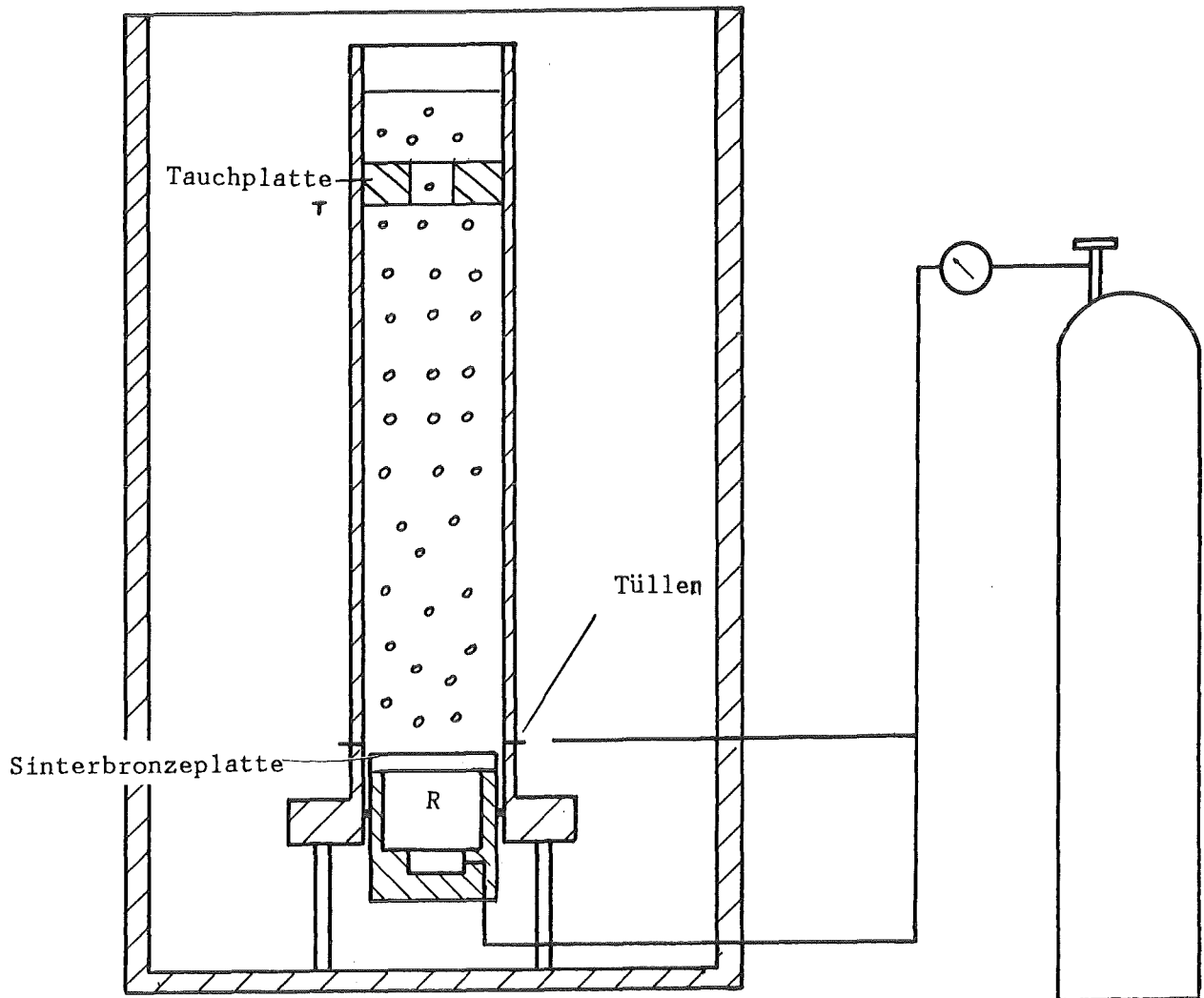


Abb. A5.1- Schematische Darstellung des "Kleinen Versuchstandes".



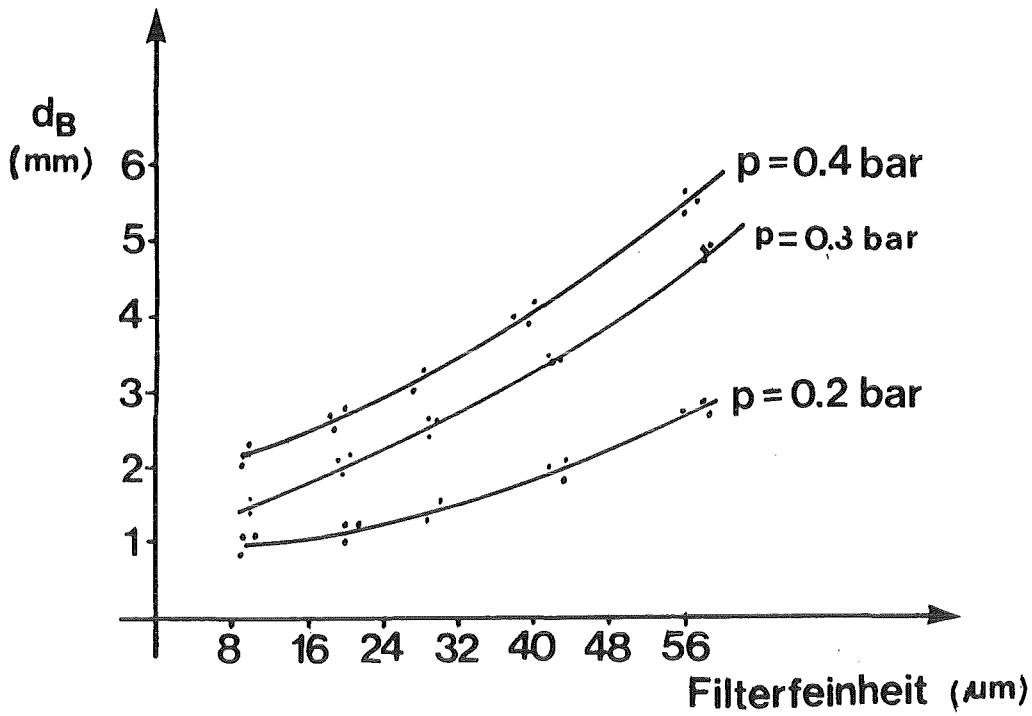


Abb. A5.2- Durchmesser der Luftblasen als Funktion der Filterfeinheit.

