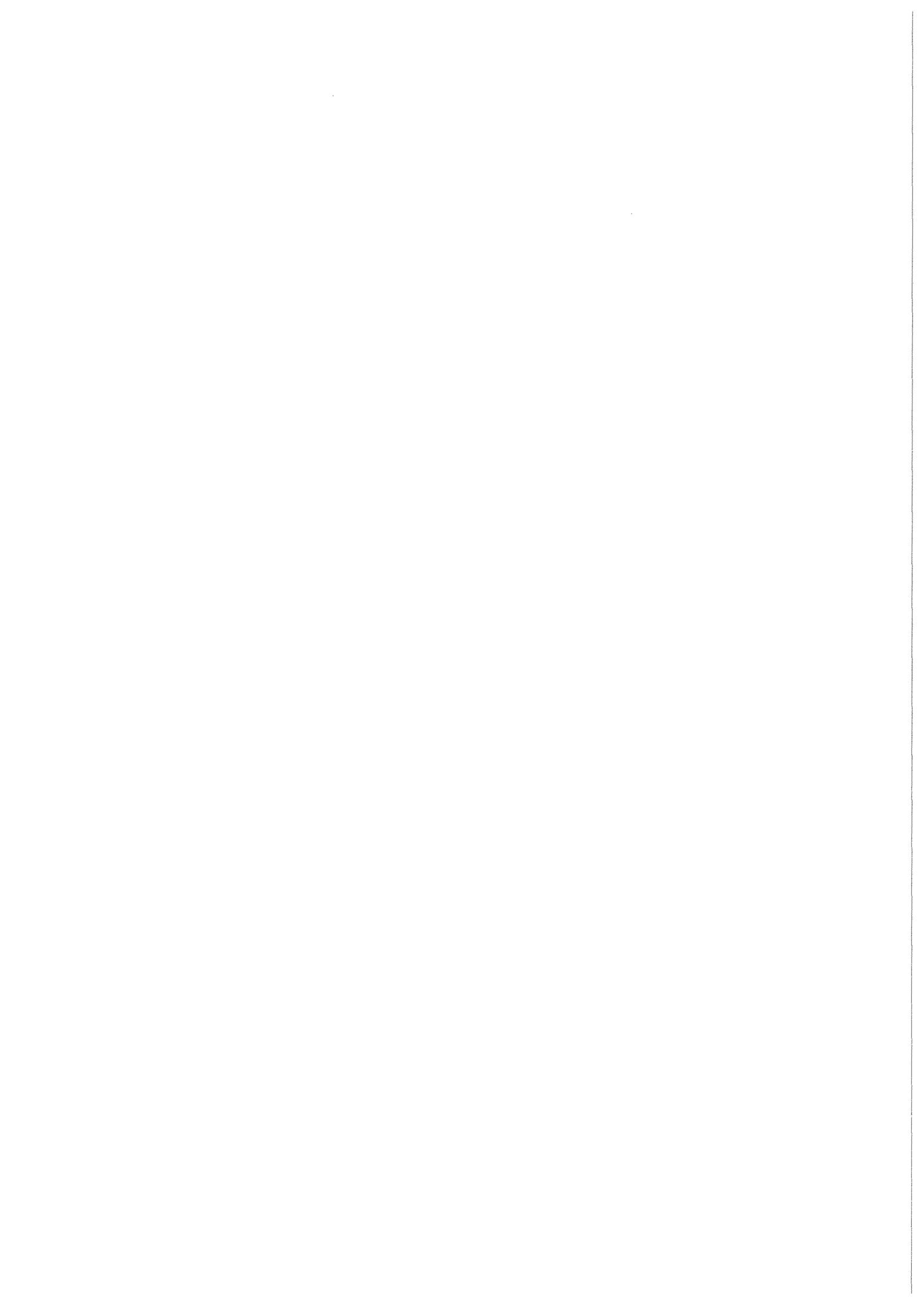


**KfK 4249**  
**September 1987**

# **Wasser-Simulationsexperimente zum instantanen Quellterm beim schweren Brutreaktorstörfall**

**W. Schütz, J. Minges, W. Haenscheid**  
**Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik**  
**Projekt Schneller Brüter**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Schneller Brüter

KfK 4249

Wasser - Simulationsexperimente zum instantanen Quellterm  
beim schweren Brutreaktorstörfall

W. Schütz, J. Minges, W. Haenscheid



Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## ZUSAMMENFASSUNG

### Wasser- Simulationsexperimente zum instantanen Quellterm beim schweren Brutreaktorstörfall

Im Versuchsprogramm FAUST werden Beiträge zur Abschätzung des instantanen Quellterms bei einem SNR-Kühlmitteldurchsatzstörfall mit expandierendem Brennstoff- oder Natriumdampf geliefert. Das Zusammenwirken von Blasen- und Aerosolverhalten, insbesondere der Aerosoltransport in das Covergas, wird mit Simulationsexperimenten untersucht. In der Serie FAUST-1A wurden Berstscheibenentladungen eines Partikel-Gas-Gemisches (Stickstoff von 0,3 bis 2 MPa mit Eisen- oder Nickelpulver verschiedener Partikelgröße) aus einem 1,45 Liter-Quellbehälter in einen Wasserbehälter von 28,8 cm Durchmesser und 1 m Höhe bei verschiedenen Poolhöhen (0 - 90 cm) durchgeführt. Das System war geschlossen, d.h. es waren keine Deckelöffnungen vorhanden. Wichtige meßtechnische Einrichtungen waren Hochgeschwindigkeits-Filmkameras, Druckaufnehmer und Magnete zum Auffangen von Partikeln im Covergas.

Die wichtigste Meßgröße war der Rückhaltefaktor RF, definiert als das Verhältnis aus entladener Partikelmenge und im Covergas aufgefangener Partikelmenge. Weiterhin wurden die Expansionscharakteristiken der Blase, die damit korrelierten Vorgänge im Covergas, die Schwingungsperiode und das Entrainment untersucht. Die Partikelfreisetzung blieb meist unterhalb der Nachweisgrenze, d.h.  $RF > 10^4$ .

Für die Serie 1B wurde bei gleichem Quellbehälter ein größerer Wasserbehälter (63 cm Durchmesser, 60 cm Höhe) installiert mit einem Deckel, der zwei Öffnungen von jeweils 4 cm Durchmesser zur Simulation von Leckagen besaß. Der Entladungsdruck wurde variiert von 0,002 bis 4 MPa. Weitere Versuchsparameter waren Poolhöhe (0-50 cm), Partikelgröße (1-100  $\mu\text{m}$ ) und Größe der Leckage. Eine Freisetzung von luftgetragenen Partikeln wurde nur bei sehr niedrigem Druck beobachtet. Bei hohem Druck wurden größere Wassermengen freigesetzt, die Partikelfreisetzung hingegen blieb unterhalb der Nachweisgrenze (Rückhaltefaktor  $> 10^4$ ). Die Periode der Oszillation lag im Bereich von 80 msec bei 1A und 50 msec bei 1B. Teilweise wurden hohe Entrainmentraten beobachtet. Näherungsrechnungen haben gezeigt, daß die hohe Partikelabscheidung durch Impaktionsprozesse während der Oszillationen erklärt werden kann.

## SUMMARY

### Water Simulation Experiments on the Instantaneous Source Term of a Severe Breeder Reactor Accident

FAUST is an experimental program to give contributions to the assessment of the instantaneous source term in case of an LMFBR loss-of-flow accident with expanding fuel or sodium vapor. Correlations between bubble and aerosol behavior, especially the aerosol transport into the cover gas, are investigated by simulation tests. In the FAUST 1A-series, experiments with discharge of a gas-particle mixture (nitrogen from 0.3 to 2.0 MPa with iron or nickel powder of different particle size) from a 1.45 liter source into a water pool cylinder of 28.8 cm diameter and 1 m height by rupture disks were performed at different pool height (0-90 cm). The system was closed, i.e. no openings were provided in the cover plate. Important measuring instruments were high-speed cameras, pressure transducers and magnets for particle trapping in the cover gas. The most important quantity to be determined was the retention factor RF, defined as the ratio of the amount of particles discharged to the amount trapped in the cover gas.

Furthermore, the expansion characteristics of the bubble, the correlated cover gas phenomena, the oscillation period and the entrainment were considered. In most cases, particle release stayed below detection limit, which corresponds to  $RF > 10^4$ .

For the 1B series, using the same source, a larger pool vessel (63 cm diameter, 60 cm height) was installed and a cover plate with two openings of 4 cm diameter to simulate leaks. The discharge pressure was varied from 0.002 to 4 MPa. Other experimental parameters were pool height (0-50 cm), particle size (1 to 100  $\mu\text{m}$ ), and leak size. A release of airborne particles was found only at very low discharge pressure. At high pressure, major amounts of water were released, whereas the release of particles remained below detection limit (retention factor  $> 10^4$ ). The oscillation period was of the order of 80 msec for 1A and 50 msec for 1B.

Approximative calculations have shown that the large particle absorption may be explained by impaction during the bubble oscillations.

Inhalt	Seite
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen und Vorüberlegungen	
2.1 Zum Störfallablauf (energetischer Grenzfall) beim SNR 300	3
2.2 Aerosolbildung, Partikelgrößen	3
2.3 Partikeln in einer aufsteigenden Blase	4
2.4 Partikeln in einer expandierenden Blase	
2.4.1 Ebene Expansion	5
2.4.2 Radiale Expansion	7
2.4.3 Entrainment	8
2.4.4 Partikelverhalten bei Expansion und Oszillation	9
2.4.5 Partikeln und Entrainment	10
2.5 Mechanismen der Partikelabscheidung	11
3. Versuchsaufbauten, Meßtechnik, Datenerfassung	
3.1 Prinzipieller Aufbau	12
3.2 Quellbehälter, Berstscheiben	12
3.3 Der Versuchsaufbau FAUST - 1A	13
3.4 Der Versuchsaufbau FAUST - 1B	14
3.5 Methoden zum Nachweis von Partikeln im Covergas sowie der Partikel- und Wassermengen, die aus Deckelleckagen entweichen	16
4. Versuchsparameter	21
5. Meßgrößen	
5.1 Rückhaltefaktoren	22
5.2 Druckstöße, Oszillationen, Periode	23
5.3 Freigesetzte Wassermenge	24
5.4 Expansionscharakteristik, Entrainment	24

6. Versuchsauswertung	Seite
6.1 Bestimmung der freigesetzten Partikelmenge	25
6.2 Bestimmung der freigesetzten Wassermenge	25
6.3 Auswertung der Drucksignale	25
6.4 Film - Digitalisierung zur Bestimmung der Expansionscharakteristik und des Entrainments	26
7. Experimentelle Ergebnisse	
7.1 Ergebnisse der FAUST 1A-Versuche	29
7.2 Ergebnisse der FAUST 1B-Versuche	30
8. Ergebnisse von begleitenden Modellrechnungen	
8.1 PAROGA-Rechnungen zur Partikelabscheidung während der Expansions- und Oszillationsphase	34
8.2 Näherungsrechnungen zum Entrainment	35
8.3 Blasen- und Covergasverhalten	36
8.4 Rechnungen nach Fuchs zur Partikelabscheidung in einer aufsteigenden Blase	36
9. Vergleich mit anderen Autoren	38
10. Zusammenfassende Diskussion, Ausblick	42
Danksagung	45
Literatur	46
Tabellen	51 - 58
Abbildungen	59 - 95

## 1. EINLEITUNG

Beim Kühlmitteldurchsatzstörfall eines schnellen natriumgekühlten Brutreaktors kann es unter sehr pessimistischen Annahmen zu einer transienten, d.h. sehr schnellen Aufheizung des ungekühlten Cores kommen, die bis zum Aufschmelzen und zur teilweisen Verdampfung des Brennstoffes führt /1.1/. Brennstoffdampf (bei stark gevoidetem Core, ohne direkte Brennstoff-Natrium-Reaktion) oder Natriumdampf (bei Brennstoff-Natrium-Reaktion, z.B. durch Natrium-Wiedereintritt) expandieren in den Natriumpool im oberen Plenum. Man nimmt an, daß sich dort die "HCDA-Blase" bildet (HCDA = Hypothetical Core Disruptive Accident). Der Expansionsvorgang bewirkt zunächst eine Aufwärtsbeschleunigung der Poolflüssigkeit und damit eine Kompression des Schutzgasvolumens mit Tankdeckelbelastungen, die zu Leckagen führen können. Die HCDA-Blase enthält neben Brennstoff- und Natriumdampf auch Kondensationsaerosole, fragmentierte Brennstoffpartikeln und Natriumtröpfchen aus Entrainmentprozessen (Eintrag von flüssigem Natrium in die Blase). Sie kann im Natriumpool kondensieren oder bis zum Schutzgasvolumen aufsteigen. Im letzteren Fall wird Aktivität in das Schutzgasvolumen und bei Leckagen auch in das Reaktorgebäude freigesetzt. Die so freigesetzte Aktivitätsmenge bezeichnet man als "instantanen radiologischen Quellterm  $S_0$ ". Im Falle des SNR-300 ist  $S_0$  die Menge an Brennstoff, Spaltprodukten und Natrium, die in kurzem Zeitabstand nach der energetischen Kernzerlegung aus den Tankdeckelleckagen in das innere, inertisierte Containment freigesetzt wird. Weitere "verzögerte" Quellterme, die im Vergleich zu  $S_0$  über einen langen Zeitraum effektiv sind, können folgen /1.2/, so z.B.  $S_2$ , die an die Natriumverdampfung gekoppelte Freisetzung aus dem Core Catcher unterhalb des Reaktortanks, oder  $S_3$ , die durch Leckagen in den Wänden vom inneren ins äußere Containment austretende Aktivitätsmenge. Der vorliegende Bericht bezieht sich ausschließlich auf  $S_0$ .

Die Kenntnis der Kernzerlegungsphase, des Expansionsvorganges im Natriumpool, des Blasenverhaltens und des Aerosolverhaltens (Entstehung, Transport, Abscheidung) in der Blase ist von großer Bedeutung für die Komponenten- und Containmentauslegung des Reaktors, für Risikoanalysen und allgemeine Maßnahmen zur Beherrschung von Unfallfolgen. Hierzu sind Simulationsexperimente notwendig sowie Modellrechnungen, die es gestatten, den komplizierten Ablauf von thermodynamischen, hydrodynamischen und aerosolphysikalischen Prozessen zu verstehen und auf SNR-Bedingungen zu extrapolieren.

Zu Einzelaspekten dieser Problematik gibt es weltweit mehrere Versuchsprogramme und Rechencodeentwicklungen. Man hat jedoch insbesondere über das Aerosolverhalten (Entstehung, Transport und Rückhaltung in der Blase, Freisetzung und Abbau im Schutzgas usw.) zur Zeit noch keine ausreichende Information und ist daher auf konservative Abschätzungen angewiesen /1.3/. So wird z.B. in der Risikostudie der GRS für den SNR-300 /1.4/ ein Rückhaltefaktor von 6 für Partikeln in der Blase angenommen.

Das KfK-Versuchsprogramm FAUST (Freisetzung von Aerosol unter Störfallbedingungen) bezieht sich auf den instantanen Quellterm. Das Zusammenwirken von Blasen- und Aerosolverhalten wird vorwiegend experimentell untersucht. Das Versuchsprogramm gliedert sich zunächst in die Phasen FAUST-1 (Wasserversuche) und FAUST-2 (Natriumversuche). Die Wasserversuche (d.h. es wird Wasser als Poolmedium verwendet) haben orientierenden Charakter. Es sollen wichtige Phänomene erkannt und verstanden werden, die bei der Entladung eines Partikel-Gas-Gemisches in einen Flüssigkeitspool auftreten. Mit den Natriumversuchen wird die Übertragbarkeit auf Reaktorbedingungen und realistische Materialien hergestellt. Die Phase FAUST-1 wird unterteilt in FAUST-1 A (Poolbehälter Ø 30 cm, Höhe 1m, keine Leckagen im Deckel, Entladungsdruck 0,3 bis 2 MPa) und FAUST-1 B (Poolbehälter Ø 63 cm, Höhe 60 cm, definierte Leckagen im Deckel, Entladungsdruck 0,002 bis 4 MPa), jeweils bei Raumtemperatur. Die 1A-Versuche wurden 1982/83, die 1B-Versuche 1983-85 durchgeführt.

## 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND VORÜBERLEGUNGEN

### 2.1. Zum Störfallablauf (energetischer Grenzfall) beim SNR 300

Für das MARK 1A - Core des SNR 300 ergibt sich nach /2.1/ beim energetischen Grenzfall, der unter sehr pessimistischen Annahmen abgeleitet wurde, daß 98% des Brennstoffs aufschmilzt, wobei Temperaturen bis 5000 K und Brennstoffdampfdrücke bis 74 bar erreicht werden. Das heiße Zweiphasengemisch (gasförmig/flüssig) expandiert nach oben in den relativ kalten (500 °C) Natriumpool unter Bildung einer Brennstoffdampfblase. Das maximale Expansionsvolumen ist gleich dem Schutzgasvolumen zuzüglich der Tankdehnung. Zu diesem Zeitpunkt tritt die maximale Deckelbelastung auf, und hierbei können Leckagen entstehen. An die Expansionsphase schließt sich die auftriebsbedingte Aufstiegsphase der Blase an. Der Expansionsvorgang (Zeitskala 100 msec) ist deutlich kürzer als der Aufstieg (Zeitskala 1 sec). Die aufsteigende Blase transportiert radioaktives Material als Dampf oder Aerosol bis zum Schutzgas, von wo es infolge der Leckagen in das (innere) Containment entweichen kann.

### 2.2. Aerosolbildung, Partikelgrößen

Kondensierender Brennstoff- bzw. Spaltprodukt Dampf führt zur Bildung von Aerosol mit Partikelgrößen zwischen 0,001  $\mu\text{m}$  und 0,1  $\mu\text{m}$ . Partikelgrößenmessungen hierzu erfolgten in den Programmen KfK-TUNA /2.2/ und ORNL-FAST /2.3/. Durch Koagulation kann es jedoch zu einem raschen Anwachsen der Partikeln kommen.

Wesentlich größere Partikeln ( $> 10 \mu\text{m}$ ) entstehen durch die hydrodynamische Fragmentierung während der Beschleunigungsphase des flüssigen Brennstoffs und durch die Flashing-Fragmentierung, d.h. das Aufbrechen des flüssigen Brennstoffes infolge seines eigenen Dampfdrucks /2.4/.

Relativ große Partikeln (Größenordnung 100  $\mu\text{m}$ ) entstehen durch die Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung. Eine Zusammenstellung experimenteller Werte im Vergleich mit der Theorie wird in /2.5/ gegeben. Gemäß der "pessimistischsten Kurve" haben 18 Massenprozent der Partikeln Durchmesser unterhalb 40  $\mu\text{m}$ .