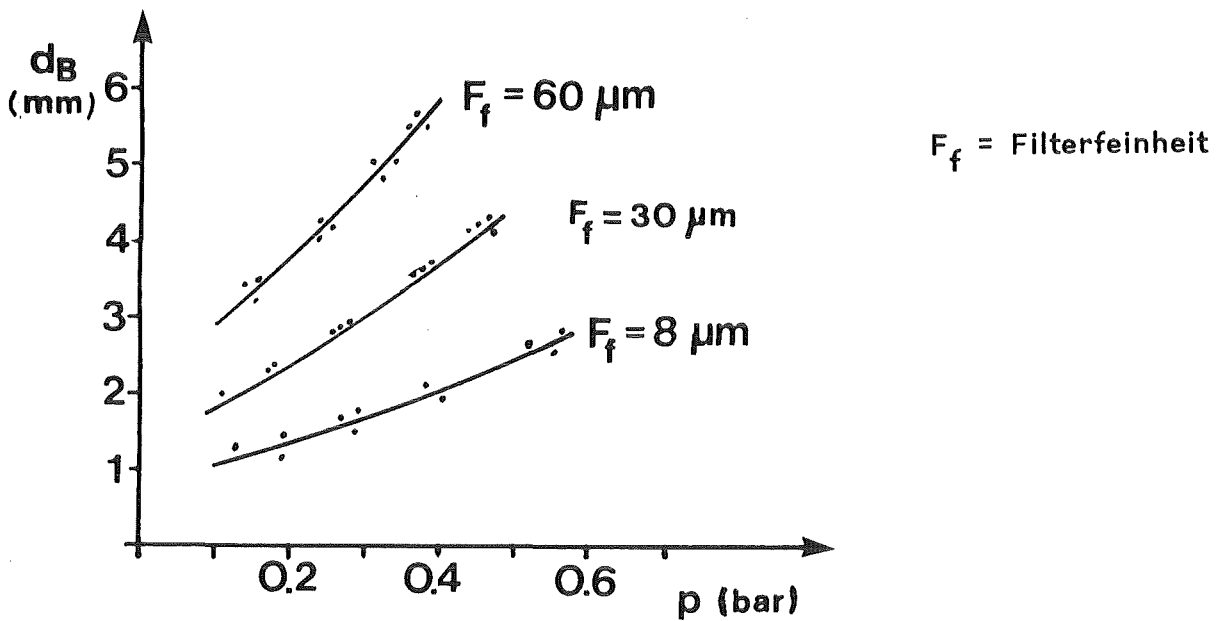


Abb. A5.3- Durchmesser der Luftblasen als Funktion des Eingangsdruckes.

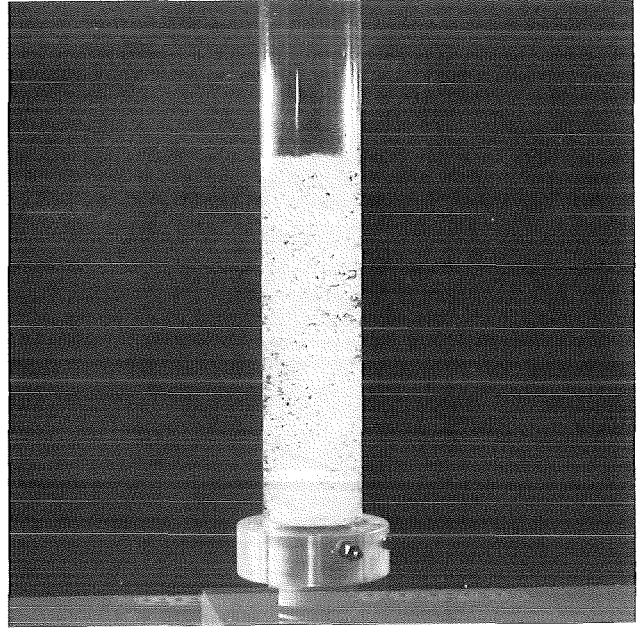
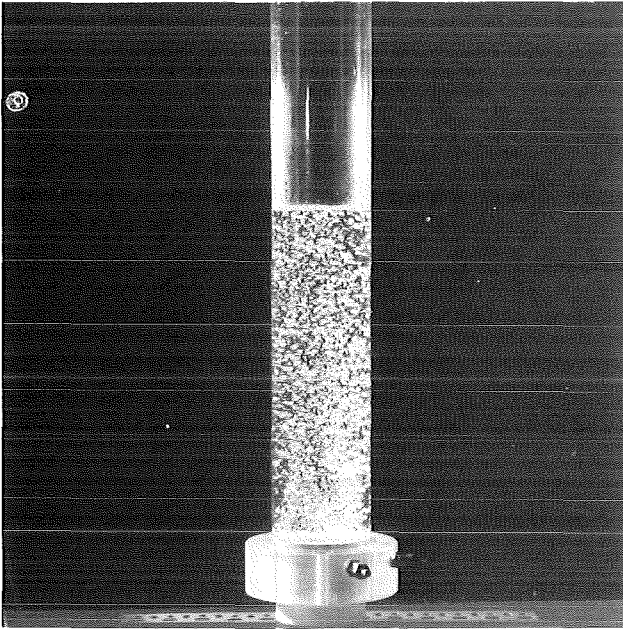


Abb. A5.4- Luftblasen im kleinen Versuchstand- ohne Tauchplatte.

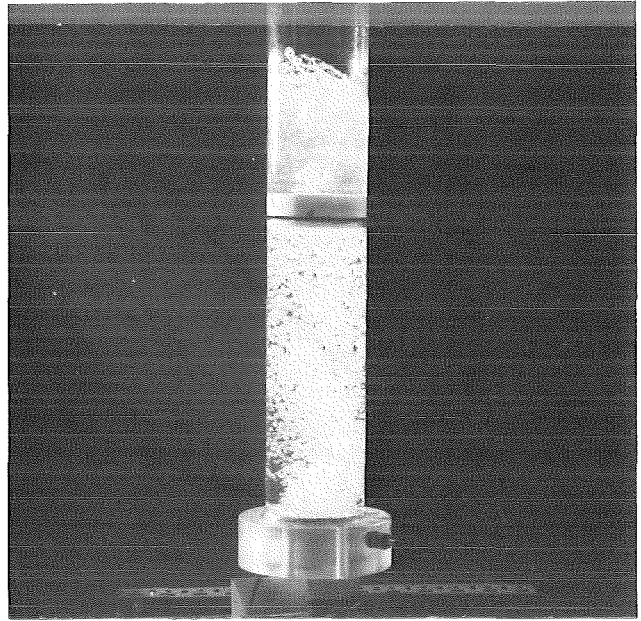
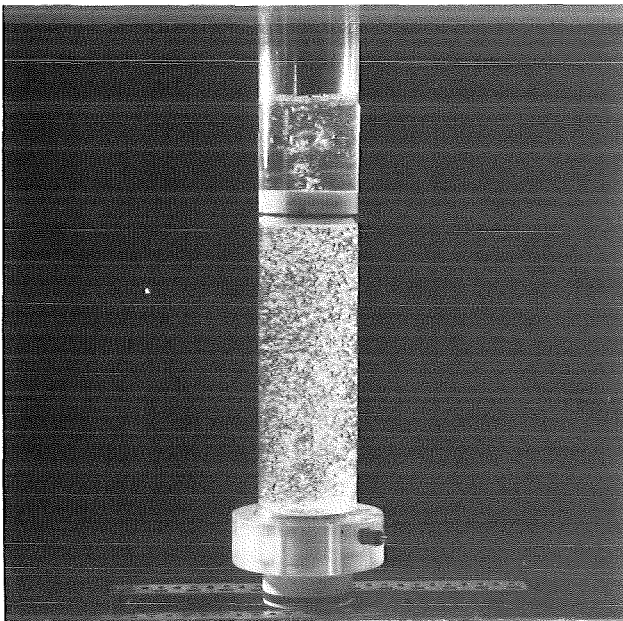


Abb. A5.5- Luftblasen im kleinen Versuchstand- mit Tauchplatte.

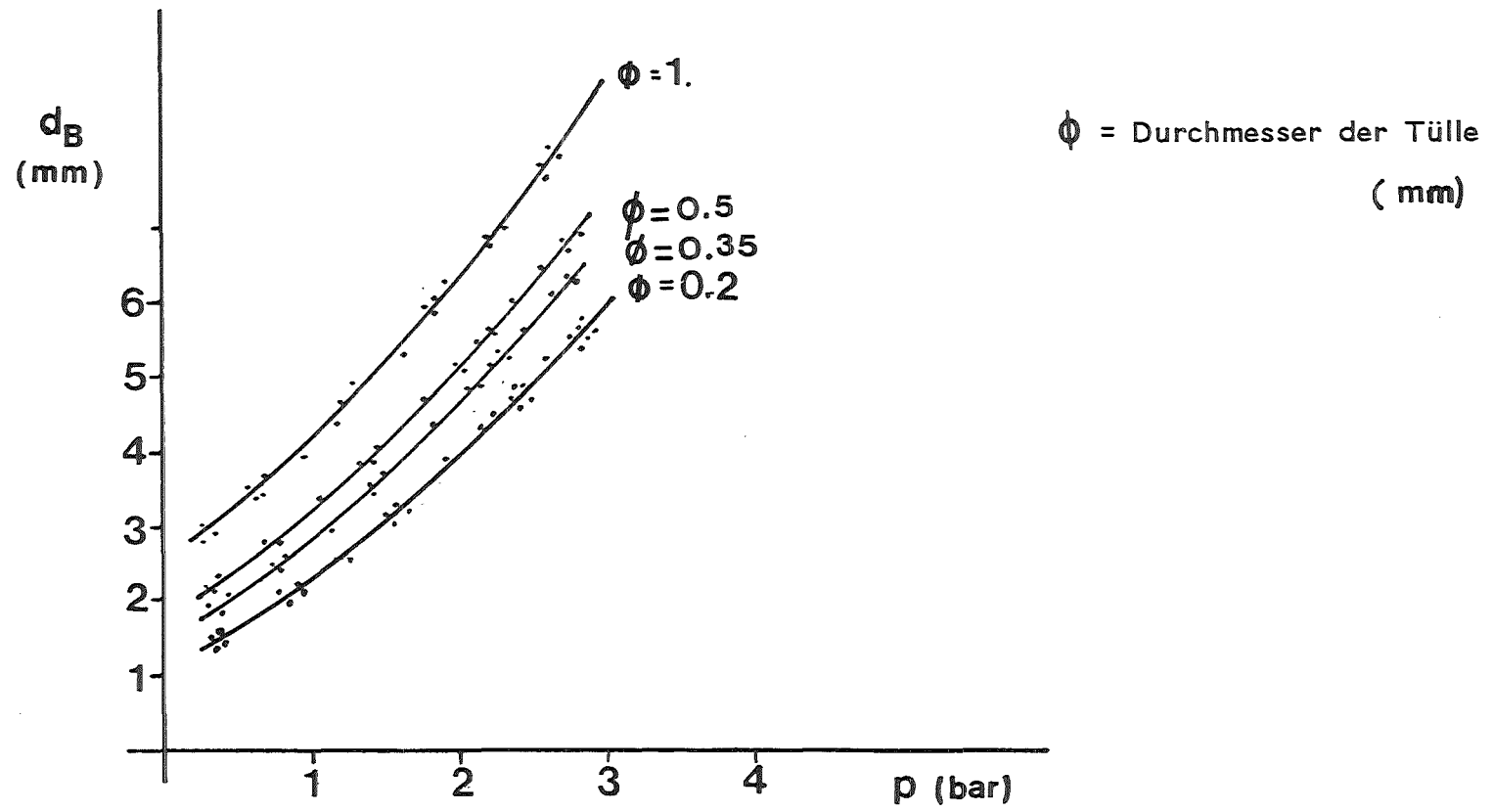


Abb. A5.6- Blasendurchmesser als Funktion des Druckes (Tüllen)