### 2.3. Partikeln in einer aufsteigenden Blase

Die analytische Behandlung des Blasenaufstiegs geht auf Davies und Taylor /2.6/ zurück. Eine in einem großen Pool (Einfluß der Tankwände nicht spürbar) aufsteigende Gasblase ändert ihre ursprüngliche Kugelform sehr schnell in eine Kugelkappe ("cap bubble", siehe Fig. 1), charakterisiert durch die Parameter  $a$  und  $\theta$  bzw.  $c$  und  $h$ . Davies und Taylor stellten experimentell fest, daß  $\theta = 53^\circ$ . Ebenso basiert die Relation für die Aufstiegs geschwindigkeit  $u$  auf experimentellen Beobachtungen:

$$u = 2/3 \cdot \sqrt{g \cdot a}$$

Bezogen auf das Blasenvolumen ergab sich näherungsweise

$$u = 2,4 \cdot V^{1/6}$$

wobei  $u$  in  $\text{m/sec}$  und  $V$  in  $\text{m}^3$  angegeben wird. Die Aufstiegs geschwindigkeit hängt also nur schwach vom Volumen der Blase ab.

Realistischer in bezug auf den Anwendungsfall ist die Beobachtung einer aufsteigenden Blase in einem Zylinder, dessen Durchmesser nicht viel größer als der Radius der Blase ist. Auch hierüber gibt es Information bei Davies und Taylor. Es wurde beobachtet, daß die aufsteigende Blase die Form eines Pflöpfens ("slug bubble") annimmt. Die Aufstiegs geschwindigkeit hängt dann vom Zylinderradius ab und ist gegeben durch  $u = 0,5 \sqrt{g \cdot b}$ . Hieraus ergibt sich für die FAUST-1A-Geometrie ( $b = 0,15 \text{ m}$ ), daß  $u = 0,6 \text{ m/sec}$  beträgt.

Einen Ansatz zur Berechnung der Partikelabscheidung in einer aufsteigenden Blase findet man bei Fuchs /2.7/. Zur Vereinfachung wird hier allerdings angenommen, daß die Blase kugelförmig ist. Verantwortliche Mechanismen für die Partikelabscheidung sind Trägheitsdeposition, Sedimentation und Diffusion. Den absorbierten Anteil der Partikelkonzentration  $c$  als Funktion der Steig-  
höhe  $x$  erhält man mit Hilfe der Gleichung

$$dc/dx = - (\alpha_i + \alpha_s + \alpha_d) \cdot c$$

mit den Absorptionskoeffizienten

$$\alpha_i = \frac{9u\tau}{2R^2} ; \quad \alpha_s = \frac{3g\tau}{4Ru} ; \quad \alpha_d = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{D}{u \cdot R^3}}$$

mit  $R$  = Blasenradius,  $u$  = Aufstiegsgeschwindigkeit,  $\tau = m/B$ ,  $B = 6 \pi \eta r$  (Beweglichkeit) und  $m$ ,  $r$  = Partikelmasse bzw. -radius. Für die Blasenauftiegs-  
geschwindigkeit kann man die Näherungsformel  $u = 2,4 \cdot V^{1/6}$  benutzen, mit  
 $V$  = Blasenvolumen. Wie in Tab. 5 für Eisenpartikeln gezeigt, sind die Absorp-  
tionskoeffizienten relativ klein, insbesondere bei größeren Blasen, und die  
Wahrscheinlichkeit für das Verbleiben in der Blase bis zur Freisetzung in  
das Covergas ist entsprechend groß.

In dem französischen IRIS - Code /2.8/ wurde der Versuch unternommen, Partikel-  
bahnen aufgrund der Strömungslinien in einer großen, aufsteigenden "cap-bubble"  
und die daraus resultierende Partikelabscheidung zu berechnen. Ein typisches  
Resultat ist, daß die Abscheidung von Brennstoffpartikeln mit Durchmessern  
< 40  $\mu\text{m}$  sehr klein ist.

## 2.4 Partikeln in einer expandierenden Blase

### 2.4.1 Ebene Expansion

Die folgende ebene Darstellung des Expansionsvorganges ist sehr vereinfacht.  
Trotzdem ist sie für Vorüberlegungen und zum Erkennen von prinzipiellen Phä-  
nomenen sehr nützlich.

Der inkompressible Flüssigkeitskolben wird, wie in Abb. 2 skizziert, von dem bei  $z = 0$  expandierenden Gasvolumen nach oben beschleunigt durch die Kraft  $K = P_1 \cdot F$ , mit  $P_1 =$  Gasdruck und  $F =$  Grundfläche. Das komprimierte Covergas (Druck  $P_2$ ) und die Gravitation erzeugen eine Gegenkraft  $K_2 = P_2 \cdot F - g \cdot \rho \cdot H \cdot F$  ( $\rho =$  Dichte der Flüssigkeit,  $H =$  Höhe des Kolbens). Hieraus erhält man die Bewegungsgleichung für den Flüssigkeitskolben bzw. für die Trennfläche zwischen Gas und Flüssigkeit:

$$\ddot{z} = \frac{P_1(z) - P_2(z)}{\rho \cdot H} - g$$

Es wird angenommen, daß der Kolben seine Form beibehält, d.h. daß die Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas nicht aufbricht und das Gasvolumen nicht aufsteigt. Durch zweifache Integration über  $\ddot{z}$  erhält man das Volumen der "Blase "

$$V(t) = F \cdot z(t)$$

Die Beschleunigung des Flüssigkeitskolbens ist also proportional zur Druckdifferenz zwischen Blase und Covergas. Während man im Covergas adiabatische Kompression annehmen kann, enthält  $P_1$  die gesamte Physik der Blasenexpansion. Die Annahme einer adiabatischen Expansion der Blase ist wiederum eine starke Vereinfachung ( $P_1(z) \sim P_0(z^\gamma)$ ), z.B. anwendbar auf  $N_2/H_2O$ -Experimente, während in einem realitätsbezogenen Fall Wärme-, Phasen- und Massenübergänge berücksichtigt werden müssen.

Aus der ebenen Darstellung kann man qualitativ folgende Phänomene erkennen:

- In der Anfangsphase ( $P_1 \gg P_2$ ) wird der Flüssigkeitskolben nach oben beschleunigt. Die Folge ist eine Kompression des Covergases und eine mechanische Belastung des Deckels. Der Kolben wirkt wie ein "Hammer" und kann bei genügend großem  $P_1$  den Abriß des Deckels verursachen.

- Die Massenträgheit des Kolbens kann zu einer Überexpansion führen, d.h. der Druck in der Blase kann unter den Umgebungsdruck absinken.
- Falls der Tank intakt bleibt, kommt es zu einer Rückwärtsbeschleunigung des Kolbens und zu einer erneuten Kompression des Blasen Volumens.
- Nach der Kompression beginnt ein erneuter Expansionsvorgang. Der Kolben wird wieder nach oben beschleunigt. Es ergibt sich also ein gewisser Schwingungsvorgang, der im Realfall durch den Aufstieg der Blase, durch deren Kondensation oder durch Entrainmentprozesse beendet wird.

### 2.4.2 Radiale Expansion

Bei diesem Expansionstyp wird angenommen, daß die Tankwände weit von der Blase entfernt sind, d.h. daß die infolge der Expansion auftretenden Flüssigkeitsströmungen den Expansionsvorgang nicht behindern und die Lage der Blase nicht verändern. Die radiale Expansion wird beschrieben durch die Rayleigh-Gleichung

$$\ddot{R} = \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot R} - \frac{3 \dot{R}^2}{2 R}$$

Die Geometrie ist in Abb. 2 skizziert.  $P_A$  ist der Covergasdruck,  $P_B$  der Druck in der Blase,  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit,  $R$  der Blasenradius,  $\dot{R}$  die zeitliche Änderung und  $\ddot{R}$  die Beschleunigung der Blasenoberfläche. Die zentrale Lage der Blase verändert sich nicht, d.h. der Auftrieb wird nicht behandelt.

Die Physik des Expansionsvorganges steckt wieder in  $P_B$ . Über  $P_A(t)$  können Annahmen gemacht werden, z.B. adiabatische Kompression. Der Expansionsvorgang läuft analog zur ebenen Darstellung ab: Die Flüssigkeit wird nach oben beschleunigt, komprimiert das Covergas und belastet den Tankdeckel. Bei  $R_{\max}$  kann der Blasendruck geringer als der Umgebungsdruck sein. Danach kollabiert die Blase wieder, um nach Erreichen des Minimalvolumens erneut zu expandieren. Es handelt sich also ebenfalls um einen Schwingungsvorgang.

### 2.4.3 Entrainment

Im Frühstadium der Blasenexpansion beobachtet man, daß die Trennfläche zwischen expandierendem Gas und Flüssigkeit nicht stabil ist. Die Instabilitäten führen dazu, daß Flüssigkeitströpfchen in die Blase hineingerissen werden. Man bezeichnet diesen Vorgang als "Entrainment" oder "Flüssigkeitseintrag". Das gleiche Phänomen wird etwas später auch im Schutzgas beobachtet.

In der Literatur werden mehrere Mechanismen beschrieben, die für das Entrainment verantwortlich sind. Der am häufigsten betrachtete Prozeß ist das Entrainment durch Rayleigh - Taylor - Instabilitäten /2.9/. Sie treten im Prinzip immer dann auf, wenn zwei aneinander angrenzende Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Dichte oder eine Flüssigkeit und ein Gasvolumen eine Beschleunigung senkrecht zur Trennfläche erfahren. Nach der Theorie von Taylor /2.9/ gibt es nur während der Phase positiver Beschleunigung Entrainmentprozesse, während sich im anderen Fall eine glatte Trennfläche bildet. Zur Berechnung der Entrainmentrate wurde von Corradini /2.10/ das folgende Modell aufgestellt:

Kritische Wellenlänge :

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot (\sigma / \ddot{x} \cdot \rho)^{1/2}, \text{ falls } \ddot{x} > 0, \text{ und } \lambda = 0, \text{ falls } \ddot{x} \leq 0$$

wobei  $\sigma$  = Oberflächenspannung Gas/Wasser

$\ddot{x}$  = Beschleunigung der Trennfläche, positiv vom Gas zum Wasser

$\rho$  = Dichte Wasser

Entrainmentrate:  $\dot{m}_e = K_e \cdot \rho \cdot F \cdot (\lambda \cdot \ddot{x})^{1/2}$

wobei  $K_e$  = Entrainmentkonstante

und  $F$  = aktive Oberfläche

Nach MIT-Experimenten ist  $K_e = 4,65$

Entrainmentgeschwindigkeit:  $u_e = \dot{m}_e / \rho \cdot F$

Durchmesser der Entrainment-Tröpfchen:  $d = \lambda \cdot \sqrt{3}$

Wenn zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte oder eine Flüssigkeit und ein Gas eine Beschleunigung parallel zur Trennfläche erfahren, dann können Kelvin - Helmholtz - Instabilitäten auftreten /2.11/. Der Impulsübertrag von einem Jet auf die umgebende Flüssigkeit bewirkt das Jet - Entrainment /2.12/. Bei einer Entladung von kondensierbaren Dämpfen kann es nach /2.13/ auch zum Entrainment durch Kondensationsschock kommen.

#### 2.4.4 Partikelverhalten bei Expansion und Oszillationen

Die unter 2.4.1 bzw. 2.4.2 beschriebenen Expansionen führen bei der FAUST - Geometrie zu Schwingungen mit Perioden von typischerweise 50 msec. Luftgetragene Partikeln, die sich in einem so extrem schnell verändernden Gasvolumen befinden, können aufgrund ihrer Massenträgheit nicht der Bewegung der Trennfläche Gas/Wasser folgen. Daher besteht die Möglichkeit, daß es im Laufe der Oszillationen zur Impaktion an der bewegten Oberfläche und damit zur Partikelabscheidung im Wasser kommt. Dies ist gegenüber 2.3 (aufsteigende Blase) ein weiterer Abscheidemechanismus.

Im Rahmen des PAROGA - Rechenprogramms /2.14/ wurde ein relativ einfaches, eindimensionales Modell zur Berechnung der Bewegung und eventuellen Abscheidung von Partikeln in einem rasch oszillierenden Gasvolumen aufgestellt. Die wesentliche Gleichung für die lineare Partikelbewegung ist

$$\ddot{y} = \frac{\pi}{2 m} \rho_g \cdot C_D \cdot r^2 (v_g - \dot{y}_i) \cdot |v_g - \dot{y}_i| - g \quad (A)$$

(quadratisches Widerstandsgesetz)

mit den Variablen

- $x$  = Koordinate der Trennfläche Gas/Wasser  
 $y_i$  = Koordinate der Partikel Nr.  $i$   
 $v_{g,i}$  =  $y_i/x \cdot \dot{x}$ , Gasgeschwindigkeit am Ort  $y_i$   
 $\rho_g$  = Gasdichte  
 $\eta_g$  = Gas-Zähigkeit  
 $Re$  =  $|v_{g,i} - \dot{y}_i| \cdot 2r \cdot \rho_g / \eta_g$ , Reynoldszahl  
 $m, r$  = Masse bzw. Radius der Partikel  
 $C_D$  = Widerstandsbeiwert

Für  $C_D$  wurden, entsprechend der Reynoldszahl, unterschiedliche Relationen eingesetzt: /2.15/

$$C_D = 21/Re + 6/\sqrt{Re} + 0,28 \text{ für } 0,25 \leq Re \leq 4000$$
$$C_D = 24/Re + 0,5 \text{ für } Re > 4000$$

Für  $Re < 0,25$  wird aus Gl. (A) das Stokes'sche Widerstandsgesetz

$$\ddot{y}_i = 6 \pi \eta_g \cdot r \cdot (v_g - \dot{y}_i) - g$$

Ein typisches Beispiel wird in Abb. 23 und 24 dargestellt.

#### 2.4.5 Partikeln und Entrainment

Die Entrainment-Tropfengrößen hängen gemäß 2.4.3 von der Beschleunigung der Trennfläche ab. Im aerosolphysikalischen Sinne sind die Tropfen normalerweise sehr groß (einige 100  $\mu\text{m}$  bis mm). Ihre Geschwindigkeit ist dem Partikelstrom entgegengerichtet, woraus sich eine gewisse Analogie zum Naßwäscher ergibt. Man erhält also durch das Entrainment ein zusätzliches, möglicherweise sogar sehr hohes Abscheidopotential. Die Modellierung der Abscheidung von Partikeln an Entrainment-Tropfen ist allerdings wegen der Abhängigkeit von der Beschleunigung, der großen Tropfenzahl (manchmal bis zu 80 Volumenprozent Entrainment) und der sehr kurzen Zeitskala relativ schwierig.

## 2.5 Mechanismen der Partikelabscheidung

In Zusammenfassung der unter 2.3 und 2.4 beschriebenen Vorgänge kann man fünf verschiedene Mechanismen auflisten, die zur Partikelabscheidung in Blasen führen:

- a) Impaktion an der rasch oszillierenden Trennfläche (Expansionsphase)
- b) Auswaschen durch Entrainment - Tropfen (vorwiegend Expansionsphase)
- c) Trägheitsdeposition an der Blasenoberfläche infolge der internen Gaszirkulation (Aufstiegsphase)
- d) Diffusion zur Oberfläche (Aufstiegsphase)
- e) Sedimentation durch Schwerkraft (vorwiegend Aufstiegsphase)

### 3. VERSUCHSAUFBAUTEN, MESSTECHNIK, DATENERFASSUNG

#### 3.1 Prinzipieller Aufbau

Die experimentelle Anordnung besteht prinzipiell aus den folgenden Komponenten:

- a) ein durch eine Berstscheibe zu entladender Quellbehälter als "Core",
- b) ein Wasserpool, der den Natriumpool oberhalb des Cores simuliert,
- c) eine komprimierbare "Covergaszone" oberhalb des Pools,
- d) ein Deckel, wahlweise mit Öffnungen zur Simulation von Leckagen (nur Serie 1B).

In Analogie zur Reaktorsituation liegt Zylindergeometrie vor.

#### 3.2 Quellbehälter, Berstscheiben

Der Quellbehälter befindet sich unterhalb des Wasserbehälters. Er hatte ein Volumen von 1,45 Litern und war für einen Maximaldruck von 10 MPa ausgelegt. Normalerweise wurde Stickstoff als Druckgas benutzt. Im oberen Teil besaß er einen korbformigen, perforierten Einsatz zur Aufnahme von Simulationsmaterial, das bei der Entladung mitgerissen wird. Als Simulationsmaterial wurde Eisen- oder Nickelpulver verschiedener Korngröße verwendet. Der Behälter wird nach oben durch eine Berstscheibe (Umkehrberstscheibe der Fa. RMA Kehl/Rhein) mit 5 cm Durchmesser verschlossen. Die Berstscheiben besitzen einen definierten Ansprechdruck bei einer Toleranz von  $\pm 10\%$ . Bei Überschreitung des Ansprechdruckes oder bei Destabilisierung unterhalb des Ansprechdruckes reißt die Berstscheibe ab und gibt innerhalb von ca. 3 msec den vollen Ausströmquerschnitt frei. Bei den meisten Versuchen wurde der Entladungsvorgang durch fernbedientes pneumatisches Anstoßen der Berstscheibe mit einer Metallspitze ausgelöst. Damit war der Zeitpunkt der Entladung genau festgelegt (wichtig für Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen), und der Entladungsdruck konnte auf einen definierten Wert eingestellt werden.

### 3.3 Der Versuchsaufbau FAUST - 1A

Die Versuche 1 - 4 der Serie 1A hatten Testcharakter, hauptsächlich zur Erprobung der Berstscheiben, und wurden mit einem vereinfachten Aufbau durchgeführt, der aus dem Quellbehälter und einem Glasrohr als Poolbehälter bestand. Die Versuche 5 - 18 wurden mit folgendem Aufbau durchgeführt:

- Als Poolbehälter diente ein Plexiglasrohr mit 28,8 cm Innendurchmesser, 0,6 cm Wandstärke und 1 m Höhe.
- Der Deckel des Plexiglaszylinders wurde mit Dauermagneten bestückt, um freigesetzte Fe- oder Ni-Partikeln einfangen zu können. Dies geschah mit Hilfe einer Plastikfolie, die nach dem Versuch abgezogen wurde, um die aufgesammelte Partikelmenge auszuwiegen.
- Mit Hilfe von zwei Druckaufnehmern und eines Zweikanal-Transientenrecorders wurden die Drucksignale am Boden und am Deckel des Poolbehälters gemessen.
- Mit zwei HYCAM-Hochgeschwindigkeitskameras wurden die Vorgänge im Pool und im Covergas mit 2000 Bildern/Sekunde aufgenommen.

Danach wurden einige Umbauten und Ergänzungen vorgenommen, die zum Endausbau des Versuchsstandes 1A führten:

- Um den Plexiglaszylinder wurde zur optischen Korrektur der Filmaufnahmen ein quaderförmiger Plexiglaskasten montiert. Wenn der Zwischenraum mit Wasser gefüllt ist, hat man die störende optische Verzerrung weitgehend kompensiert (siehe Abb. 8).
- Die starr am Deckel montierte Magnetplatte zum Auffangen freigesetzter Metallpartikeln wurde um ein vertikal bewegliches und drehbares Magnetkreuz erweitert ("magnetischer Staubsauger"). Damit kann man nach der Entladung den gesamten Covergasbereich abfahren und luftgetragene Partikeln einfangen.

- Ein zweiter Zweikanal - Transientenrecorder wurde angeschafft, um bis zu vier Drucksignale messen zu können. Im allgemeinen wurden drei Signale gemessen, und zwar am Boden des Druckbehälters, am Boden des Poolzylinders und am Deckel des Poolzylinders.

Mit diesem Aufbau (siehe auch Abb. 4) wurden die Versuche 19-31 durchgeführt. Die Poolhöhe von 60 cm (entsprechend 30,1 Liter Wasser) diente als Standardwert. Weitere Details können dem Bericht /3.1/ entnommen werden.

### 3.4 Der Versuchsaufbau FAUST - 1B

Bei diesem Aufbau (Abb. 6, 7) wurde ein wesentlich größerer Poolbehälter installiert. Am Deckel konnten definierte Leckagen eingestellt werden. Die Meßtechnik wurde verbessert und erweitert. Unverändert hingegen blieb der Quellbehälter. Im Verlauf der gesamten Versuchsserie (Versuche 101 - 132) wurde der Aufbau nur unwesentlich verändert (siehe Bericht /3.2/).

Bei dem Poolbehälter handelte es sich im Wesentlichen um ein Plexiglasrohr von 63 cm innerem Durchmesser, 60 cm Höhe und 1 cm Wandstärke. Bei den Versuchen wurde 40 cm Füllstand entsprechend 124,7 Liter Wasser als Standardwert benutzt. Als Korrekturmaßnahme auf die optische Verzerrung war das Plexiglasrohr in einen Plexiglasquader eingepaßt und die Hohlräume zwischen Rohr und Quader wurden ebenfalls mit Wasser gefüllt.

Der Deckel (Stahl, Gewicht 120 kg) war über maximal 12 Stahlstäbe mit der Bodenplatte verbunden. Diese solide Verbindung war notwendig, um die hohen Kräfte auf den Deckel während des "Wasserhammers" aufzufangen (ca.  $10^5$  N bei 4 MPa-Entladung, anschaulich ca. 10 Tonnen). Neben Öffnungen für die Instrumentierung zur Meßwerterfassung besaß der Deckel 2 Öffnungen von je 4 cm Durchmesser zur Simulation von Leckagen. Auf die Leckagesimulation und die externen Aufbauten zum Nachweis der freigesetzten Wasser- und Partikelmengen wird in Kap. 3.5 ausführlich eingegangen.

Der Poolbehälter wurde mit Dichtringen zwischen Deckel und Bodenplatte festgehalten und war somit keinen Zugkräften ausgesetzt. Die Bodenplatte (Gewicht ca. 250 kg) war über ein Traggerüst starr mit einer Wasserauffangwanne verbunden. Die Auffangwanne stand zur Dämpfung des Rückstoßes auf einer Hartgummimatte. Es waren keine Stoßdämpfer eingebaut. Stattdessen durfte sich die gesamte Anordnung den anfallenden Kräften entsprechend frei bewegen. Trotz des hohen Eigengewichtes von 492,5 kg (mit 40 cm Poolhöhe 618 kg) traten Sprunghöhen bis 12 cm auf.

Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera (HYCAM) wurde der gesamte Entladungsvorgang als Totalaufnahme festgehalten. In allen Fällen wurden 2000 Bilder pro Sekunde belichtet bei einer Vorlaufzeit von 0,5 Sekunden vor dem Anstoßen der Berstscheibe. In einigen Fällen war für Detailaufnahmen (z.B. Entrainment im Covergas) eine zweite HYCAM-Kamera installiert. Zur Ausleuchtung waren hinter dem Plexiglasbehälter vier Halogenlampen á 2000 Watt mit Mattglasscheibe installiert. Abb. 8 zeigt in der Draufsicht eine Skizze der optischen Anordnung.

Zur Registrierung der Druckstöße dienten Druckaufnehmer (Dehnungsmeßstreifen-Prinzip) am Boden des Quellbehälters, am Boden des Poolbehälters und am Deckel. Die Erfassung der Spannungssignale erfolgte rechnergesteuert mit Hilfe eines Multiprogrammers. Zusätzlich waren zwei Zweikanal-Transientenrecorder angeschlossen. Als Triggersignal diente der Druckanstieg am Boden des Poolbehälters.

Zum Auffangen von luftgetragendem Eisen- oder Nickelstaub im Covergas nach der Entladung wurde ein "Magnetstern" benutzt, der an einer zentrisch durch den Deckel geführten Welle befestigt war. Die Partikel- und Wassermengen, die durch die Deckelöffnungen hindurch freigesetzt wurden, wurden mit Hilfe externer Filter und Auffangbehälter nachgewiesen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Einrichtungen einschließlich ihrer spezifischen Vor- und Nachteile wird in Kap. 3.5 gegeben.

Zur direkten Messung der Sprunghöhe des Behälters befand sich ab Versuch 129 ein Teleskopstab zwischen dem Deckel und der Labordecke. Beim Zusammenschie-

ben des Stabes wurde ein als Marke dienender Gummiring der Sprunghöhe entsprechend nach oben gedrückt.

Im Hinblick auf spätere Natriumexperimente wurden einige Durchstrahlungsversuche mit Ultraschall zur Blasendetektion im Wasser vorgenommen. Dazu wurden Schwingquarze als Sender-Empfänger-Paare gegenüberliegend auf die Außenwände des Plexiglasquaders aufgeklebt. Die Ultraschallsignale wurden ähnlich wie die Drucksignale per Rechner und Multiprogrammer erfaßt.

Der Bereich des Entladungsdruckes sollte auf extrem niedrige Werte bis herab zu "Blubbersuchen" ausgedehnt werden. Die Umkehrberstscheiben ließen sich unterhalb von 0,3 MPa nicht mehr zuverlässig einsetzen. Daher wurden spezielle Versuche mit Aluminiumfolien (Berstdruck ca. 0,006 MPa) und PVC-Folien (Berstdruck ca. 0,1 MPa) sowie Blubbersuchen ohne Berstscheibe durchgeführt. Im letzteren Fall wurde an der Einführung des pneumatischen Metallstiftes in den Quellbehälter eine Schlauchleitung mit Trichter angeschlossen, das Durchblubbern durch Unterdruck im Covergas erzeugt und der Eisen- bzw. Nickelstaub über einen Zeitraum von mehreren Minuten durch den Trichter angesaugt. Auf Filmaufnahmen wurde bei diesen Versuchen verzichtet, da der Berstzeitpunkt der Al- und PVC-Folien nicht definiert war und andererseits die Blubbersuchen über einen relativ langen Zeitraum ausgedehnt waren und nur orientierenden Charakter hatten.

Durch Erzeugen eines Unterdruckes im Covergas (ca. 0,04 MPa) über ca. zwei Tage hinweg konnte das Poolwasser entgast werden. Diese Vorbehandlung kann im Hinblick auf das Entrainment wichtig sein und wurde bei den meisten Versuchen vorgenommen. Bei einigen Versuchen wurde das Poolwasser schlierenförmig eingefärbt. Aus der Bewegung der Schlieren kann man bei der Filmauswertung auf die Bewegung des Poolwassers schließen.

### **3.5. Methoden zum Nachweis von Partikeln im Covergas sowie der Partikel- und Wassermengen, die aus Deckelleckagen entweichen.**

Die Fe- oder Ni-Partikeln im Quellbehälter sind unmittelbar nach dem Ansprechen der Berstscheibe noch luftgetragen. Dann unterliegen sie aber mehreren, z.T.

sehr effektiven Abscheidemechanismen, so daß nur ein kleiner Teil in luftgetragener Form in dem aufsteigenden Gasvolumen verbleibt und so das Covergas erreicht. Dieser Teil wird auch vorübergehend im Covergas noch luftgetragen sein. Hat man im Deckelbereich Leckagen vorgesehen, so wird bei der Entspannung des Covergases bis herunter auf den Umgebungsdruck eine anteilige Menge dieses luftgetragenen Teils nach außen entweichen.

Bezüglich der Wasserfreisetzung aus Deckelleckagen müßten vollständigerweise drei Parameter untersucht werden:

- Größe (d.h. Fläche) der Leckage
- Ort der Leckage
- Zeitpunkt des Entstehens der Leckage

Leckagen wurden nur bei der Serie 1B untersucht. Die Größe der Leckagen wurde in engen Grenzen variiert durch Öffnen eines oder beider Deckelstutzen á 4 cm Durchmesser, d.h.  $F_L = 12,6$  oder  $25,4 \text{ cm}^2$  relativ zur gesamten Deckelfläche von  $3117 \text{ cm}^2$ . Der Ort der Leckage wurde nicht variiert; beide Stutzen bilden mit dem Deckelmittelpunkt eine gerade Linie und sind jeweils 29 cm vom Mittelpunkt entfernt. Ebenfalls wurde der Zeitpunkt des Entstehens nicht variiert; in konservativer Weise wurde nur der Fall untersucht, daß die Leckage beim Zeitpunkt der Entladung bereits vorhanden ist. Genaugenommen müßte jedoch das Entstehen mit der ersten Druckspitze im Covergas in Verbindung gebracht werden.

Die Größe der Wasserfreisetzung ist mit dem "Slug Impact" korreliert. Später wird das expandierende Covergas weiteres Wasser mitreißen, vor allem entrainiertes Wasser, das ja vorübergehend luftgetragen ist. Es ist möglich, daß das freigesetzte Wasser Partikeln enthält, die zuvor aus der Gasphase abgeschieden wurden. Daraus resultiert die experimentelle Schwierigkeit, im Freisetzungsfall zwischen luftgetragenen und bereits abgeschiedenen Partikeln zu unterscheiden. Die luftgetragenen Partikeln tragen zum Quellterm bei, die abgeschiedenen hingegen (mit gewissen Einschränkungen) nicht.

Im Folgenden werden 4 Methoden zum Nachweis der Partikel- und Wasserfreisetzung beschrieben. Die erste Methode gilt für das geschlossene System (Serien 1A und 1B), die drei anderen gelten für das offene System (nur 1B). Alle Methoden sind mit spezifischen Vor- und Nachteilen behaftet, die jeweils im einzelnen mit aufgeführt werden. In Abb. 9 sind die entsprechenden experimentellen Aufbauten skizziert.

#### **A) Magnetstern im Covergas (geschlossenes System)**

An einer vertikalen Welle, die zentrisch durch den Deckel geführt wird, ist ein sechstrahliger "Magnetstern" montiert. Die Strahlen haben ungefähr die Länge des Zylinderradius und sind auf der Unterseite lückenlos mit Dauermagneten bestückt. Der Magnetstern kann über die gesamte Höhe des Versuchszylinders von Hand auf und ab bewegt und dabei propellerartig gedreht werden. Er wirkt dabei wie ein "magnetischer Staubsauger", d.h. luftgetragener Eisen- und Nickelstaub wird weggefangen. Um eine Mengenbestimmung zu ermöglichen, erhalten die Strahlen vor dem Versuch einen Überzug aus dünner Plastikfolie; nach dem Versuch wird die Folie abgezogen und der aufgesammelte Staub ausgewogen. Bei den 1A - Versuchen war zusätzlich zum Magnetstern (dort nur vierstrahlig) auch der Deckel mit Dauermagneten bestückt.

Vorteil: Prinzipiell kann man mit dem Magnetstern unmittelbar nach der Entladung bei geschlossenem, d.h. durch äußere Probenahme Maßnahmen ungestörten System die gesamte Menge luftgetragenen Fe- und Ni-Staubes ermitteln (abgesehen von Sedimentation etc., die in den kurzen Zeiten jedoch keine große Rolle spielt).

Nachteil: Beim Auftreffen des Poolwassers auf den Deckel (Slug Impact) werden auch die Magnete vom Wasser getroffen. Falls dieses Wasser bereits abgeschiedene Partikel enthält (insbesondere bei niedriger Poolhöhe der Fall), dann können diese Partikel von den Magneten aus dem Wasser herausgefischt werden. Eine spätere Unterscheidung zwischen "luftgetragenen" und "aus dem Wasser herausgefischt" ist schwierig und nur über ergänzende Beobachtungen aus Hochgeschwindigkeitsfilmen möglich.

### **B) Plastiksäcke an den Deckelstutzen (offenes System)**

Beide Deckelstutzen sind offen, d.h. es werden zwei Leckagen am Deckel von jeweils 4 cm Durchmesser simuliert. Über den Stutzen wird jeweils ein Plastiksack befestigt; der Übergangsbereich wird gut abgedichtet. Vor der Entladung werden die Säcke auf ein Minimalvolumen zusammengedrückt. Nach der Entladung blähen sich die Plastiksäcke auf, bedingt durch den Überdruck im Covergasbereich. Sie enthalten nun die Wassermenge, die durch die beiden Stutzen entwichen ist, sowie eventuell mitgeführte Partikeln. Diese können auch vorübergehend noch luftgetragen sein.

Vorteil: Die Sammelstelle für das entwichene Material befindet sich unmittelbar am Stutzen. Impaktionsprozesse an gekrümmten Rohrleitungen entfallen, das Ausströmen wird auch durch Filter nicht behindert.

Nachteil: Der Nachweis von freigesetztem Staub ist schwierig; die Säcke müssen ausgewaschen und das Waschwasser muß filtriert werden. Beim freigesetzten Wasser kann man nicht ausschließen, daß ein Teil durch den Stutzen wieder zurückfließt. Bei hoher Druckentladung besteht die Gefahr, daß die Säcke zerreißen.

### **C) Schlauchleitung, Filter, Auffangbehälter (offenes System)**

Der erste Deckelstutzen ist offen, der zweite geschlossen. Vom offenen Deckelstutzen führt eine Schlauchleitung mit 4 cm Durchmesser und ca. 40 cm Krümmungsradius auf einen Filter mit 0,2 µm Porengröße und 30 cm Durchmesser. Unterhalb des Filters befindet sich ein Wasserauffangbehälter. Das Filtergehäuse ist für Druckspitzen bis 1 MPa ausgelegt. Nach der Entladung erfolgt die Druckentlastung unter Mitriß von Wasser und evtl. Partikeln durch Schlauchleitung und Filter. Die Partikeln (luftgetragen oder bereits im mitgerissenen Wasser abgeschieden) werden auf dem Filter zurückgehalten. Das Wasser gelangt in den Auffangbehälter.

Vorteil: Einfache Bestimmung der freigesetzten Partikel- und Wassermengen möglich. Es werden alle freigesetzten Partikeln erfaßt, wenn man die Rohrleitungen mit einschließt.

Nachteil: Der Filter setzt dem Entspannungsprozeß einen Widerstand entgegen. Später nimmt er Wasser auf und ist dadurch praktisch dicht. Eine vollständige Entspannung bis auf Atmosphärendruck ist dadurch kaum möglich. Die gemessenen Partikel- und Wassermengen sind somit gegenüber dem "freien Fall" möglicherweise zu gering. Zwischen luftgetragenen und bereits abgeschiedenen Partikeln kann nicht unterschieden werden. Gekrümmte Rohrleitungen bewirken Impaktionsprozesse und dadurch evtl. schon eine Abscheidung vor der Sammelstelle.

#### **D) Schlauchleitung, Auffangkannen**

Vom Deckelstutzen führt eine Schlauchleitung mit 4 cm Durchmesser und ca. 40 cm Krümmungsradius direkt zu einer 25 Liter-Auffangkanne. Die Kanne hat im oberen Bereich eine Öffnung, um eine vollständige Druckentlastung zu ermöglichen. Die freigesetzten Wassermengen sowie evtl. darin enthaltene Partikeln werden in der Kanne aufgefangen. Das Wasser wird später filtriert zur Analyse auf mitgeführte Partikeln. Es wurden Versuche mit einer Kanne (zweiter Deckelstutzen geschlossen) und mit zwei Kannen (je eine pro Deckelstutzen) durchgeführt, um die Abhängigkeit der freigesetzten Mengen von der Größe der Öffnung im Deckel zu untersuchen.

Vorteil: Entspannung bis auf Umgebungsdruck. Keine Behinderung durch Filter.  
Einfache Bestimmung der freigesetzten Wassermenge. In einfacher Weise Mehrfachauslegung möglich.

Nachteil: Luftgetragene Partikeln können entweichen. Gekrümmte Rohrleitungen bewirken Impaktionsprozesse und dadurch evtl. schon eine Abscheidung vor der Sammelstelle.

#### 4. VERSUCHSPARAMETER

Bei der Serie 1A wurden folgende Parameter variiert (siehe Zusammenstellung in Tab. 1 und 2):

- Entladungsdruck (0,3 bis 2 MPa)
- Poolhöhe (0 bis 90 cm)
- Partikelgröße (1 bis 100  $\mu\text{m}$ , Fe oder Ni)
- Partikelmenge (0 bis 30 g)

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Als Poolflüssigkeit wurde unbehandeltes Leitungswasser benutzt. Außer bei Versuch Nr. 31 befanden sich Stickstoff im Druckbehälter und Luft mit Normaldruck im Covergas (bei Nr. 31 in beiden Fällen Argon).

Wie man Tab. 3 und 4 entnehmen kann, ging es bei der Serie 1B um die Variation der folgenden Parameter:

- Entladungsdruck (0,002 bis 4 MPa)
- Poolhöhe (0 bis 50 cm)
- Partikelgröße (1 bis 100  $\mu\text{m}$ , Fe oder Ni)
- Partikelmenge (0, 10, 30 g)
- Leckagefläche im Deckel (0 bzw. 12,5 bzw. 25  $\text{cm}^2$ )

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Als Poolflüssigkeit wurde Leitungswasser benutzt, das in den meisten Fällen per Unterdruck im Covergas über ca. 2 Tage entgast wurde. Der Quellbehälter war mit Stickstoff gefüllt. Im Covergas befand sich in allen Fällen Luft bei Normaldruck mit Ausnahme der Blubberversuche, wo ein leichter Unterdruck erzeugt wurde.

## 5. MESSGRÖSSEN

### 5.1 Rückhaltefaktoren

Der Schwerpunkt des Versuchsprogrammes ist die Untersuchung des Transports bzw. der Abscheidung von Partikeln in einer expandierenden, oszillierenden und aufsteigenden Blase. Die gesamte eingewogene Partikelmasse im Quellbehälter (die unmittelbar nach dem Öffnen der Berstscheibe luftgetragen ist) wird mit  $M_1$  bezeichnet. Wenn man unmittelbar nach dem Aufsteigen und Aufbrechen des entladenen Gasvolumens die Masse  $M_2$  im Covergas in luftgetragener Form vorfindet, kann man den Rückhaltefaktor für luftgetragene Partikeln definieren als

$$RF_L = M_1/M_2$$

Experimentell wird  $M_2$  im geschlossenen System folgendermaßen bestimmt: Eine Trübung des Covergasbereiches nach der Entladung zeigt an, daß das Gas aerosolbeladen ist. Dies kann zweierlei Ursachen haben:

- a) Fe- bzw. Ni-Staub wurde luftgetragen in das Covergas transportiert.
- b) Durch die Kompressions- und Expansionsvorgänge kam es zur Bildung von Nebeltröpfchen im Covergas.