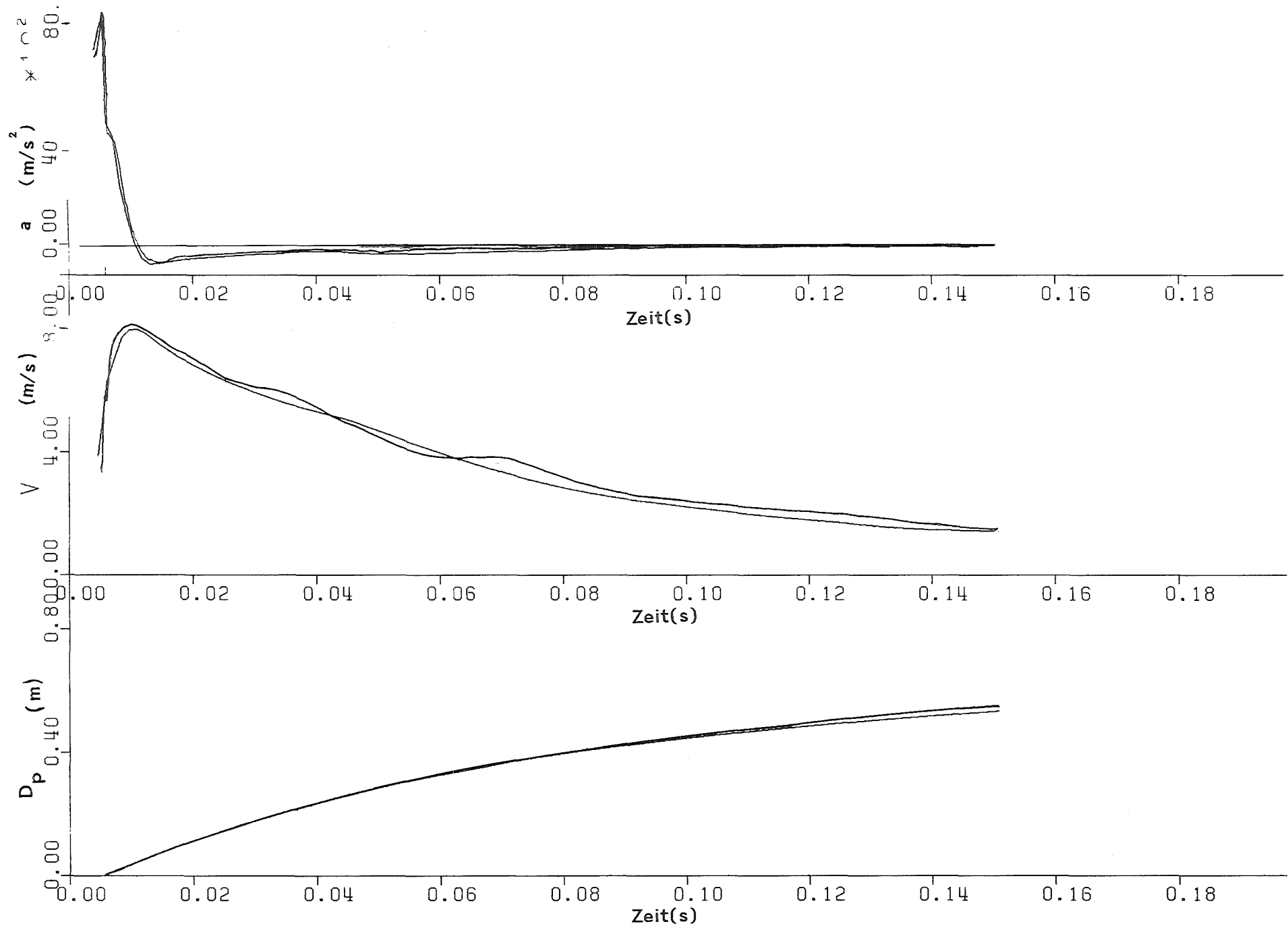


Abb. A6.1- Vergleich zwischen den Versuchen Nr. 11 (destilliertes Wasser) und Nr. 23 (entlüftetes Wasser).