Im Fall a) muß die Trübung verschwinden, wenn das Covergas mit dem Magnetstern abgefahren wird. Die aufgesammelten Partikeln haften an den Magneten und werden später ausgewogen. Im Fall b) bleibt der Nebel unbeeinflusst von den Magneten und löst sich allmählich auf.

Als unerwünschter Nebeneffekt kann jedoch auch der Fall eintreten, daß bereits im Wasser abgeschiedene Partikeln in den Wirkungsbereich der Magnete gelangen, da sie wegen ihrer hohen kinetischen Energie eine gewisse Eindringtiefe haben und das Wasser heftig nach oben beschleunigt wird. Dies ist vor allem bei relativ niedriger Poolhöhe der Fall. Die auf diese Weise in den Wir-

kungsbereich der Magnete gelangende und aus dem Wasser "herausgefischte" Partikelmenge sei gleich  $M_3$ . Damit kann man den Rückhaltefaktor  $RF_W$  für Partikeln, die im Wasser eingeschlossen den Deckelbereich erreichen, definieren als

$$RF_W = M_1/M_3$$

Aus dem genauen Studium der Hochgeschwindigkeitsfilme erhält man den Aufschluß darüber, ob die Partikeln der Menge  $M_2$  oder der Menge  $M_3$  zuzuordnen sind. Problematisch wäre der Fall einer Vermischung von  $M_2$  und  $M_3$ ; dies kam jedoch bei den Experimenten nicht vor.

Bei Leckagen muß die Partikelmenge, die auf den externen Filtern aufgefangen wurde, zu den Mengen  $M_2$  bzw  $M_3$  hinzuaddiert werden.

## 5.2 Druckstöße, Oszillationen, Periode

Der Expansionsvorgang führt wegen der Kompression des Covergases mit daraus resultierendem Gegendruck in den meisten Fällen (außer bei sehr kleiner Poolhöhe) zu Oszillationen mit ausgeprägten Druckpulsen auf den Deckel und die Bodenplatte. Etwas vereinfachend kann man sich den Vorgang vorstellen als eine gedämpfte Schwingung eines Wasserkolbens zwischen zwei Gaspolstern. Die Schwingung wird beendet, wenn der Wasserkolben durch Entrainmentprozesse aufgebrochen ist oder die Schwingungsenergie durch andere Prozesse abgegeben wurde. Das auftriebsbedingte Aufsteigen des Gasvolumens durch die Poolflüssigkeit (in Form einer großen Blase oder zahlreicher kleiner Blasen) ist normalerweise ein "Langzeitvorgang" gegenüber den Oszillationen (Zeitskala 1 sec gegenüber 50 msec), und in erster Näherung kann man die beiden Vorgänge entkoppeln. Vor allem bei großer Poolhöhe können zahlreiche Schwingungen mit rasch abnehmender Amplitude, aber näherungsweise konstanter Schwingungsdauer auftreten (eventuell überlagert von Effekten der Relativbewegung des Behälters), während bei kleiner Poolhöhe oft schon während des ersten Schwingungsvorgangs ein völliges Aufbrechen des Wasserkolbens oder ein "Durchschlag" des Gas-Partikel-Gemisches beobachtet wird, allerdings begleitet von starkem Entrainment.

Der Schwingungsvorgang wird charakterisiert durch Angabe der Schwingungsdauer bzw. Periode. Sie ist definiert als die Zeitspanne zwischen dem Öffnen der Berstscheibe und dem ersten Druckmaximum in der Blase, gemessen mit dem am Poolzylinderboden installierten Druckaufnehmer, oder als der Abstand der beiden ersten Druckspitzen im Covergas. Eine weitere wichtige Meßgröße ist die Höhe der ersten Überdruckspitze im Covergas. Sie ist ein Maß für die zu erwartende Deckelbelastung des Reaktortanks.

### **5.3 Freigesetzte Wassermenge**

Die aus den Deckelleckagen freigesetzte Wassermenge wird mit Hilfe der in Kap. 3.5 angegebenen Methoden bestimmt. Sie ist ein Maß für die zu erwartende Natriumfreisetzung aus dem Reaktortank. Allerdings können Ort, Größe und Öffnungszeitpunkt der Leckagen eine wichtige, im Experiment aber kaum nachvollziehbare Rolle spielen.

### **5.4 Expansionscharakteristik, Entrainment**

Bei der Filmauswertung werden die effektiven Trennflächen Blase/Poolflüssigkeit und Covergas/Poolflüssigkeit in ihrer zeitlichen Entwicklung erfaßt. Hieraus kann man die effektiven Volumina (d.h. Gas und Entrainment) berechnen und u.a. auch die Entrainmentrate bestimmen. Letzteres geschieht z.B. mit Hilfe der gemessenen Drucksignale und der Annahme, daß sich die Gasvolumina adiabatisch verhalten.

## **6. VERSUCHSAUSWERTUNG**

### **6.1 Bestimmung der freigesetzten Partikelmenge**

Die Magnete hatten einen Überzug aus PVC-Folie, der nach dem Versuch abgezogen wurde. Der aufgesammelte Fe- oder Ni-Staub wurde von diesem Überzug mit Hilfe eines weiteren Magneten auf Filterpapier übernommen und anschließend ausgewogen. Die Nachweisgrenze lag bei 1 mg. Bei einer Einwaage von 30 g ergibt sich also für den Fall, daß keine Staubspuren auf dem Filter zu erkennen waren, ein Rückhaltefaktor  $RF > 3 \cdot 10^4$ .

Die auf den externen Filtern abgeschiedenen Partikeln wurden ebenfalls magnetisch auf ein anderes Filterpapier übernommen. Damit wurden Fehlinterpretationen durch Gewichtsveränderungen des Originalfilters (aufgenommene Feuchte etc.) vermieden.

### **6.2 Bestimmung der freigesetzten Wassermenge**

Die freigesetzten Wassermengen konnten an der Eichmarkierung der Auffanggefäße unmittelbar abgelesen werden. Näheres wurde bereits unter Kap. 3.5 beschrieben.

### **6.3 Auswertung der Drucksignale**

Bei den Versuchen der Serie 1A wurden die mit Hilfe von Druckaufnehmern gemessenen Werte von Transientenrecordern aufgenommen und von dort per Schreiber ausgegeben. Von den erstellten Diagrammen wurden die interessierenden Größen (Höhe und Anzahl der Druckstöße, Periode) direkt abgelesen.

Bei den Versuchen der Serie 1B wurden die Drucksignale per Multiprogrammer und Rechner auf Kassetten abgespeichert und anschließend weiterverarbeitet. Die o.g. Größen wurden aus Mehrfarbenplots ermittelt.

#### 6.4 Film-Digitalisierung zur Bestimmung der Expansionscharakteristik und des Entrainments

Für die quantitative Auswertung eines Filmbildes ist es zunächst notwendig, die Trennkurven zwischen Flüssigkeit und Gasphase zu erfassen, und zwar getrennt für den Blasen- und den Covergasbereich. Bei Totalaufnahmen befinden sich beide Trennkurven auf einem Bild. Bei getrennten Aufnahmen müssen die beiden zeitlich einander entsprechenden Bilder herangezogen werden. Unter Einbeziehung der Wände sowie des Bodens bzw. des Deckels ergeben sich geschlossene Kurven. Setzt man Rotationssymmetrie um die Behälterachse voraus, kann man die Kurven in Volumina umrechnen.

Bei der Digitalisierung einer Trennkurve werden möglichst viele diskrete Wertepaare  $x_i, y_i$  erfaßt und abgespeichert. Die Kurve wird danach durch einen Polygonzug approximiert. Zu diesem Zweck wurde ein Digitalisiergerät (Hewlett-Packard Digitizer 9874 A) beschafft, das in Verbindung mit einem Rechner (in unserem Fall HP 9845) betrieben wird. Das Digitalisiergerät besitzt ein hochklappbares Tablett mit Mattglasscheibe und eingebautem Drahtgitter zur elektronischen Erfassung der Koordinaten. Mit Hilfe eines Cursors (Prinzip: Induktionsspule) wird der zu digitalisierende Punkt erfaßt. Typischerweise wurden pro Trennkurve etwa 20 bis 30 Punkte digitalisiert. Um die zeitliche Abhängigkeit zu erfassen, muß im Prinzip jedes einzelne Filmbild ausgewertet werden. Im Allgemeinen ist aber nur der Zeitraum von 0 bis 0,3 sec von Interesse, da bis dahin die heftigen Oszillationen abgeklungen sind. Dies wären 600 auszuwertende Bilder pro Versuch. Es hat sich jedoch gezeigt, daß normalerweise eine Anzahl zwischen 50 und 70 ausreichend ist.

Das Rechenprogramm zur Filmauswertung besteht aus den Teilen FILM 1, DRUCK 1 und FINTER. FILM 1 ist das Programm zum Digitalisieren der Filmbilder. Zwischen zwei Werten  $x_i, y_i$  wird linear interpoliert. Mit Hilfe der Beziehung für das Volumen eines halben Kegelstumpfes wird iterativ das Volumen berechnet. Da für jedes Bild ein Merkpunkt (Fixpunkt am Behälter) aufgenommen wird, wird gleichzeitig auch die Bewegung des Behälters mit erfaßt. DRUCK 1 ist das Programm zum Digitalisieren, Plotten, Korrigieren und Abspeichern der

zugehörigen Druckkurven. FINTER ist das Programm zur Kombination und Weiterverarbeitung der Daten "Volumen" und "Druck". Die Volumen-Daten erhält man aus FILM 1. Hierbei handelt es sich um die "effektiven Volumina"  $V_{\text{eff}}$ , die sich aus Gasvolumen und Entrainment (Flüssigkeitseintrag in das Gasvolumen) zusammensetzen. Die reinen Gasvolumina  $V_{\text{gas}}$  erhält man aus DRUCK 1 unter der Annahme adiabatischer Expansion bzw. Kompression, d.h.

$$p \cdot V_{\text{gas}}^{\uparrow} = \text{const.}$$

Das Entrainmentvolumen  $V_{\text{entr}}$  wird hieraus berechnet gemäß

$$V_{\text{entr}} = V_{\text{eff}} - V_{\text{gas}}$$

Das Gesamt-Entrainment (Blase + Covergas) erhält man aus der Summe der beiden Komponenten b und c oder aus der Abnahme der Poolwassermenge.

Insgesamt liefert das Auswerteprogramm durch die Erfassung der Bewegungsabläufe von Blase, Covergas und Versuchsbehälter in Kombination mit den Drucksignalen das Zeitverhalten der folgenden Größen:

- Druck im Quellbehälter
- Druck am Poolbehälterboden
- Druck am Deckel
- Gasvolumen Blase, Covergas
- Effektivvolumen Blase, Covergas
- Entrainment Blase, Covergas
- Gesamtentrainment
- Wasserkonzentration in Blase, Covergas
- Masse Wassersäule
- Höhe Wassersäule
- Temperatur Blase, Covergas (adiabatisch)
- Energie Blase, Covergas
- Geschwindigkeit Blase (ebene Expansion)
- Radius, Radiusänderung Blase (hemisphärische Expansion)
- Höhe, Geschwindigkeit Wassersäule
- Sprunghöhe Tank
- Tankbewegung
- Kinetische, potentielle Energie Tank

Das Verhalten der Fe- bzw. Ni-Partikeln in der Blase wird von dem Auswerteprogramm nicht erfaßt. Bei der Digitalisierung der Filmbilder wurden die strahlförmigen Störungen in der Trennfläche Gas/Flüssigkeit infolge abgechiedener Partikeln nicht berücksichtigt.

Über die Filmauswertung der FAUST-Versuche wurde ein ausführlicher Bericht erstellt /6.1/.

## 7. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

### 7.1 Ergebnisse der FAUST 1A-Versuche

In den Tabellen 1 und 2 sind die wesentlichen Versuchsparameter bzw. Ergebnisse der 1A-Versuche zusammengestellt. Zur Verdeutlichung der Vorgänge während der Entladung zeigt Abb. 10 a-d eine Folge ausgewählter Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von einer 1 MPa - Entladung bei 60 cm Poolhöhe.

Die Partikelrückhaltung ist sehr hoch. Luftgetragener Metallstaub im Covergas nach der Entladung, d.h. eine über mehrere Sekunden anhaltende, auf den Metallstaub zurückzuführende Trübung, war in keinem Fall nachzuweisen (außer Exp. 28 ohne Wasser). Daher gilt in allen Fällen unter Berücksichtigung der Nachweisgenauigkeit  $RF_L > 10^4$ . In einigen Fällen wurde im Covergas eine Aerosolbildung beobachtet. Dabei handelte es sich aber eindeutig um Nebelbildung, da keine Reaktion auf die Magnete erfolgte. Bei einigen Experimenten, insbesondere bei sehr niedriger Poolhöhe, konnte ein Teil der Partikeln im Wasser eingeschlossen den Deckelbereich und damit die Magnete erreichen. Nach der Definition von Kap. 5.1 wurden für  $RF_W$  Werte zwischen 18 (bei geringer Poolhöhe) und  $> 3 \cdot 10^4$  (bei größerer Poolhöhe) gemessen. In zwei Fällen (Exp. 17 und 24) wurden bei großer Poolhöhe (90 cm) Partikeln an den Magneten gefunden. Es handelte sich hierbei um sphärische 100  $\mu\text{m}$ -Partikeln. Sie wurden möglicherweise als "rollende Kugeln" auf der Trennfläche Gas/Flüssigkeit bis in den Deckelbereich transportiert.

Der Expansionsvorgang ist in der Anfangsphase meist hemisphärisch und geht dann in eine ebene Form über, wobei der Wasserpool wie ein Kolben nach oben beschleunigt wird (siehe Abb. 12). Wegen der Kompression des Schutzgases kommt es zu Oszillationen und damit korrelierten Druckpulsen in der Blase und im Covergas. Die Schutzgaskompression verhindert den direkten Aufschlag des "Wasserhammers" auf den Tankdeckel. Der Maximaldruck im Schutzgas ist wesentlich niedriger als der Entladungsdruck. Bei großer Poolhöhe (90 cm) werden zahlreiche Druckpulse beobachtet (manchmal mehr als zehn), bei mittleren Höhen (60 cm) typischerweise fünf, während bei kleiner Höhe ( $< 30$  cm) ein direktes Durch-

schlagen bei kaum ausgeprägten Schwingungen möglich ist. Die Periode (Schwingungsdauer) liegt zwischen 40 und 80 msec; sie hängt etwas von der Poolhöhe ab, während die Höhe des Entladungsdruckes kaum eine Rolle spielt. Die Oszillationen spielen wegen der sehr kleinen Schwingungsdauer eine wichtige Rolle bei der Partikelabscheidung, da in dieser Zeitskala die Eigenträgheit der Partikeln in dem Gasvolumen nicht vernachlässigt werden kann und zu Impaktionsabscheidung führt. Beispiele für gemessene Drucksignale zeigen die Abbildungen 14 a,b.

Es werden starke Entrainmentprozesse in der Blase und im Schutzgas beobachtet (siehe Abb. 15). Die höchsten Entrainmentraten traten in der Blase auf. Die Filmauswertung lieferte Entrainmentwerte (Anteil Wasser am gesamten Blasenvolumen) bis zu 80%. Der Flüssigkeitskolben kann dadurch nach einigen Oszillationen in ein Gas-Wasser-Gemisch aufbrechen; dies ist bei kleinen und mittleren Poolhöhen der Fall. Bei größerer Poolhöhe verbleibt ein stabiler Mittelbereich, durch den später die aufsteigende Blase mit ihrer typischen Kugelform hindurchtritt. Die Entrainmentprozesse lassen sich besonders gut im Covergasbereich untersuchen, da hier meist eine ebene Trannfläche zwischen Gas und Flüssigkeit vorliegt. Durch Einfärben des Wassers wurde festgestellt, daß im Pool praktisch keine Konvektionsströmungen auftreten. Das Entrainment ist also ein "stabiles" Abtragen des Wasserkolbens von beiden Seiten in die jeweiligen Gasvolumina.

## 7.2. Ergebnisse der FAUST 1B-Versuche

In Tab. 3 sind die wichtigsten Parameter der 1B-Versuche zusammengestellt. Tab. 4 enthält die wesentlichen Ergebnisse. Zur Verdeutlichung der Vorgänge während der Entladung sind in Abbildung 11 a - e ausgewählte Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zusammengestellt von einer 2 MPa-Entladung ohne Leckagen in einen 40 cm-Pool.

Die Partikelrückhaltung ist ähnlich wie bei 1A wieder sehr hoch. Luftgetragener Metallstaub im Covergas konnte nur bei sehr niedrigem Entladungsdruck (0,06 MPa) und bei den Blubbersuchen nachgewiesen werden; letztere hatten allerdings nur orientierenden Charakter. Es ergaben sich Rückhaltefaktoren

zwischen  $10^2$  und  $10^3$ . In den anderen Fällen (Druck 0,1 bis 4 MPa) war kein luftgetragenes Material nachzuweisen, d.h.  $RF > 10^4$  unter Berücksichtigung der Meßgenauigkeit. Die bei sehr geringer Poolhöhe (Versuche 104 und 108) an den Magneten abgeschiedenen Partikeln waren aus dem Wasser herausgefischt und nicht im Covergas luftgetragen.

Aus den Versuchen mit Leckagen ergibt sich folgendes Bild: Unterhalb von 1 MPa waren weder Wasser noch Partikeln nachzuweisen (außer Blubberversuche). Bei 1 MPa kam es zu einer geringen Wasserfreisetzung von wenigen Millilitern. Dann allerdings steigt die Menge überproportional an bis zu 1,6 Litern bei 4 MPa. Auch die Poolhöhe ist entscheidend: 50 cm gegenüber 40 cm lassen die Wassermenge z.B. bei 3 MPa auf das Vierfache ansteigen. In allen Fällen handelte es sich um "klares" Wasser ohne Partikelbeimischung. Auf den externen Filtern konnten in keinem Fall Metallpartikeln (luftgetragen oder bereits im Wasser abgeschieden) nachgewiesen werden. Die Wasserfreisetzung ist also unmittelbar mit der ersten Kompressionsphase verknüpft: Entrainiertes Wasser entweicht mit dem komprimierten Covergas, bevor es zu einer Vermischung mit Partikeln oder zum Transport von Partikeln in das Covergas kommt (siehe Abb. 16).