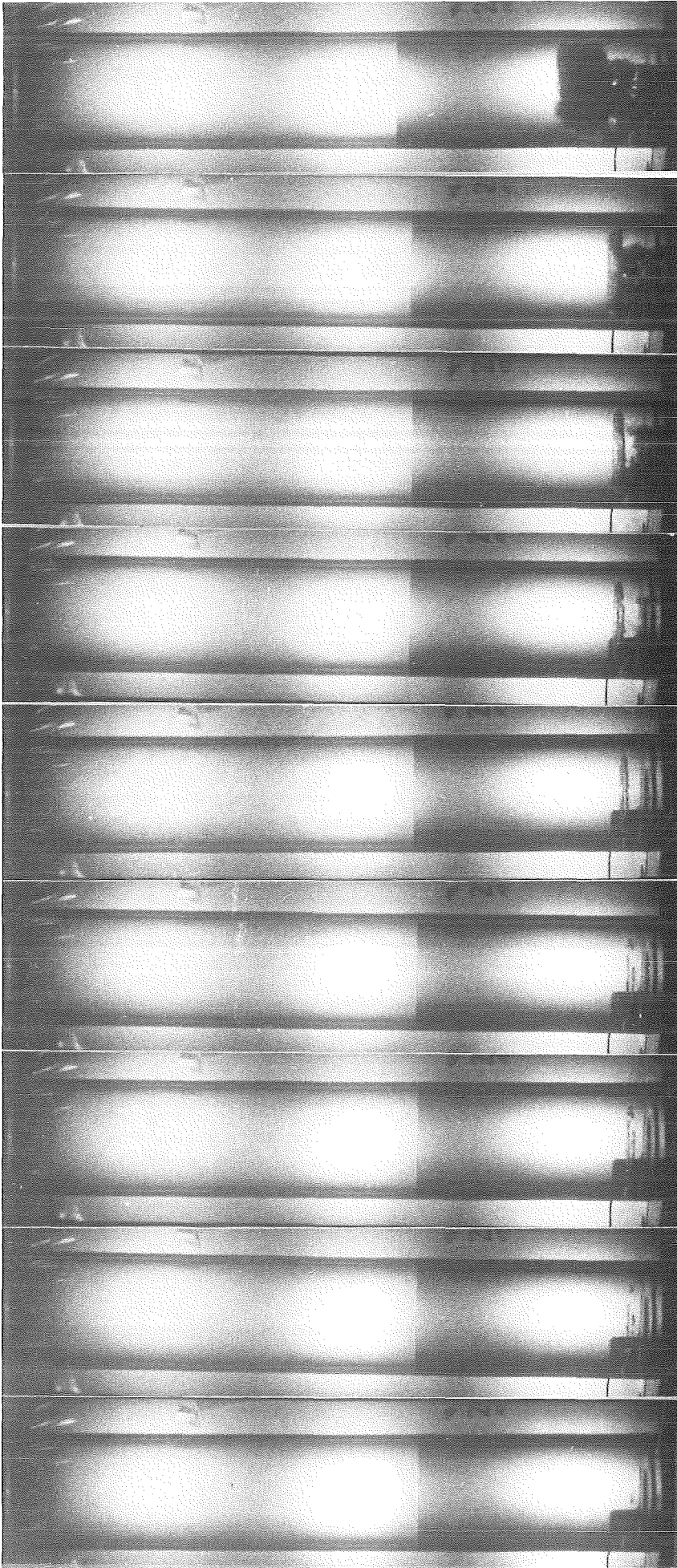


Abb. A7.1- Versuch Nr.2 - Einphasenströmung - Bilder 1-9

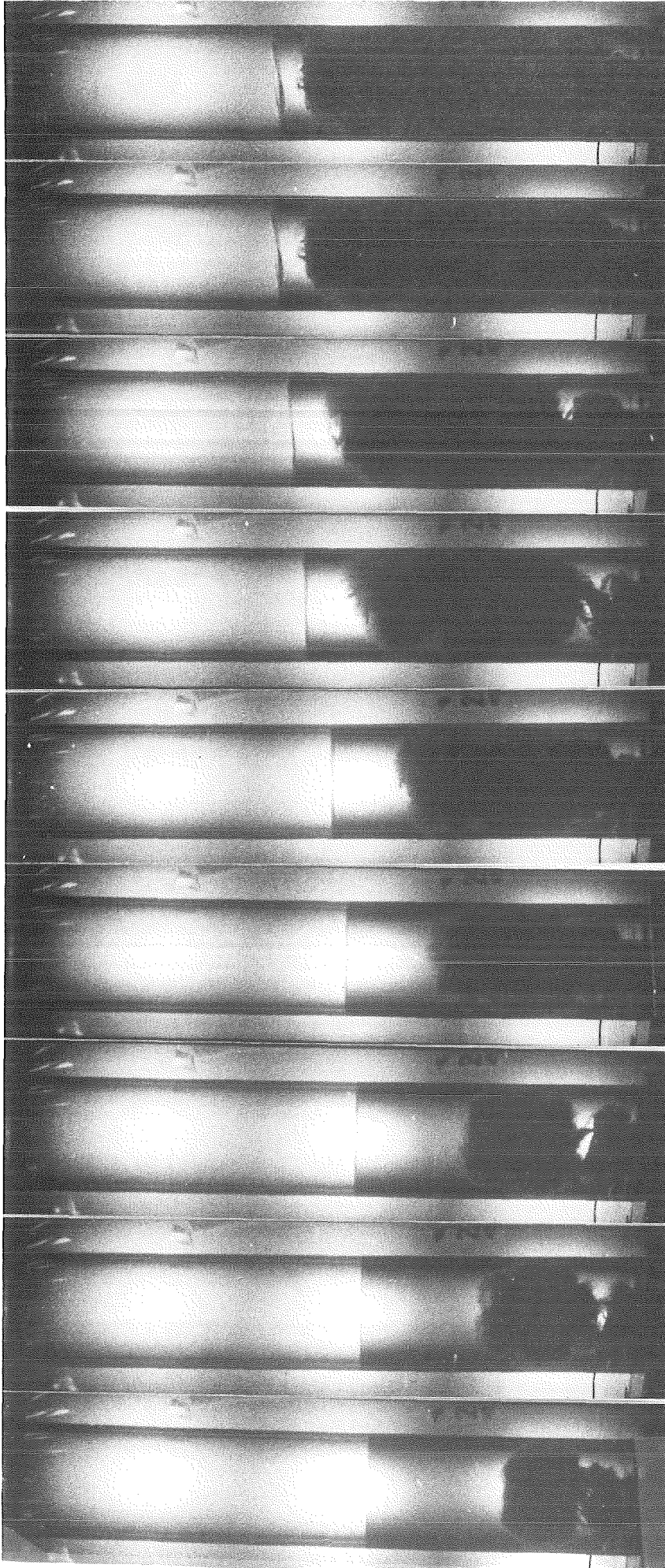


Abb. A7.1- Versuch Nr.2 - Einphasenströmung - Bilder 10-18

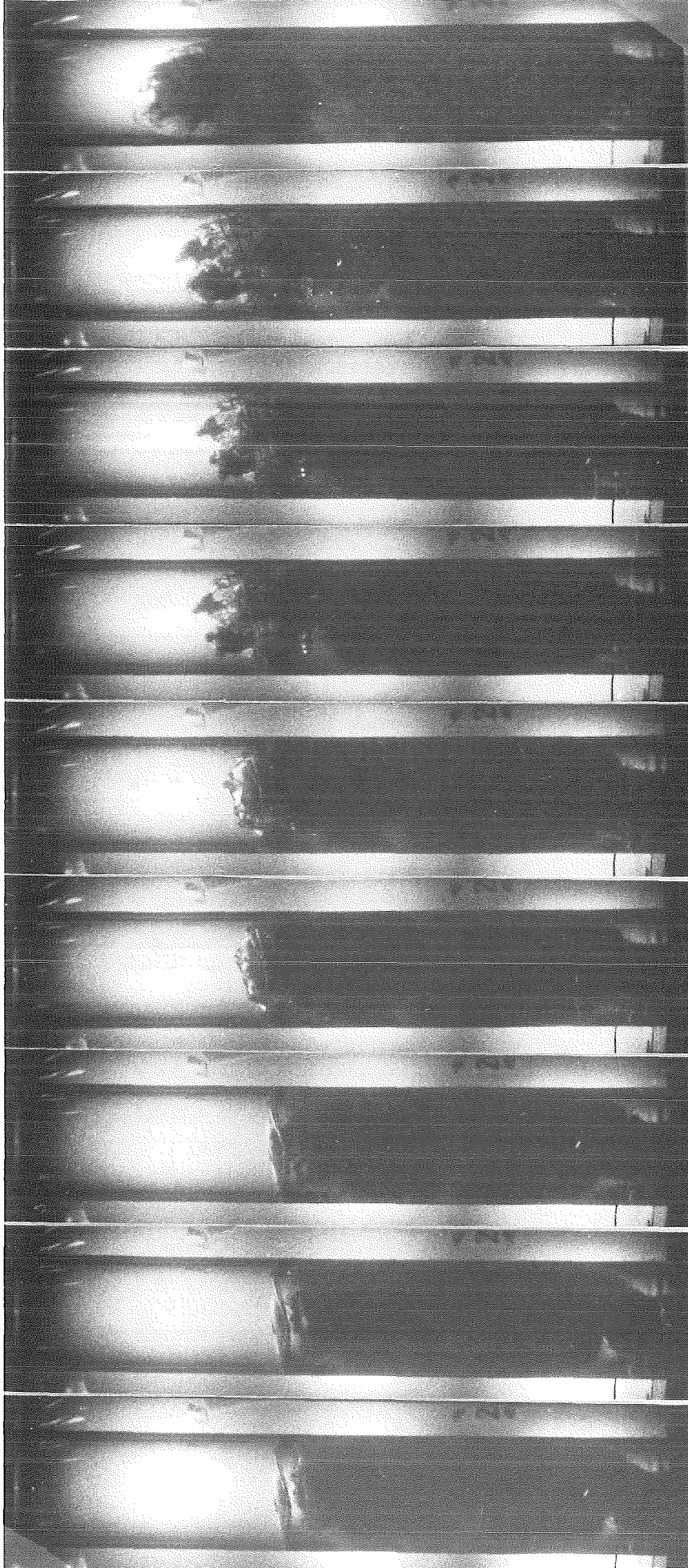


Abb. A7.1- Versuch Nr.2 - Einphasenströmung - Bilder 19-27

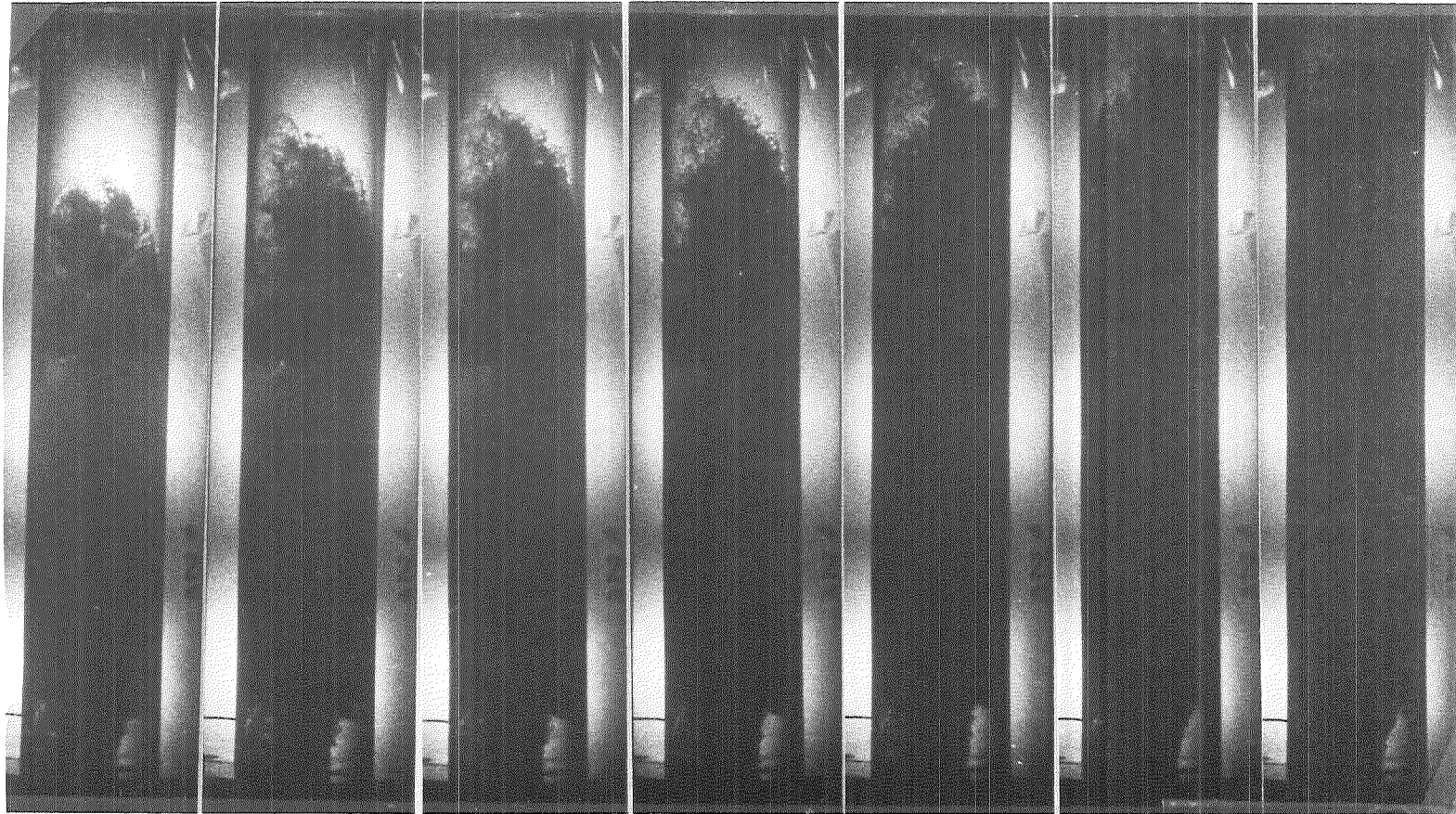


Abb. A7.1- Versuch Nr.2 - Einphasenströmung - Bilder 28-34



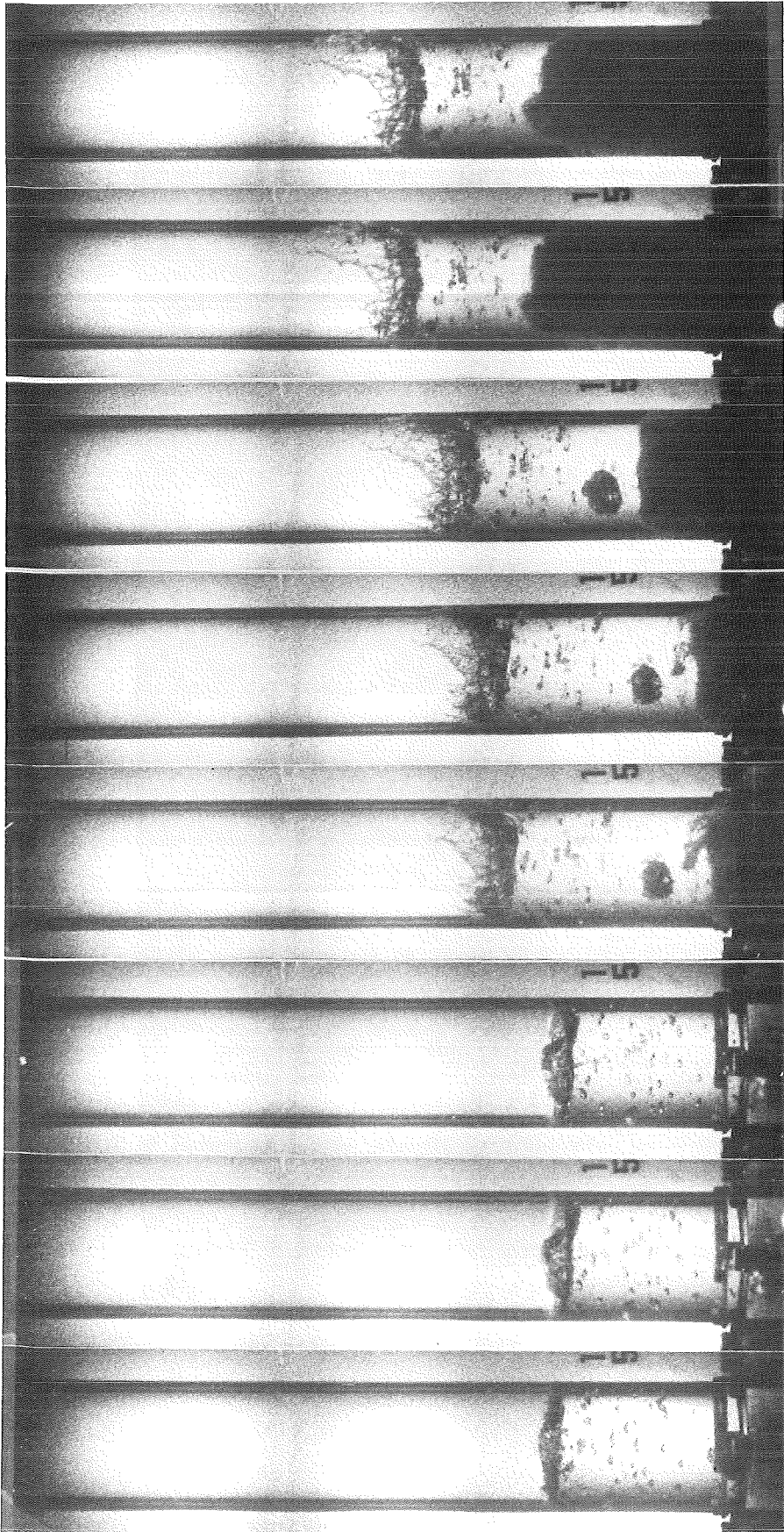