Die Abhängigkeit der Wasserfreisetzung von der Größe der Leckage wurde nur an einem Beispiel (Exp. Nr. 130/132) untersucht. Es ergab sich das zunächst merkwürdig erscheinende Ergebnis, daß bei Verdoppelung der Leckagefläche die freigesetzte Wassermenge geringer wird (oder näherungsweise gleich bleibt). Eine mögliche Erklärung ist, daß bei vergrößerter Leckagefläche der Covergasdruck und damit das Entrainment, d.h. die kurzzeitig luftgetragene und damit potentiell zur Freisetzung zur Verfügung stehende Wassermenge, verringert wird.

Andererseits muß darauf hingewiesen werden, daß es bei sehr großen Leckagen (im Experiment nicht untersucht) zu einem direkten Wasserauswurf unabhängig von Entrainmentprozessen kommen kann.

Der Filter im Ausströmungsquerschnitt erwies sich als hohes Hindernis und führte gegenüber dem ungestörten Fall zu einer erheblichen Reduzierung der Wasserfreisetzung (ca. 300 ml, Exp.Nr. 127, gegenüber ca. 1600 ml, Exp.Nr. 128/129).

Der Expansionsvorgang (siehe Abb. 13) ist in der Anfangsphase zunächst hemisphärisch, danach ellipsoidal mit ausgeprägter Abflachung im oberen Bereich, und zum Zeitpunkt maximaler Expansion in grober Näherung zylinderförmig. Während der Rekompansionsphase wird kurzfristig ein kugelförmiges Stadium durchlaufen, danach kommt es zur Ausbildung eines Torus auf einem "Sockel"; letzterer breitet sich schließlich über die gesamte Breite der Bodenplatte aus und führt so zu der linearen Konfiguration eines schwingenden Wasserkolbens. Es werden mehrere Oszillationen beobachtet, wobei infolge von Entrainmentprozessen die Höhe des Wasserkolbens laufend geringer wird. Das auftriebsbedingte Aufsteigen des entladenen Stickstoffs bis zum Covergas erfolgt in einer breiten, ebenen Front aus mehreren Einzelblasen. Die Aufstiegszeit ist groß im Vergleich zur Schwingungsdauer des Kolbens. Eine einzelne große aufsteigende Blase in der typischen Kugelkappenform, wie manchmal bei der 1A-Serie beobachtet, wurde bei 1B in keinem Fall gesehen. Wenn die Blasenfront das Covergas erreicht hat, dann erscheint wegen des hohen Flüssigkeitseintrages das gesamte Poolzylindervolumen als Emulsion. Danach einsetzende Sedimentation führt zur Entmischung. Als Endzustand hat man normalerweise einen trüben Pool und darüber ein klares Covergas.

Nur bei sehr niedriger, SNR-untypischer Poolhöhe wird ein Durchschlag aus dem Quellbehälter direkt in das Covergas beobachtet. Allerdings kommt es auch in diesem Fall zu starken Entrainmentprozessen, so daß auch hier das Stadium der Emulsion durchlaufen wird und luftgetragener Metallstaub im Anschluß an die Entladung nicht zu beobachten ist.

Wegen der Kompression des Covergases kommt es zu Oszillationen und damit korrelierten Druckstößen in der Blase und im Covergas (siehe Abb. 17). Der Maximaldruck im Covergas, d.h. die erste Druckspitze, ist ein Maß für die Deckelbelastung. Er ist wesentlich niedriger als der Entladungsdruck, so z.B. bei der Standardpoolhöhe von 40 cm kleiner als 10% (siehe auch Abb. 18). Es werden bis zu zehn Druckpulse mit rasch abnehmender Intensität gemessen.

Die Schwingungsdauer bzw. Periode hingegen ist näherungsweise konstant und relativ unempfindlich auf Entladungsdruck und Poolhöhe. Die Relativbewegung des Behälters, insbesondere das Wiederaufsetzen auf den Boden, bewirkt allerdings eine gewisse Störung. Definiert man als Periode den Abstand der beiden ersten Druckmaxima im Covergas (in wenigen Fällen auch die Zeit von  $t = 0$  bis zum ersten Maximum), so erhält man Werte zwischen 36 und 56 msec (siehe auch Abb. 19). Die Periode ist eine wichtige Vergleichsgröße für Modellrechnungen.

Es werden starke Entrainmentprozesse in der Blase und im Schutzgas beobachtet. Der Flüssigkeitskolben kann dadurch nach einigen Oszillationen in ein Gas-Wasser-Gemisch (Emulsion) aufbrechen. Die Entrainmentprozesse lassen sich besonders gut im Covergasbereich untersuchen, da hier meist eine ebene Trennfläche vorliegt. Die Filmauswertung ergab Entrainmentwerte von 20-30% im Covergas und bis zu 80% in der Blase (siehe Abb. 20 - 22). Durch Einfärben des Wassers wurde festgestellt, daß im Pool nur geringe Konvektionsströmungen auftreten. Ein signifikanter Einfluß der Vorbehandlung des Wassers durch Entgasen auf das Entrainment wurde nicht festgestellt.

Bei Entladungen  $< 3$  MPa wird, außer bei unrealistisch kleiner Poolhöhe, die Trennfläche Pool/Covergas nahezu als ebene Front angehoben. Dadurch kommt es auch nicht zu einem direkten Kontakt zwischen Pool und Deckel ("Wasserhammer"). Eine deutliche Wölbung der Trennfläche, das sog. Doming, wird allerdings bei höherem Druck (4 MPa) beobachtet.

Die Reaktion des Versuchsstandes auf die Druckentladung ist beachtlich. Trotz des hohen Eigengewichtes von über 600 kg wurden Sprunghöhen bis zu 12 cm gemessen.

## 8. ERGEBNISSE VON BEGLEITENDEN MODELLRECHNUNGEN, DISKUSSION

### 8.1 PAROGA-Rechnungen zur Partikelabscheidung während der Expansions- und Oszillationsphase

Über modelltheoretische Arbeiten zu FAUST wird ein eigener KfK-Bericht erstellt /2.14/. An dieser Stelle soll daher nur ein kurzer, vorläufiger Auszug wiedergegeben werden.

Unter der Bezeichnung PAROGA (Partikelabscheidung in einem oszillierenden Gasvolumen) werden Modellrechnungen zum Blasen- und Covergasverhalten sowie zur Partikelabscheidung durchgeführt. Die Grundlagen dieser Rechnungen wurden bereits in Kap. 2.4 und in den Abb. 2 und 3 erläutert. Es wird adiabatisches Verhalten der Gasvolumina angenommen. Die Partikelbewegung wird nur eindimensional betrachtet und folgt dem quadratischen Widerstandgesetz. Wegen der sehr kurzen Schwingungsperioden spielt die Massenträgheit der Partikeln eine Rolle. Die Partikeln folgen der Bewegung der Trennfläche Gas/Wasser mit einer gewissen Verzögerung, und dies kann zur Impaktion und damit zur Abscheidung führen.

Abb. 23a zeigt als typisches Beispiel das Ergebnis einer solchen Rechnung für die einfache ebene Geometrie (Abb. 2a), die den Bedingungen der FAUST 1A - Versuche angepaßt ist. Die berechnete Periode der Oszillationen (81,6 msec) stimmt überraschend gut mit dem experimentellen Wert (81 msec aus Exp. 29) überein. Die Partikeln (Eisen, Radius 10  $\mu\text{m}$ ) werden während der beiden ersten Oszillationen vollständig im Wasser bzw. am Boden abgeschieden.

Abb. 23b zeigt das entsprechende Ergebnis für die radialsymmetrische Expansion (Rayleigh - Gleichung). Die Schwingungsperiode ist wesentlich kürzer (40,7 msec). Nach 0,25 sec bzw. sechs Oszillationen sind nur 7 von 10 Partikeln im Wasser abgeschieden. Eine Abscheidung am Boden entfällt. Bei Umrechnung auf dreidimensionale Verhältnisse (Wichtung mit  $r^3$ ) bedeutet dies aber immerhin einen Abscheidegrad von 96,4 %.

Rechnungen für die in Abb. 3 gezeigte Geometrie bzw. die Geometrie der FAUST-Versuche sind komplizierter, da hier ein Umschalten auf verschiedene Expansionstypen notwendig ist. In Analogie zu anderen Rechenprogrammen, z.B. PBDOWN /8.1/, wurde die folgende Dreiteilung vorgenommen: Zunächst ebene Expansion aus dem Core-Bereich bis zum Eintritt in den Pool, danach hemisphärische Expansion bis zum Erreichen der äußeren Tankwand, danach wieder Umschaltung auf ebene Expansion. Abb. 24 zeigt ein typisches Beispiel, gerechnet für die 1A - Geometrie mit 1 MPa Entladungsüberdruck, 60 cm Poolhöhe und Eisenpartikeln mit 10  $\mu\text{m}$  Radius. Die Schwingungsperiode für diesen Fall ist 66 msec, d.h. 19 % geringer als der experimentelle Wert. Die Partikeln werden schon während der ersten Schwingung vollständig im Wasser abgeschieden. Die spezielle Geometrie hat als gegenüber dem einfachen ebenen "Kasten" in Abb. 2a einen positiven Einfluß auf die Partikelabscheidung.

Allgemein liefern die PAROGA - Rechnungen, daß bei der FAUST - Geometrie Partikeln bis herab zu ca. 1  $\mu\text{m}$  auf diese Weise abgeschieden werden. Kleinere Partikeln werden hingegen nicht mehr erfaßt.

## 8.2 Näherungsrechnungen zum Entrainment

Bei den o.g. PAROGA - Rechnungen wurde aus Vereinfachungsgründen das Entrainment nicht berücksichtigt, obwohl es eine wichtige Rolle spielt. Das Entrainment dämpft oder beendet den Schwingungsvorgang und bewirkt in Analogie zum Naßwäscher ein Auswaschen der Partikeln in der Blase.

Unter der Bezeichnung MOFA (Modellrechnungen zu FAUST) wurden für die 1A - Geometrie Näherungsrechnungen durchgeführt, die das Corradini - Modell /2.10/ des Entrainments enthalten sowie einen einfachen Ansatz, der die Sedimentation der eingetragenen Tröpfchen beschreibt. Abb. 25 zeigt ein typisches Beispiel. Alle Rechnungen dieser Art führen zu dem Ergebnis, daß das Entrainment im Covergas näherungsweise richtig wiedergegeben wird, während im Falle der Blase die experimentellen Werte wesentlich höher sind. Daher erscheint es notwendig, weitere Mechanismen, z.B. Kelvin-Helmholtz, in diese Rechnungen mit aufzunehmen.

Inzwischen wurde auch im PAROGA - Programm das Entrainment aufgenommen. Die Abscheidung von Partikeln in der Blase durch Kollision mit Entrainment-Tropfen ist nach vorläufigen Rechnungen sehr effektiv und auch noch bei Partikeln wirksam, die erheblich kleiner als  $1 \mu\text{m}$  sind /2.14/.

### **8.3. Blasen- und Covergasverhalten**

Aus den Näherungsrechnungen erhält man auch das Zeitverhalten von Druck, Volumen und Temperatur in der Blase und im Covergas. Die Schwingungsperioden stimmen meist relativ gut mit dem Experiment überein ( $\pm 20\%$ ). Die berechneten Druckspitzen sind jedoch in vielen Fällen zu hoch. Die Temperaturen ändern sich wegen des adiabatischen Verhaltens beachtlich (z.B.  $\pm 100^\circ$ ), was jedoch experimentell nur sehr schwer nachprüfbar ist.

Bei der Modellierung bereitet die als "hemisphärisch" angenommene Übergangsphase die meisten Schwierigkeiten, insbesondere bei der 1B - Geometrie, wo sich die Halbkugel oft nicht bis zur Tankwand ausdehnen kann, d.h. das Umschaltkriterium wird nicht erreicht. Bei der vergleichsweise schmalen 1A - Geometrie tritt dieses Problem nicht auf. Es hat sich gezeigt, daß die Beschreibung der hemisphärischen Expansion mit der Rayleigh-Gleichung dazu führt, daß die Periode unterschätzt und der maximale Kompressionsdruck erheblich überschätzt wird. Eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit den Experimenten erhält man, wenn die hemisphärische Expansion als "quasiebene" Expansion behandelt wird, d.h. wenn man die Gleichungen für die ebene Expansion eines Zylinders mit gleicher Grundfläche und gleichem Volumen wie die Halbkugel benutzt. Beispielrechnungen werden in dem Bericht /2.14/ aufgeführt.

### **8.4 Rechnungen nach Fuchs zur Partikelabscheidung in einer aufsteigenden Blase**

Die analytische Behandlung des Blasenauftiegs und der Partikelabscheidung in einer aufsteigenden Blase wurde bereits in Kap. 2.3 beschrieben. In der Fuchs'schen Theorie wird zur Vereinfachung angenommen, daß die Blase kugelförmig ist. In Tabelle 5 wurden berechnete Absorptionskoeffizienten für Eisen-

partikeln von 0,1 / 1 / 10  $\mu\text{m}$  Radius und Blasenradien von 0,5 / 2,5 / 15 / 30 cm zusammengestellt sowie der absorbierte Anteil nach 1 m Steighöhe. Die Impaktion (Koeffizient  $\alpha_i$ ) ist dabei mit Abstand der wichtigste Prozeß. In kleinen Blasen (0,5 cm) werden 0,1  $\mu\text{m}$ -Partikeln zu 15 %, 1  $\mu\text{m}$ -Partikeln zu 98,8 % und 10  $\mu\text{m}$ -Partikeln praktisch vollständig absorbiert. In einer großen Blase (30 cm, 1B - Tankradius) werden 0,1  $\mu\text{m}$ - Partikeln praktisch nicht absorbiert, 1  $\mu\text{m}$ -Partikeln zu weniger als 1 % und 10  $\mu\text{m}$ -Partikeln zu etwa 60 %. Bei den experimentellen Poolhöhen (z.B. 40 cm) sind die Werte entsprechend niedriger. Die hohen experimentellen Rückhaltefaktoren sind demnach durch die Abscheidung während des Aufstiegs nicht erklärbar. Sie müssen auf die Prozesse in Kap. 8.1 und 8.2 zurückgeführt werden.

## 9. VERGLEICH MIT ANDEREN AUTOREN

Zu der gesamten Quelltermproblematik von der Kernzerlegung bis zur Aerosolfreisetzung gibt bzw. gab es weltweit mehrere Versuchsprogramme. Einen guten Überblick über den Stand von etwa 1980 gibt der Artikel /9.1/. Die Zahl der Versuchsprogramme ist inzwischen stark zurückgegangen. Dies ist auf die Einstellung des amerikanischen Clinch-River-Projekts (CRBR), aber auch auf die Fertigstellung des französischen SPX - 1 zurückzuführen.

In den engeren Bereich des 'HCDA Bubble Source Terms' fallen die Experimente in Oak Ridge, an der Purdue University, am Stanford Research Institute, in Cadarache und Grenoble sowie in Oarai/Japan. Eine kurze Zusammenfassung mit einer Beschreibung der charakteristischen Einrichtungen und Zielsetzungen findet man in /1.3/.

Aerosolphysikalische Fragestellungen wurden vorwiegend in Oak Ridge und Cadarache untersucht, während es in den übrigen Fällen um hydro- und thermodynamische Untersuchungen ging.

### Oak Ridge:

Bei dem ORNL-FAST-Programm /9.2/ wurde die Stoßstromtechnik zur Verdampfung von  $UO_2$ -Pellets eingesetzt. Kondensierender  $UO_2$ -Dampf führt zu Partikeln, die erheblich kleiner als  $1 \mu m$  sind. Es wurden Versuche in Argonatmosphäre, unter Wasser und unter flüssigem Natrium durchgeführt. Ein meßbarer Aerosoltransport in das Covergas wurde nur in zwei Fällen festgestellt, die jedoch nicht reaktortypisch sind: Bei den Wasserversuchen ergaben sich Rückhaltefaktoren zwischen 60 und 2200, wenn die Pooltemperatur knapp unterhalb des Siedepunktes lag, d.h. wenn Wasserdampfblasen einen zusätzlichen Transport ermöglichten. Bei den Natriumversuchen wurde in einem Fall ein Rückhaltefaktor kleiner als 200 gemessen, und zwar bei einer Poolhöhe, die kleiner als der maximale Blasenradius war. In allen anderen Fällen war  $RF > 1,75 \cdot 10^4$ . Dies steht in guter Übereinstimmung mit den FAUST-Ergebnissen. Das Versuchsprogramm in Oak Ridge ist abgeschlossen. Wegen der Einstellung des CRBR-Projekts konnte nur ein kleiner Teil der vorgesehenen Natriumversuche durchgeführt werden.

### Cadarache:

Hydrodynamik und Aerosoltransport in einer stabilen, aufsteigenden Blase wurden im PLEXICAP-Programm untersucht /9.3/. Eine in Cadarache entwickelte Methode zur Erzeugung einer stabilen Blase mit der typischen Kugelkappenform ist das schnelle Öffnen von zwei Kugel-Viertelschalen durch Ankoppeln an ein Schwungrad. Untersucht wurde u.a. der Transport von Zigarettenrauch. Die Rückhaltung in der Blase war gering. Im CARAVELLE - Programm /9.4/ wurde in einem Wassertank eine Mehrphasenentladung durch Zünden einer Thermit- oder Penthrit-Ladung (Druckaufbau bis 5 MPa) oder durch Verwendung der EXCOBULLE - Quelle (überhitztes Wasser) erreicht. Manchmal wurden der Quelle auch Spaltprodukte (Jod) und Partikeln (Bronze) beigemischt. Ein wesentlicher Aspekt der Experimente war die Untersuchung des Materialtransports durch Leckagen im Tankdeckel. Die Wasserfreisetzung durch die Tankdeckelleckagen geschah in zwei Schüben. Ein relativ kleiner Teil wurde unmittelbar während des Wasserhammers freigesetzt. Der größere Teil resultierte aus der Freisetzung des Entrainments während der Druckentlastungsphase. Partikeln im freigesetzten Wasser waren nur nachzuweisen, wenn es während der Explosion zu einer starken Gasproduktion kam. Der Transport wird hauptsächlich den kleinen, aufsteigenden Gasblasen zugeschrieben.

Im EXCOBULLE-Programm /9.5/ wurde die radialsymmetrische Expansion eines Zweiphasengemisches (überhitztes Wasser) in einem Wasserpool untersucht. Das überhitzte Wasser befand sich innerhalb des Pool in einer Glaskugel, die durch Anstechen von außen zerstört wurde. Das wesentliche Ziel war, Information über Expansion und Kondensation der Blase zu gewinnen. Das Programm begann mit der Phase EXCOBULLE I (Versuche in kleinerem Maßstab mit einer 2 cm<sup>3</sup>-Quelle); danach folgte EXCOBULLE II mit einer 250 cm<sup>3</sup>-Quelle. Ein Aufsteigen der Blase war nur zu beobachten, wenn der Covergasdruck erheblich unter dem atmosphärischen Druck lag. Der Partikeltransport wurde nicht untersucht. Es wurden aber umfangreiche Untersuchungen zum Entrainment vorgenommen. Die (kugelsymmetrische) Entladung konnte nach dem Einbau des Corradini-Formalismus in den EXCOBUL-Code relativ gut modelliert werden /9.6/.