Abb. A7.2- Versuch Nr.15 - Zweiphasenströmung - Bilder 1-8

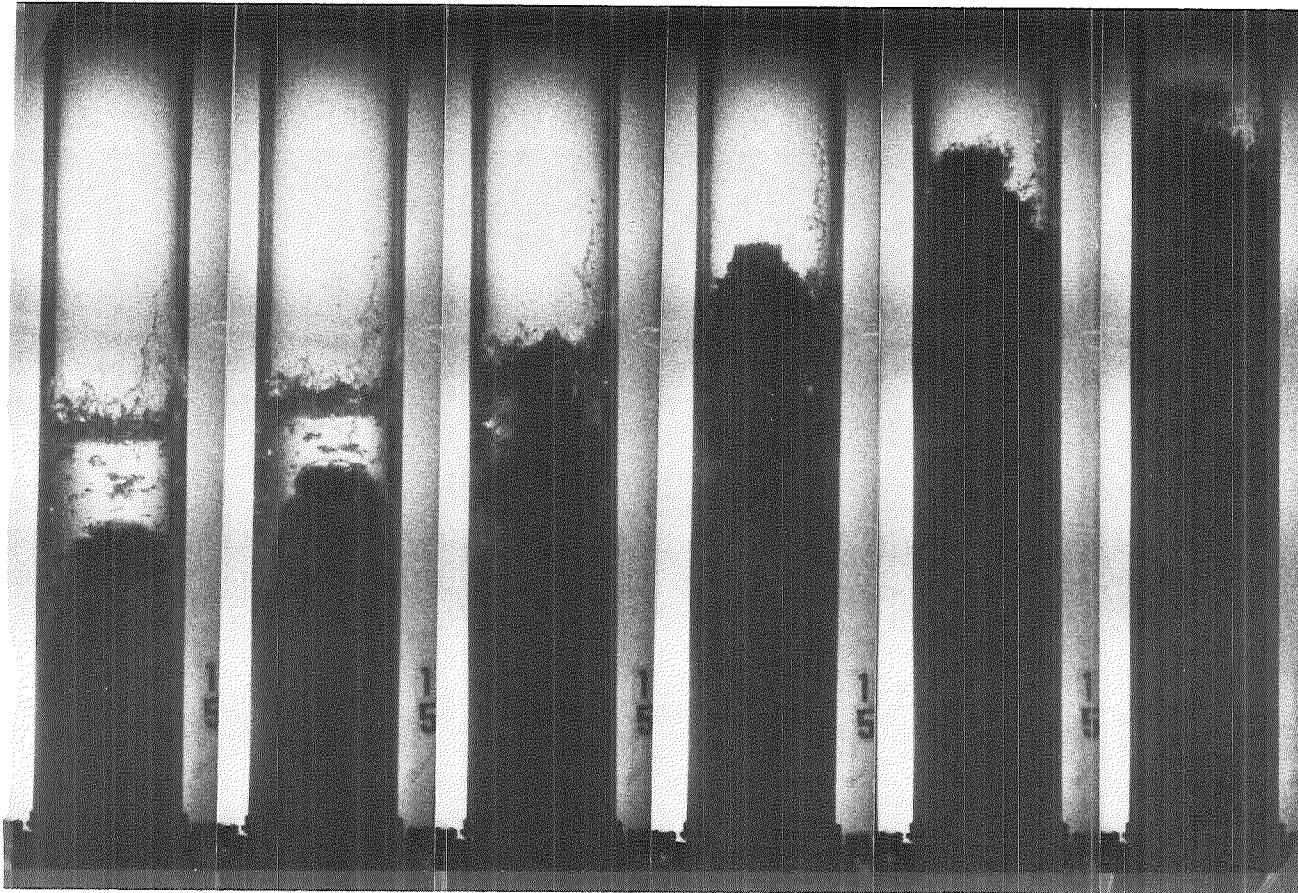


Abb. A7.2- Versuch Nr.15 - Zweiphasenströmung - Bilder 9-14

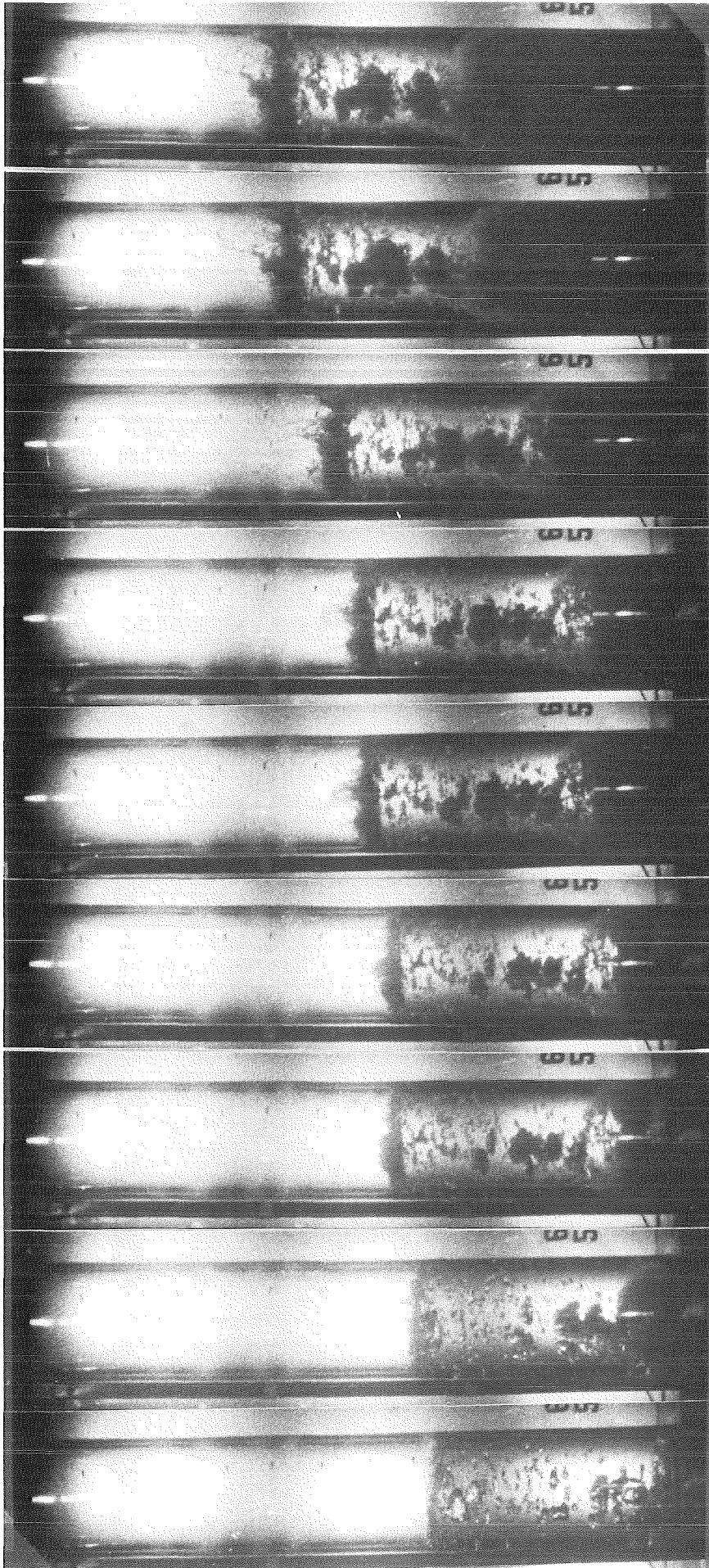


Abb. A7.3- Versuch Nr.65 - Zweiphasenströmung - Bilder 1-9