Die Programme PLEXICAP, CARAVELLE und EXCOBULLE sind abgeschlossen. Zur Zeit werden unter der Bezeichnung ECOTFIX Versuche zur Spaltproduktabscheidung in einer stationären Blase durchgeführt, die in einem Kreislauf mit strömendem Wasser erzeugt wird.

## **Purdue University**

Die an der Purdue - University in West Lafayette/Indiana aufgebaute OMEGA-Anlage /2.13/ hatte Core-Pool-Schutzgas-Geometrie in einer 1 : 7 Verkleinerung der CRBR-Geometrie. Das Core war ein beheizbarer Hochdruckzylinder, der durch eine Berstscheibe von dem Pool getrennt war. Es wurden Simulationsmaterialien ( $N_2$ ,  $H_2O$  etc.) in einen Wasserpool (bei einigen Versuchen auch Methanol) entladen. Manchmal waren auch Sandpartikeln beigemischt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag bei der Hydro- und Thermodynamik sowie der Belastung von Strukturen. Aerosolphysikalischen Fragen wurde nicht nachgegangen. Das Versuchsprogramm ist abgeschlossen.

OMEGA und FAUST, insbesondere 1B, haben ähnliche experimentelle Aufbauten. Beim Entwurf und Aufbau der FAUST-Versuchsstände wurden Erfahrungen von OMEGA verwertet.

Bei der Entladung von kondensierendem Material wurden hohe Entrainmentraten gefunden. Bei Stickstoffentladungen hingegen waren die Entrainmentraten - im Gegensatz zu FAUST - sehr niedrig. Dies ist möglicherweise auf die unterschiedliche Größe der Ausströmöffnung (5 cm  $\varnothing$  FAUST, 12,2 cm  $\varnothing$  OMEGA) zurückzuführen. Durch schmalere Öffnungen wird Entrainment nach Kelvin-Helmholtz begünstigt.

## **Stanford Research Institute und KfK/INR**

Auch bei den SRI-Versuchen in Stanford/Kalifornien ging es um die Entladung von Simulationsmaterial unter hohem Druck in einen Wasserpool, u.a. für den SNR 300 im Verkleinerungsmaßstab 1 : 20 (Durchmesser der Ausströmöffnung 9 cm). Um eine sehr kurze Öffnungszeit (ca. 0,5 msec) des gesamten Entladungsquerschnittes zu ermöglichen, wurden die von einer Sprengladung angetriebenen "Sliding Doors" entwickelt. Die Sliding Doors wurden später vom KfK/INR übernommen und weiterbetrieben. Hauptzweck der Versuche war die experimentelle Beschreibung des Expansionsvorganges zur Verifikation von Sicherheitscodes. Das in diesem Zusammenhang für Stickstoffquellen ermittelte Entrainment in die Blase betrug typischerweise etwa 40% für die frühe Entwicklung und etwa 20% für die spätere Ent-

wicklung. Diese Werte wurden für eine Vielzahl von Experimenten gemessen /9.7, 9.8/. Durch ein spezielles Verfahren wurde auch versucht, die Dicke der Entrainmentschicht zu messen. Dazu wurde das Wasser mit Hilfe von Salz leitfähig gemacht und eine "Zündkerze" (zwei Elektroden in geringem Abstand) in den Expansionsraum eingebaut. Die Dicke der Schicht betrug typischerweise 1 bis 2 cm.

### **Oarai, Japan**

Am Oarai Engineering Center wurden Argonblasen durch Wasser geleitet und das Blasenverhalten (Form, Geschwindigkeit) beim Aufsteigen untersucht. Die Blasen wurden durch Aufstechen eines gasgefüllten Ballons erzeugt. Natriumversuche sind geplant (Natriumdampfblasen in einem Natriumpool zur Verifikation des FTAC - Codes).

Unter der Bezeichnung VECTORS /9.9/ haben Experimente begonnen, bei denen eine Stickstoff- oder Heißwasserquelle über Berstscheiben in einen Wasserpool mit Einbauten entladen wird. Das Hauptziel der Experimente ist auch hier die Untersuchung der Hydro- und Thermodynamik des Expansionsvorganges.

## 10. ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION, AUSBLICK

Die Wasserversuche hatten orientierenden Charakter. Es sollten wichtige Phänomene erkannt und verstanden werden, die bei der Entladung eines Partikel-Gas-Gemisches in einen Flüssigkeitspool auftreten. Für Eisen- bzw. Nickelpartikeln  $\geq 1 \mu\text{m}$  kann man das Freisetzungsverhalten als Funktion des Entladungsdruckes unter den Randbedingungen der FAUST-Experimente näherungsweise in drei Bereiche einteilen:

- Bei sehr niedrigem Druck ( $< 0,06 \text{ MPa}$ ) bis herab zu Blubbersuchen werden luftgetragene Partikeln im Covergas nachgewiesen. Wasser wird nicht freigesetzt.
- In einem mittleren Druckbereich ( $0,1 \text{ MPa} < p < 1 \text{ MPa}$ ) werden keine Partikeln freigesetzt, und Wasser entweicht aus Leckagen nur in unbedeutenden Mengen.
- Bei höheren Druckwerten ( $p > 1 \text{ MPa}$ ), wie sie auch dem HCDA entsprechen, kommt es zur Wasserfreisetzung aus Leckagen, wobei die Menge überproportional mit dem Druck ansteigt. Eine Freisetzung von Metallpartikeln (luftgetragen oder bereits im Wasser abgeschieden) war jedoch in keinem Fall nachzuweisen (Rückhaltefaktoren größer als 10000). Das Wasser wurde also aus den Leckagen herausgedrückt, noch ehe es sich mit den Partikeln vermischen konnte. Hierbei ist jedoch einschränkend anzumerken, daß die Leckagen zum Zeitpunkt der Entladung bereits offen waren.

Impaktionsprozesse während der heftigen Oszillationen, vor allem bei der plötzlichen ersten Abbremsung der Aufwärtsbewegung des Wasserkolbens durch den gespannten Deckel, erwiesen sich als sehr effektiver Partikelabscheidemechanismus.

Bei der FAUST-Geometrie liegt die untere Grenze der so erfaßten Partikeln nach PAROGA-Rechnungen bei etwa  $1 \mu\text{m} / 2.14/$ . Im Reaktorfall wird sich dieser Wert, da die Prozesse langsamer ablaufen, nach etwas höheren Werten verschieben. Das Auswaschen der Partikeln infolge Kollision mit Entrainment-Tropfen als zweiter wichtiger Partikelabscheidemechanismus erfaßt nach vorläufigen Abschätzungen auch wesentlich kleinere Partikeln und dürfte im Reaktorfall der entscheidende Mechanismus sein, da bei energetischen Entladungen erhebliche Entrainmentraten zu erwarten sind. Das bei FAUST beobachtete Entrainment war deutlich höher als

der erwartete Wert aufgrund von Näherungsrechnungen, die das Corradini-Modell für Rayleigh-Taylor-Instabilitäten enthielten.

Das Übertragen der freigesetzten Wassermengen auf Reaktorbedingungen ist problematisch, da die Größe der Leckage und der Zeitpunkt des Entstehens nicht bekannt sind. Beim Experiment wurde nur der Fall untersucht, daß zum Zeitpunkt  $t = 0$  die Leckage bereits existiert. Die hieraus abgeleiteten Werte sind sehr konservativ, denn es hat sich gezeigt, daß schon ein geringer Widerstand in der Ausströmleitung (Filter) eine deutliche Reduktion der Wasserfreisetzung bewirkt.

Begleitende modelltheoretische Untersuchungen des Partikelabscheideverhaltens werden dadurch erschwert, daß trotz einer großen Zahl von Versuchen und der Variation zahlreicher Parameter die freigesetzte Partikelmenge in allen relevanten Fällen unterhalb der Nachweisgrenze lag, d.h. ein funktionaler Zusammenhang nicht gefunden werden konnte. Die Freisetzung bei extrem niedrigen Druckwerten wurde nur qualitativ untersucht, da der Versuchsstand hierfür nicht ausgelegt war und eine direkte Beziehung zum Brüterstörfall nicht besteht. Insbesondere war die Größe der Blasen bei den Blubbersuchen sehr uneinheitlich. Dadurch war ein direkter Vergleich mit Absorptionsrechnungen nach Fuchs nicht möglich. Für modelltheoretische Untersuchungen des Verhaltens von Blase, Poolflüssigkeit und Covergas hingegen haben die Versuche umfangreiche Erkenntnisse geliefert. Dabei ist vor allem die Periode der Oszillation eine Größe, die man gut mit Modellrechnungen, z.B. PAROGA, vergleichen kann.

Nach Abschluß der Wasserversuche ist es nun notwendig, den instantanen Quellterm durch Übergang auf realistischere Materialien und realistischere Randbedingungen weiter einzugrenzen. In der Phase FAUST-2 wird Natrium bei 500 °C als Poolflüssigkeit verwendet, und statt des Metallpulvers wird  $UO_2$ -Pulver sowie Spaltprodukt-Simulationsmaterial (Cs,  $I_2$ , SrO, NaI) entladen. Die Serie 2A in kleinem Maßstab (3 Liter Natrium) ist abgeschlossen /10.1/. Es haben sich, außer für elementares Jod, ebenfalls sehr hohe Rückhaltefaktoren ergeben. Die Serie 2B mit größerer Geometrie (300 Liter Natrium) hat 1986 begonnen.

Die Versuche der Phase 2 haben immer noch den Nachteil, daß sie unter isothermen Bedingungen stattfinden, denn Quellbehälter und Poolbehälter sind auf gleicher Temperatur. Ein weiterer wichtiger Schritt zur realistischeren Simulation des Störfallablaufs soll in der Phase 3 geschehen. Es ist vorgesehen, durch Kurzschlußentladung von Kondensatoren über eine  $UO_2$ -Probe die bislang nicht betrachteten Aspekte

- hoher Energieeintrag
- hohe Temperatur
- Verdampfung und Kondensation unter Natrium
- sehr kleine Teilchengrößen

zu untersuchen. Ähnliche Versuche hat man auch in Oak Ridge durchgeführt. (ORNL-FAST /9.2/).

Als allgemeine Tendenz kann festgehalten werden: Es treten bei Entladungen unter hohem Druck in einem Flüssigkeitspool sehr effektive Partikelabscheidemechanismen auf. Die Wahrscheinlichkeit, daß Partikeln luftgetragen in das Covergas befördert werden und von dort über Leckagen entweichen, ist entsprechend gering. Diese Aussage schließt auch die bisherigen Natriumversuche sowie die ORNL-Versuche ein. Nennenswerte Mengen an freigesetztem Material werden im Experiment nur für kondensierende Dämpfe (z.B. Cs) und für chemisch reagierende Gase (z.B.  $I_2$ ) erwartet.

Nach dem jetzigen Stand der experimentellen Information liegt die Feststellung nahe, daß der instantane Quellterm  $S_0$  relativ klein ist und die Annahmen in den Risikostudien (z.B. /1.4/ für den SNR 300) als konservativ angesehen werden können.

## DANKSAGUNG

Herrn Ing. Naschwitz (IT) danken wir für die Auslegung und Konstruktion der beiden Versuchsstände, Herrn Dr. R. Jonas für die Mitarbeit bei der modelltheoretischen Interpretation, Herrn S. Zissimides und Herrn U. Bantle für die Filmauswertung sowie Frau A. Edinger und Herrn R. Broßardt für die Mitarbeit bei der Versuchsdurchführung.

## LITERATUR

- /1.1/ A.E. Waltar, A.B. Reynolds  
Fast Breeder Reactors  
Pergamon Press, New York, 1981
- /1.2/ M. Schikorr, E. Rumble  
Unveröffentlichte Ergebnisse (1983)
- /1.3/ W. Schikarski, W. Schütz  
Nuclear Aerosols and LMFBR Source Term Analysis,  
Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting,  
Lyon/France, July 1982, p. III - 347
- /1.4/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit,  
Risikoorientierte Analyse zum SNR-300,  
Bericht GRS-A-700, April 1982
- /2.1/ P. Royl et al.,  
Untersuchungen zu Kühlmitteldurchsatzstörfällen im abgebrannten Mark  
1 A-Kern des Kernkraftwerks Kalkar,  
KfK 2845 (Dezember 1979)
- /2.2/ H. Jordan, W. Schikarski, H. Wild  
Nukleare Aerosole im geschlossenen System  
KfK 1989 (Okt. 1974)
- /2.3/ A.L. Wright, T.S. Kress, A.M. Smith  
ORNL Experiments to Characterize Fuel Release from the Reactor Primary  
Containment in Severe LMFBR Accidents  
ORNL/NUREG/TM-404 (Oct. 1980)
- /2.4/ M. Pilch, C.A. Erdman, A.B. Reynolds  
Acceleration Induced Fragmentation of Liquid Drops  
NUREG/CR-2247 (Aug. 1981)

- /2.5/ S. Kondo, Y. Togo, R. Nakai  
A Phenomenological Study on Fragmentation Process in Fuel Coolant Interaction  
Proc. of the Int. Meeting on Fast Reactor Safety Technology, Vol III,  
Seattle 1979, p. 1539
- /2.6/ R. M. Davies and G. I. Taylor  
The Mechanics of Large Bubbles Rising through Extended Liquids and  
through Liquids in Tubes  
Proc. of the Royal Society of London A200, 375 (1960)
- /2.7/ N.A. Fuchs  
The Mechanics of Aerosols  
Pergamon Press, New York 1964
- /2.8/ J. P. Preton, A. Lapicoré, A. Porrachia, M. Natta, M. Amblard,  
G. Berthoud  
Expansion of a Vapor Bubble and Aerosols Transfer  
Proc. of the Int. Meeting on Fast Reactor Safety Technology, Vol. III,  
Seattle 1979, p. 1445
- /2.9/ G.I. Taylor  
The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction  
Perpendicular to Their Planes I,  
Proc. Roy. Soc. (London) A, 201, (1950), p. 192
- /2.10/ M.L. Corradini  
Heat Transfer and Fluid Flow Aspects of Fuel-Coolant Interactions  
MIT Nucl. Eng. Dept., COO-2781-12TR (Sept. 1978)
- /2.11/ Chawla, T.C.  
Liquid Entrainment Rate and Droplet Size Relative to Potential  
Fuel-Failure Propagation Due to Fission Gas Jet  
Impingement in LMFBR Subassemblies,  
ANL-7949 (June 1972)

- /2.12/ F.P. Ricou, D.B. Spalding  
Measurement of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets  
Journal of Fluid Mechanics 11, p. 21 (1961)
- /2.13/ T.G. Theofanous, M. Saito  
The Termination Phase of Core Disruptive Accidents in LMFBRs  
Purdue University, Report PNE-79-146, Dec. 1979
- /2.14/ R. Jonas, W. Schütz  
wird veröffentlicht als KfK-Bericht
- /2.15/ H. Kürten, J. Raasch, H. Rumpf  
Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfall  
konstanter Geschwindigkeit  
Chem. Ing. Techn. 38, 941 (1966)
- /3.1/ W. Haenscheid, W. Schütz  
Unveröffentlichte Ergebnisse (1984)
- /3.2/ W. Schütz, W. Haenscheid, J. Minges  
Unveröffentlichte Ergebnisse (1985)
- /6.1/ J. Minges, W. Schütz, S. Zissimides  
Unveröffentlichte Ergebnisse (1987)
- /8.1/ P. Royl  
PBDOWN - A Computer Code for Simulating Core Material Discharge and  
Thermal to Mechanical Energy Conversion in LMFBR Hypothetical Accidents  
Transactions of the 6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor  
Technology, Paris 1981, Vol. E  
Luxembourg: Commission of the European Communities 1981, S. E 3/8, 1-8.
- /9.1/ A.B. Reynolds and T.S. Kress  
Aerosol Source Considerations for LMFBR Core Disruptive Accidents  
ORNL/NUREG/TM-404 (Oct. 1980)

- /9.2/ J. C. Petrykowski, A.W. Longest, A.L. Wright  
LMFBR Source Term Experiments in the Fuel Aerosol Simulant Test  
(FAST) Facility  
Fast Reactor Safety: Proc. of the int. topical meeting, Vol. 2,  
Oak Ridge National Laboratory, TN (USA), July 1985, p. 865 - 875
- /9.3/ A. Lopicoré  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /9.4/ M. Amblard, G. Berthoud, J. P. Breton, F. David, C. Delli, M. Natta  
Source Term Studies Relative to HCDA in France  
Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon/France, July 1982,  
p. IV-35
- /9.5/ M. Amblard et al.,  
The EXCOBULLE Experiments on the Expansion of Large Two-Phase Bubbles  
Nucl. Eng. and Design 61 (1980), p. 459 - 468
- /9.6/ A.B. Reynolds and G. Berthoud  
Analysis of EXCOBULLE Two-Phase Expansion Tests  
Nucl. Eng. and Design 67, (1981), p. 83 - 100
- /9.7/ R. J. Tobin and D.J. Cagliostro  
Energetics of Simulated HCDA Bubble Expansions: Some Potential  
Attenuation Mechanisms.  
Nucl. Eng. and Design 58 (1980), p. 85 - 95
- /9.8/ R.J. Tobin  
Scale Model Experiments on Simulation of Core Disruptive  
Accident Expansion Phase Phenomena in SNR-type Reactors  
Stanford Research Institute, Final Report of SRI Project PYC 2392,  
October 1981
- /9.9/ M. Saito  
Private Mitteilung

/10.1/ J. Minges, W. Schütz, W. Seither

Investigations on Bubble Behaviour and Aerosol Retention in Case  
of an LMFBR Core Disruptive Accident - The KfK FAUST Tests  
Science and Technology of Fast Reactor Safety, BNES, London 1986,  
Vol. 1, p. 147  
(Proceedings of the Guernsey Conference 1986)

## VERZEICHNIS DER TABELLEN

- Tab. 1 FAUST - 1A - Versuche  
Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsparameter
- Tab. 2 FAUST - 1A - Versuche  
Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse
- Tab. 3 FAUST - 1B - Versuche  
Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsparameter
- Tab. 4 FAUST - 1B - Versuche  
Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse
- Tab. 5 Berechnete Absorption von Eisenpartikeln in einer stabilen, kugelförmigen, aufsteigenden Blase (vereinfachtes Modell nach Fuchs).

Lfd. Nr.	Über- druck nom. (MPa)	Exp. Nr.	Über- druck genau (MPa)	BS (MPa)	Pool- höhe (cm)	Partikeln		Ø (µm)
						Art	m (g)	
1	0,3	12	0,30	0,5	30	Fe	34,6	44
2	0,4	28	0,38	0,5	0	Fe	30,0	44
3		23	0,40	"	15	Ni	29,9	1
4		21	0,41	"	60	Ni	31,3	1
5		22	0,39	"	90	Ni	30,0	100
6	1,0	20	1,00	1,5	15	Ni	30,0	1
7		19	0,98	"	30	Ni	30,1	1
8		25	1,00	"	30	Ni	20,0	100
9		30	1,00	"	60	--	--	--
10		31	1,00	"	60	--	--	--
11		6	0,98	"	60	Fe	10,0	44
12		29	1,00	"	60	Fe	30,0	44
13		18	0,98	"	90	Ni	31,3	1
14		24	1,00	"	90	Ni	20,0	100
15	1,0	7	1,07	2,0	60	Fe	10,0	44
16		17	1,00	"	90	Ni	30,0	100
17	1,5	9	1,50	2,0	30	Fe	25,2	44
18		8	1,47	"	60	Fe	10,0	44
19		15	1,50	"	60	Ni	28,3	1
20		16	1,50	"	60	Ni	36,0	100
21	2,0	26	2,00	2,5	30	Ni	20,0	100
22		27	1,99	"	60	Ni	30,0	1

Tab. 1 : FAUST - 1A - Versuche

Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsparameter.  
Erläuterungen siehe Seite 54

Lfd. Nr.	Periode (msec)	Überdruck- spitze Covergas (MPa)	magnetisch eingefangene Partikelmenge (mg)	Rückhalte- faktoren		Bemer- kungen
				$RF_W$	$RF_L$	
1	60	0,02	<1	$> 3 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^4$	
2	--	--	7198	--	(4,16)	1)
3	(80)	--	1643	18	$> 3 \cdot 10^4$	2)
4	--	--	<1	$> 3 \cdot 10^4$	"	3)
5	59	0,16	<1	$> 3 \cdot 10^4$	"	
6	(50)	0,06	1435	21	$> 3 \cdot 10^4$	2)
7	57	0,08	<1	$> 3 \cdot 10^4$	"	
8	66	0,11	5	$4 \cdot 10^3$	"	
9	80	0,19	--	--	--	4)
10	75	0,20	--	--	--	5)
11	82	0,16	<1	$> 3 \cdot 10^4$	$> 10^4$	
12	81	0,19	<1	$> 3 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^4$	
13	42	0,57	<1	$> 3 \cdot 10^4$	"	
14	44	0,63	3,4	$5,9 \cdot 10^3$	"	
15	81	--	<1	$> 3 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^4$	6)
16	42	0,63	85	$0,4 \cdot 10^3$	"	
17	69	0,17	20	$1,24 \cdot 10^3$	$> 3 \cdot 10^4$	
18	--	--	<1	$> 10^4$	$> 10^4$	3)
19	77	0,32	<1	$> 3 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^4$	
20	76	0,33	<1	$> 3 \cdot 10^4$	"	
21	(60)	0,36	35	$0,6 \cdot 10^3$	$> 2 \cdot 10^4$	2)
22	74	0,60	<1	$> 3 \cdot 10^4$	$> 3 \cdot 10^4$	

Tab. 2 : FAUST - 1A - Versuche

Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse.

Erläuterungen siehe Seite 54

Erläuterungen zu Tab. 1 und 2

- BS = Berstscheibe mit Ansprechdruck ( $\pm 10\%$ )  
RF = Rückhaltefaktor, definiert als der Quotient aus entladener Partikel-  
masse und der Masse, die magnetisch am Deckel eingefangen wurde.  
RF<sub>W</sub>: Partikeln waren bereits im Wasser.  
RF<sub>L</sub>: Partikeln waren luftgetragen  
Periode = zeitlicher Abstand zwischen dem Nullpunkt der Entladung und der  
ersten Druckspitze in der Blase, gemessen mit Druckaufnehmer 2,  
siehe Abb. 4.

Bemerkungen:

- 1) Nullversuch ohne Wasser
- 2) Periode kann nur näherungsweise angegeben werden, da keine volle  
Schwingung auftrat
- 3) Keine Drucksignale gemessen wegen fehlendem Triggerimpuls
- 4) Versuch ohne Partikeln
- 5) Wie 4), jedoch ohne Argon statt Stickstoff bzw. Luft im Druckzylinder  
bzw. Covergas. Untersuchung des adiabatischen Schwingungsverhaltens
- 6) Vorzeitiges Ansprechen der Berstscheibe

Nicht in der Tabelle aufgeführt sind die Versuche mit der  
Experiment - Nummer 1 bis 5 (Berstscheibentests) sowie  
10, 13, 14 (Ausfall wichtiger Teile der Meßtechnik).

Lfd. Nr.	Überdruck nom. (MPa)	Exp. Nr.	Überdruck genau (MPa)	BS (MPa)	Poolhöhe (cm)	Leck	Art	Partikeln m (g)	Ø (µm)
1	0,002	126/4	0,002	/	20	3	Ni	10	5
2	0,005	126/1-3	0,005	/	50	3	Ni	10	5
3	0,06	123	0,06	1)	0	0	Fe	10	2-5
4		125	0,06	1)	40	0	Fe	10	2-5
5		124	0,06	1)	40	0	Fe	10	2-5
6	0,1	121	0,10	2)	0	0	Ni	10	1
7		122	0,13	2)	40	0	Ni	10	1
8	0,3	115	0,33	0,5	40	2	Fe	30	1
9	0,4	106	0,40	0,5	40	0	Fe	30	44
10	0,6	105	0,60	0,5	40	0	Fe	30	44
11		131	0,63	1,5	40	5	/	/	/
12	1,0	104	1,00	1,5	20	0	Ni	30	1
13		101	0,95	1,5	40	0	/	/	/
14		113	1,01	1,5	40	0	/	/	/
15		114	1,00	1,5	40	0	Fe	34	44
16		109	1,01	1,5	40	1	Fe	31	44
17		107	1,01	1,5	50	0	Fe	30	44
18		116	1,03	1,5	50	2	Fe	30	1
19	1,5	108	1,51	2,0	10	0	Ni	31	1
20		110	1,51	2,0	40	1	Fe	30	44
21		130	1,52	1,5	40	4	/	/	/
22		132	1,52	1,5	40	5	/	/	/
23	2,0	102	1,99	2,5	40	0	Fe	32	44
24		103	1,98	2,5	40	0	Ni	30	1
25		111	1,99	2,5	40	0	Ni	30	1
26		112	2,00	2,5	40	0	Ni	30	1
27		120	1,95	2,0	40	2	Ni	30	100
28	3,0	117	2,95	3,8	40	2	Fe	30	1
29		118	3,01	3,8	40	2	Fe	30	1
30		119	2,94	3,8	50	2	Ne	30	100
31	4,0	127	3,92	5,0	40	2	Fe	30	44
32		128	3,92	5,0	40	4	Fe	30	44
33		129	3,99	5,0	40	4	Fe	30	44

Tab. 3 : FAUST - 1B - Versuche  
Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsparameter  
 Erläuterungen siehe Seite 57

Lfd. Nr.	Periode (msec)	Überdruck spitze Cover (MPa)	Partikeln frei (mg)	RF <sub>L</sub>	RF <sub>W</sub>	Wasser frei (ml)	Sprunghöhe (cm)	Bemerkungen
1	/		25	400		0		3)
2	/		<1	>10 <sup>4</sup>		0		3)
3	/		(4270)	/		/		1) 4)
4	/		37	645		/		1)
5	/		16	270		/		1)
6	/		(2046)	/		/		2) 4)
7	/		<1	>10 <sup>4</sup>		/		2)
8	36	0,01	<1	>3·10 <sup>4</sup>		0		5)
9	41		<1	>3·10 <sup>4</sup>		/		
10	/		<1	>3·10 <sup>4</sup>		/		6)
11	48	0,03	/	/		0	1,5	7)
12	37	0,03	(1515)	*	20	/		
13	46	0,05	/	/		/		7)
14	49	0,06	/	/		/		7)
15	50	0,06	<1	>3·10 <sup>4</sup>		/		
16	52	0,04	<1	"		5		
17	41	0,10	<1	"		/		
18	48	0,08	<1	"		1		
19	/	0,025	(3610)	*	9	/		
20	56	0,06	<1	>3·10 <sup>4</sup>		5		
21	50	0,09	/	/		137	4,9	7)
22	50	0,08	/	/		95	4,6	7)
23	48	0,13	<1	>3·10 <sup>4</sup>		/	4,6	7)
24	47	0,13	<1	"		/		
25	47	0,13	<1	"		/		
26	47	0,13	<1	"		/		
27	50	0,13	<1	"		18		8)
28	46	0,20	<1	>3·10 <sup>4</sup>		ca. 100		9)
29	46	0,20	<1	"		86		
30	37	0,40	<1	"		375		
31	45	0,32	<1	>3·10 <sup>4</sup>		295		
32	46	0,27	<1	"		ca. 1600	11,9	9)
33	46	0,28	<1	"		1640	11,9	

Tab. 4 : FAUST - 1B - Versuche.

Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse.  
Erläuterungen siehe Seite 57

Erläuterungen zu Tab. 3 und Tab. 4

BS: Ansprechdruck der Berstscheibe

Leck-Status: (genauer siehe Kap. 3.5):

- 0 Beide Deckelöffnungen geschlossen
- 1 Beide Öffnungen auf, mit Plastiksäcken
- 2 Eine Öffnung auf, mit Filter und Auffangbehälter
- 3 Blubberversuche, eine Öffnung auf, mit Filter, Durchflußmesser, Pumpe
- 4 Eine Öffnung auf, Auffangkanne, kein Filter
- 5 Zwei Öffnungen auf, jeweils eine Auffangkanne, kein Filter

RF: Rückhaltefaktor, Verhältnis aus eingewogener und freigesetzter Partikelmenge.

RF<sub>L</sub>: Freigesetzte Partikeln waren luftgetragen

RF<sub>W</sub>: Partikeln wurden von den Magneten aus dem Wasser "herausgefischt".

Sprunghöhe: Es sind nur die Werte aufgeführt, die mit dem Teleskopstab direkt gemessen wurden (ab Exp. Nr. 129).

Bemerkungen:

- 1) 40 µm-Aluminiumfolie als Berstscheibe
- 2) PVC-Folie als Berstscheibe
- 3) Blubberversuch ohne Berstscheibe, Gasdurchsatz 100 Liter/Minute, nur zur Orientierung
- 4) Trockenversuch, kein Poolwasser
- 5) Berstscheibe undicht, per Überdruck aus N<sub>2</sub>-Flasche geöffnet
- 6) Wegen Störung keine Drucksignale gemessen
- 7) Versuch ohne Partikeln
- 8) Druck im Quellbehälter so lange hochgedreht, bis Berstscheibe anspricht
- 9) Schlauchleitung zum Auffangbehälter wurde undicht. Daher nur ungefähre Angabe der Wasserfreisetzung.

Partikel- radius ( $\mu\text{m}$ )	Blasen- radius (cm)	Absorptionskoeffizienten			absorbierter Anteil ( $\text{m}^{-1}$ )	Bemerkungen
		( $\text{m}^{-1}$ )	( $\text{m}^{-1}$ )	( $\text{m}^{-1}$ )		
0,1	0,5	0,037	0,0066	0,1195	0,151	1 cm - Blase
1		3,747	0,6598	0,038	0,988	
10		374,7	65,98	0,012	1,000	
0,1	2,5	0,034	0,0006	0,0071	0,011	Radium
1		0,3351	0,059	0,0023	0,327	Berst- scheibe
10		33,51	5,901	0,0007	1,000	
0,1	15	0,0002	0,00004	0,0003	0,0006	ca.
1		0,023	0,0040	0,00002	0,027	Tankradius
10		2,28	0,402	0,00003	0,932	FAUST 1A
0,1	30	0,00008	0,00001	0,00009	0,0002	ca.
1		0,0081	0,0014	0,00003	0,0095	Tankradius
10		0,806	0,142	0,00001	0,613	FAUST 1B

Tab. 5 : Berechnete Absorption von Eisenpartikeln in einer stabilen kugelförmigen, aufsteigenden Blase (vereinfachtes Modell nach Fuchs) mit den in Kap. 2.3 erläuterten Absorptionskoeffizienten  $\alpha_i$ ,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_d$ . Der absorbierte Anteil wurde mit Hilfe der Gleichung

$$dc/dx = - (\alpha_i + \alpha_s + \alpha_d) c$$

mit  $c$  = Konzentration und  $x$  = Blasenaufstiegsweg für 1 m Weglänge berechnet.

## VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- Abb. 1            Aufsteigende Gasblase
- Abb. 2            Stark vereinfachte Geometrien:  
Ebene Expansion und radiale Expansion
- Abb. 3            Reaktor-ähnliche Geometrie:  
Grundlage der FAUST-Versuche und des Rechenprogramms PAROGA
- Abb. 4            Versuchsstand FAUST-1A
- Abb. 5            Versuchsstand FAUST-1A (Foto)
- Abb. 6            Versuchsstand FAUST-1B
- Abb. 7            Versuchsstand FAUST-1B (Foto)
- Abb. 8            Der optische Aufbau
- Abb. 9            Die verschiedenen Methoden zum Nachweis von Partikeln im  
Covergas sowie der Partikel- und Wassermengen, die aus Deckel-  
leckagen entweichen
- Abb. 10 a-d       Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen vom 1A-Experiment Nr. 29
- Abb. 11 a-e       Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen vom 1B-Experiment Nr. 103
- Abb. 12 a-d       Expansionscharakteristik 1A
- Abb. 13 a-d       Expansionscharakteristik 1B
- Abb. 14            Gemessene Drucksignale 1A
- Abb. 15            Oszillationen des Wasserkolbens mit Entrainment
- Abb. 16            Freigesetzte Wassermengen
- Abb. 17            Gemessene Drucksignale 1B
- Abb. 18            Gemessene maximale Überdruckspitzen
- Abb. 19            Periode der Oszillationen
- Abb. 20            Blasen- und Covergasvolumina bei Experiment 103
- Abb. 21            Entrainment und Wasserkonzentration Blase/Covergas bei  
Experiment 103
- Abb. 22            Gesamt-Entrainment
- Abb. 23            PAROGA-Rechnung zum Blasen- und Partikelverhalten für die  
beiden Expansionstypen in Abb. 2
- Abb. 24            PAROGA-Rechnung für die Geometrie der 1A-Versuche
- Abb. 25            Näherungsrechnung zum Entrainment in Blase und Covergas

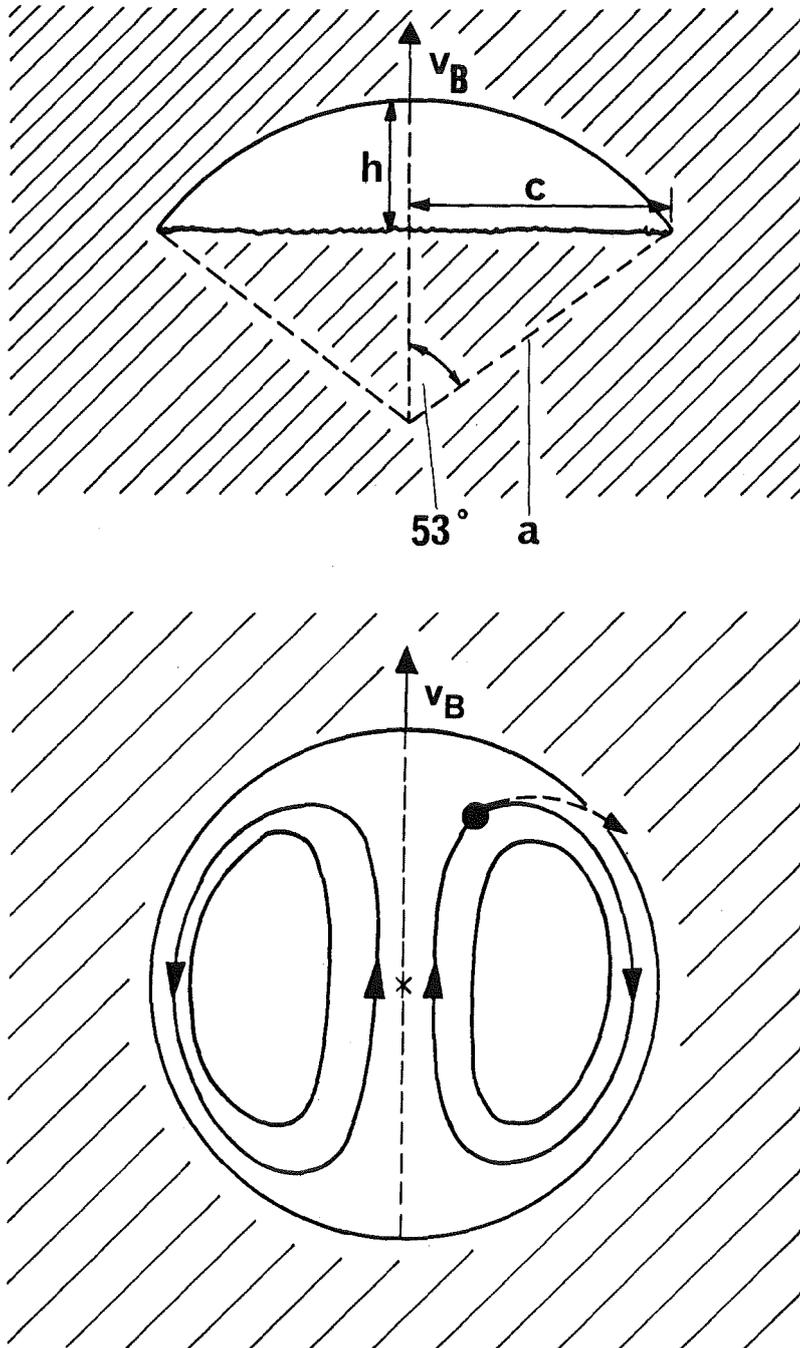


Abb. 1 Aufsteigende Gasblase

Oben: Kugelkappenform nach Davies und Taylor, charakterisiert durch die Parameter  $h$  und  $c$  bzw.  $a$  und  $\theta (= 53^\circ)$ .