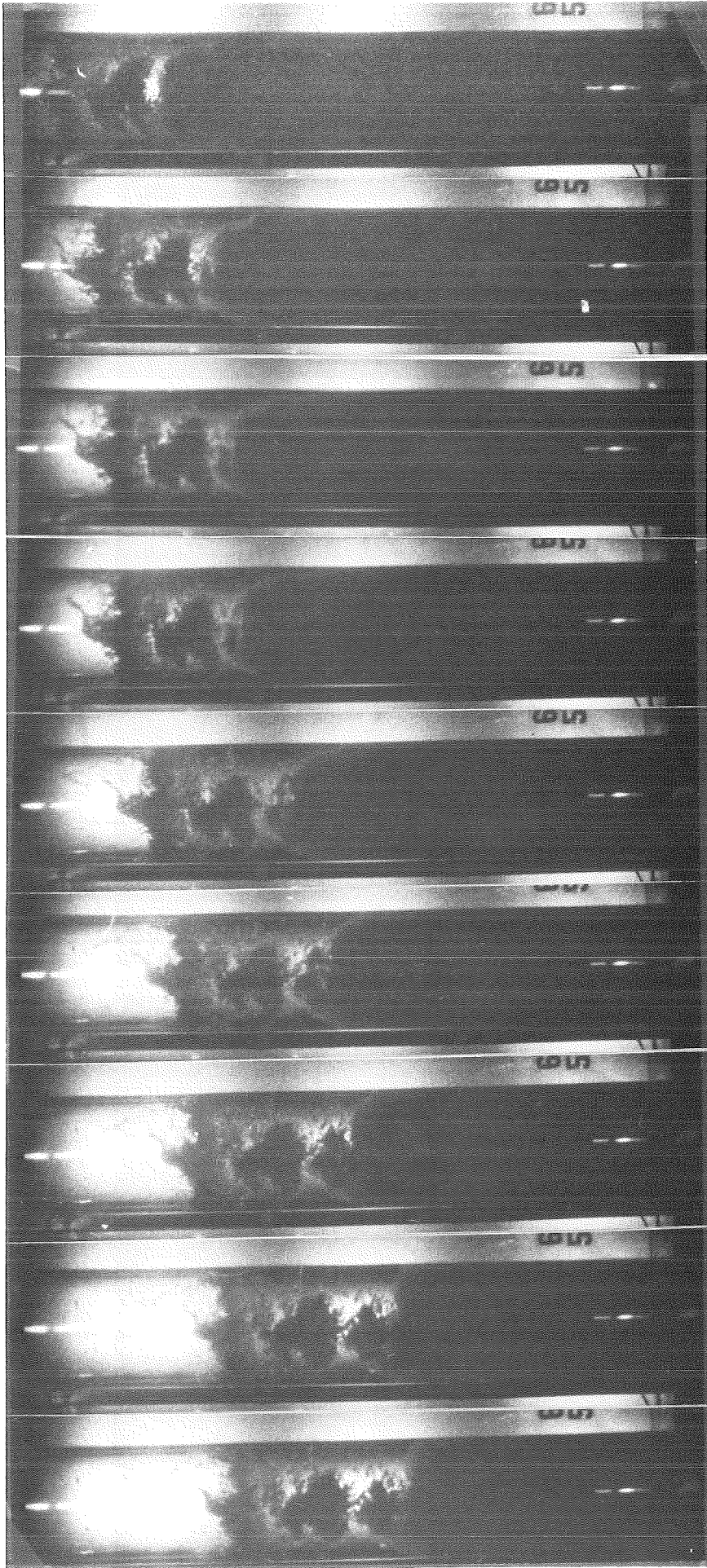


Abb. A7.3- Versuch Nr.65 - Zweijetenströmung - Bilder 10-18

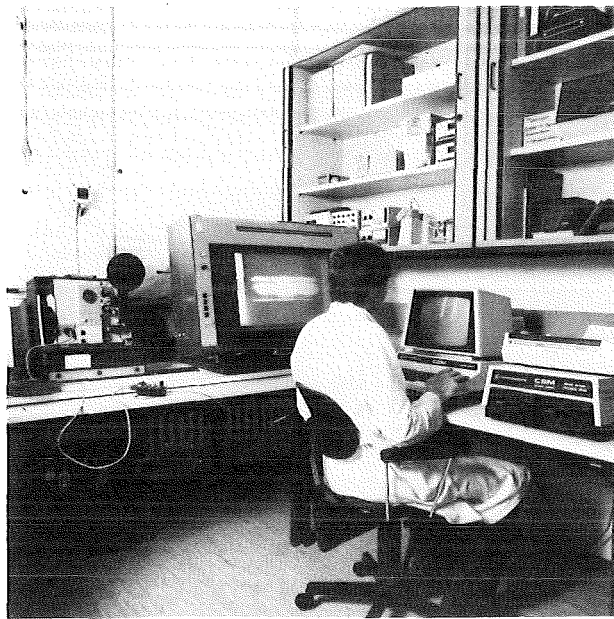


Abb. A7.4- Darstellung des Apparats für die Filmauswertung.