Unten: Vereinfachte Annahme einer kugelförmigen Blase. Die interne Gaszirkulation führt zur Partikelabscheidung (Theorie nach Fuchs, siehe Kap. 2.3)

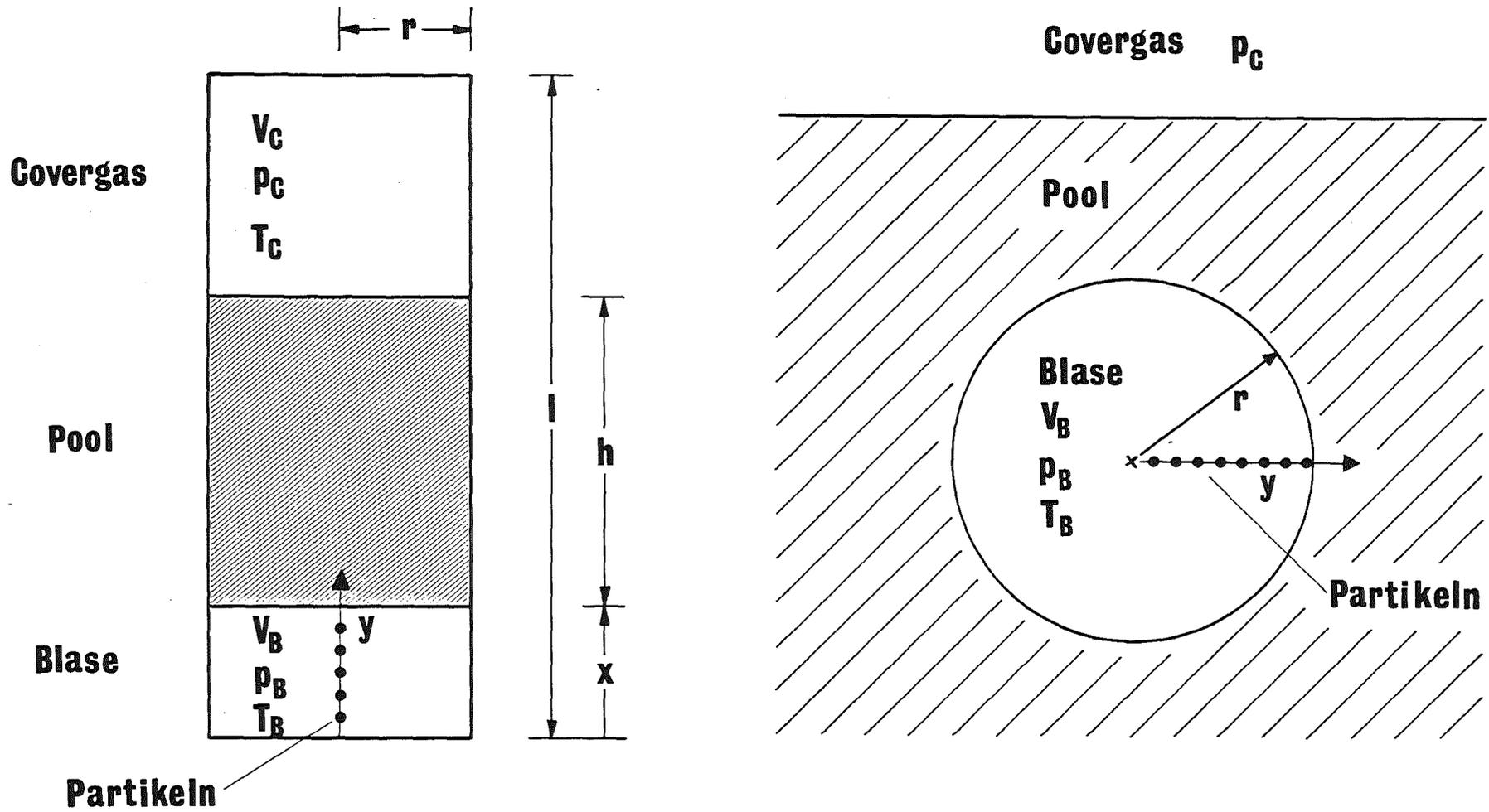


Abb. 2 : Stark vereinfachte Geometrien zur Berechnung der Blasenexpansion und der Abscheidung eingeschlossener Partikeln: Links die ebene Expansion (Kap. 2.4.1), rechts die radiale Expansion (Kap. 2.4.2).

$V, p, T$  = Volumen, Druck, Temperatur

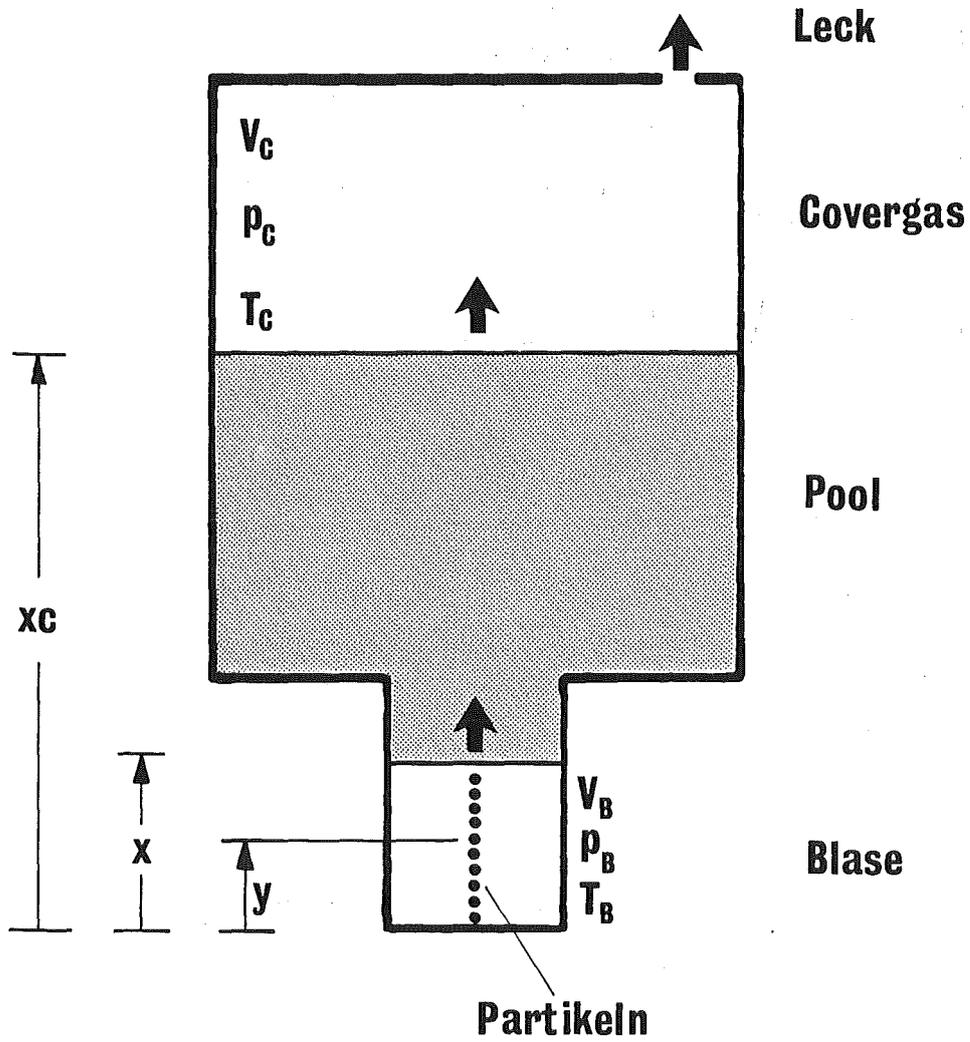


Abb. 3 : Reaktor-ähnliche Geometrie.  
Grundlage der FAUST-Versuche  
und des Rechenprogramms PAROGA

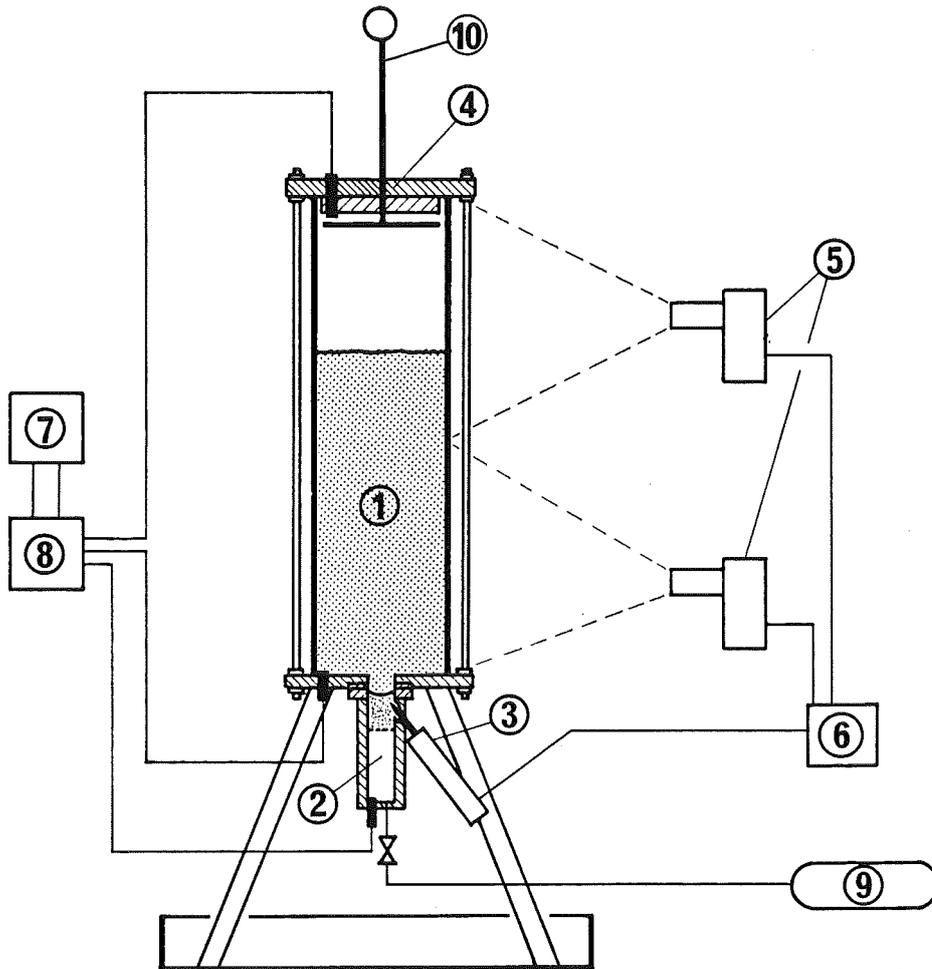


Abb. 4 Versuchsstand FAUST-1A

- 1 Plexiglasrohr, Innendurchmesser 28,8 cm Höhe 1 m
- 2 Quellbehälter mit Berstscheibe, 1450 cm<sup>3</sup>, max. 10 MPa, mit Einsatz zur Entladung von Metallpartikeln
- 3 Metallstift zum Anstoßen der Berstscheibe, pneumatisch
- 4 Deckel, bestückt mit Dauermagneten
- 5 Hochgeschwindigkeits-Filmkamas
- 6 Zeitgeber, 0,5 sec Vorlauf für Kamas
- 7 Druckaufnehmer, angeschlossen an Transientenrecorder und Rechner mit Multiprogrammer
- 8 Statische Druckmessung
- 9 Druckgasversorgung für Quellbehälter (meist N<sub>2</sub>)
- 10 Vertikal beweglicher und drehbarer Magnetstern

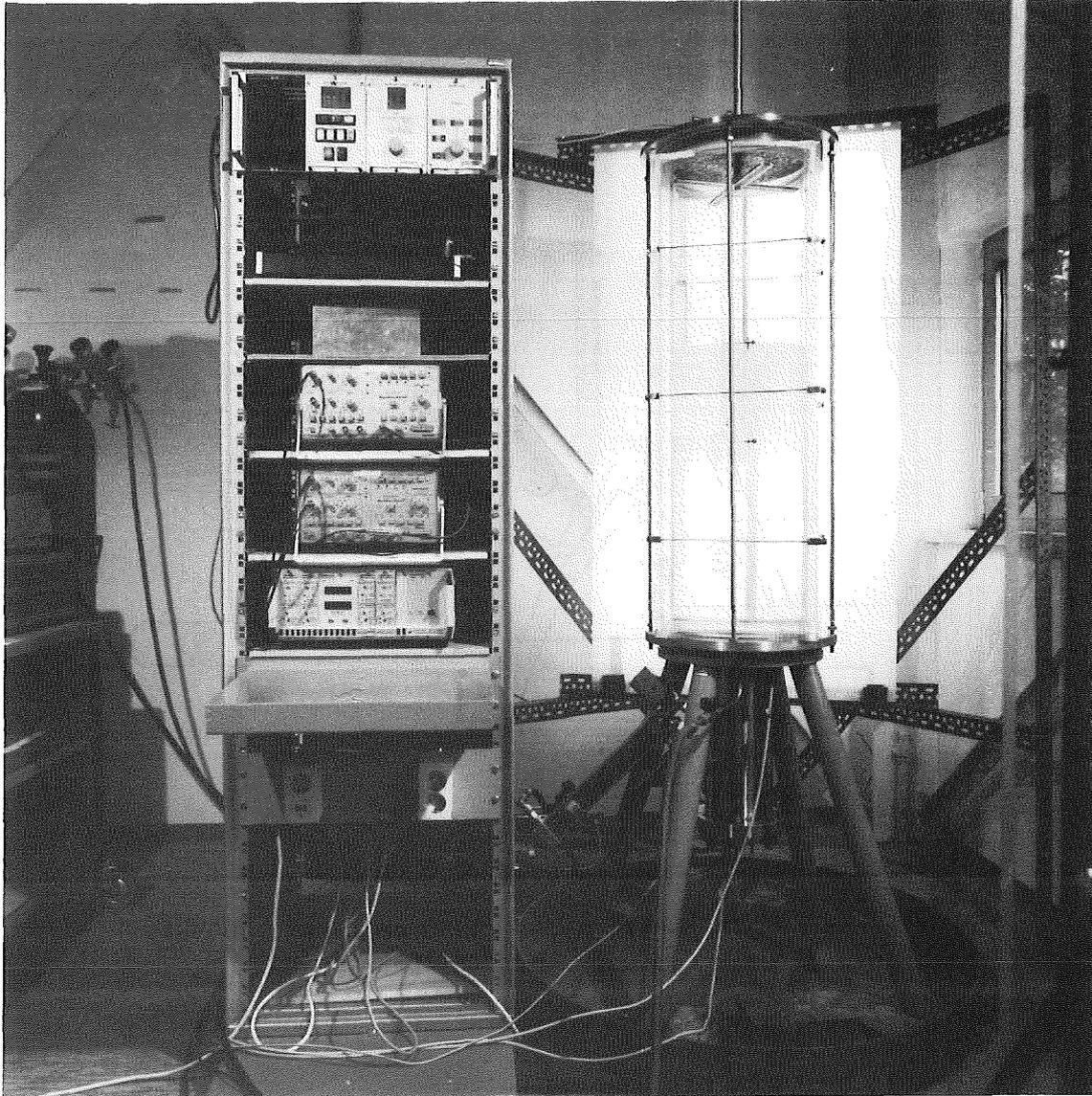


Abb. 5 : Versuchsstand FAUST - 1A

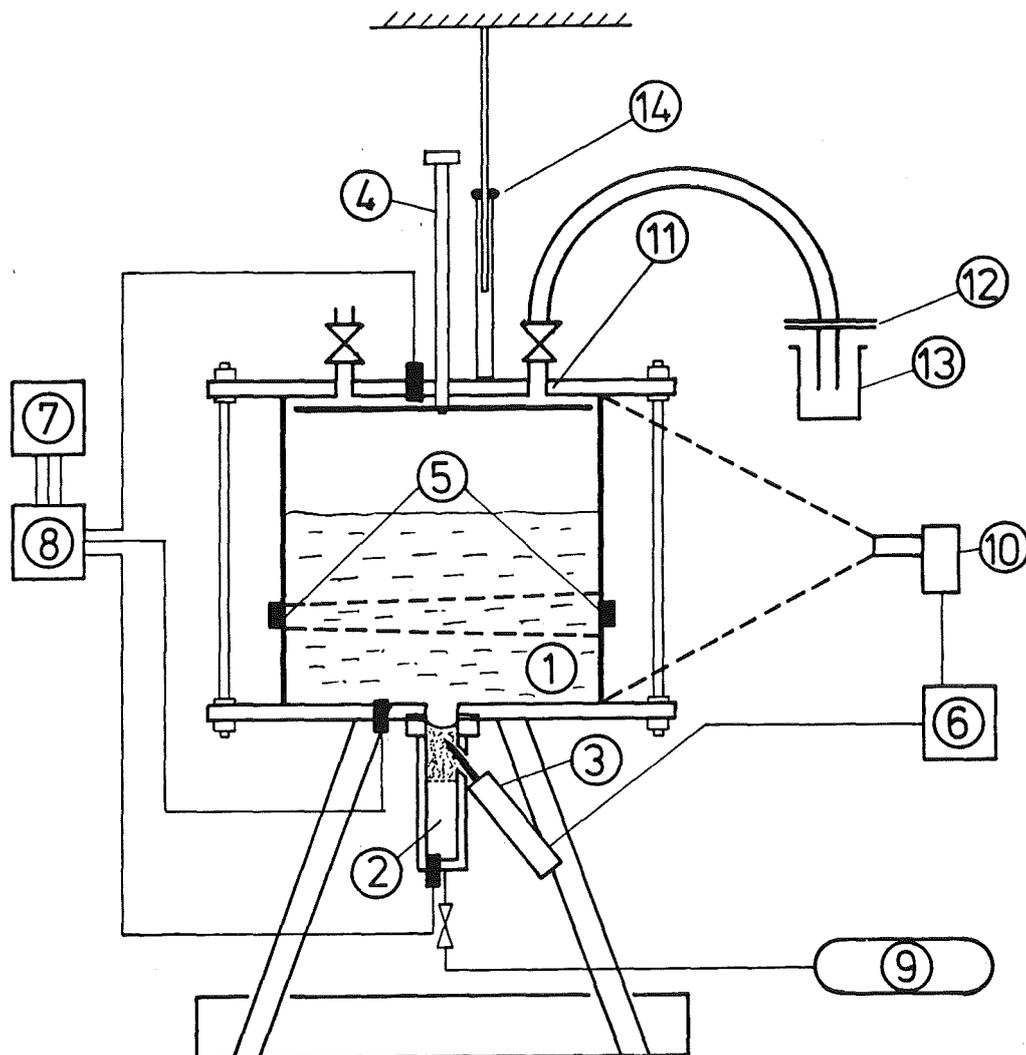


Abb. 6 Der Versuchsstand FAUST-1B

- 1 Plexiglaszylinder, Innendurchmesser 63 cm, Höhe 60 cm
- 2 Quellbehälter mit Berstscheibe, 1450 cm<sup>3</sup>, max. 10 MPa, mit Einsatz zur Entladung von Metallpartikeln
- 3 Metallstift zum Anstoßen der Berstscheibe, pneumatisch
- 4 Vertikal beweglicher und drehbarer Magnetstern
- 5 Ultraschallsender und -empfänger
- 6 Zeitgeber, 0,5 sec Vorlauf für Kamera
- 7,8 Druckaufnehmer, angeschlossen an Transientenrecorder und Rechner mit Multiprogrammer
- 9 Druckgasversorgung für Quellbehälter (meist N<sub>2</sub>)
- 10 Hochgeschwindigkeits-Filmkamera
- 11 Deckel mit 2 Öffnungen Ø 4 cm, wahlweise offen oder zu
- 12 Filter
- 13 Auffanggefäß für Wasser
- 14 Teleskopstab zur Messung der Sprunghöhe

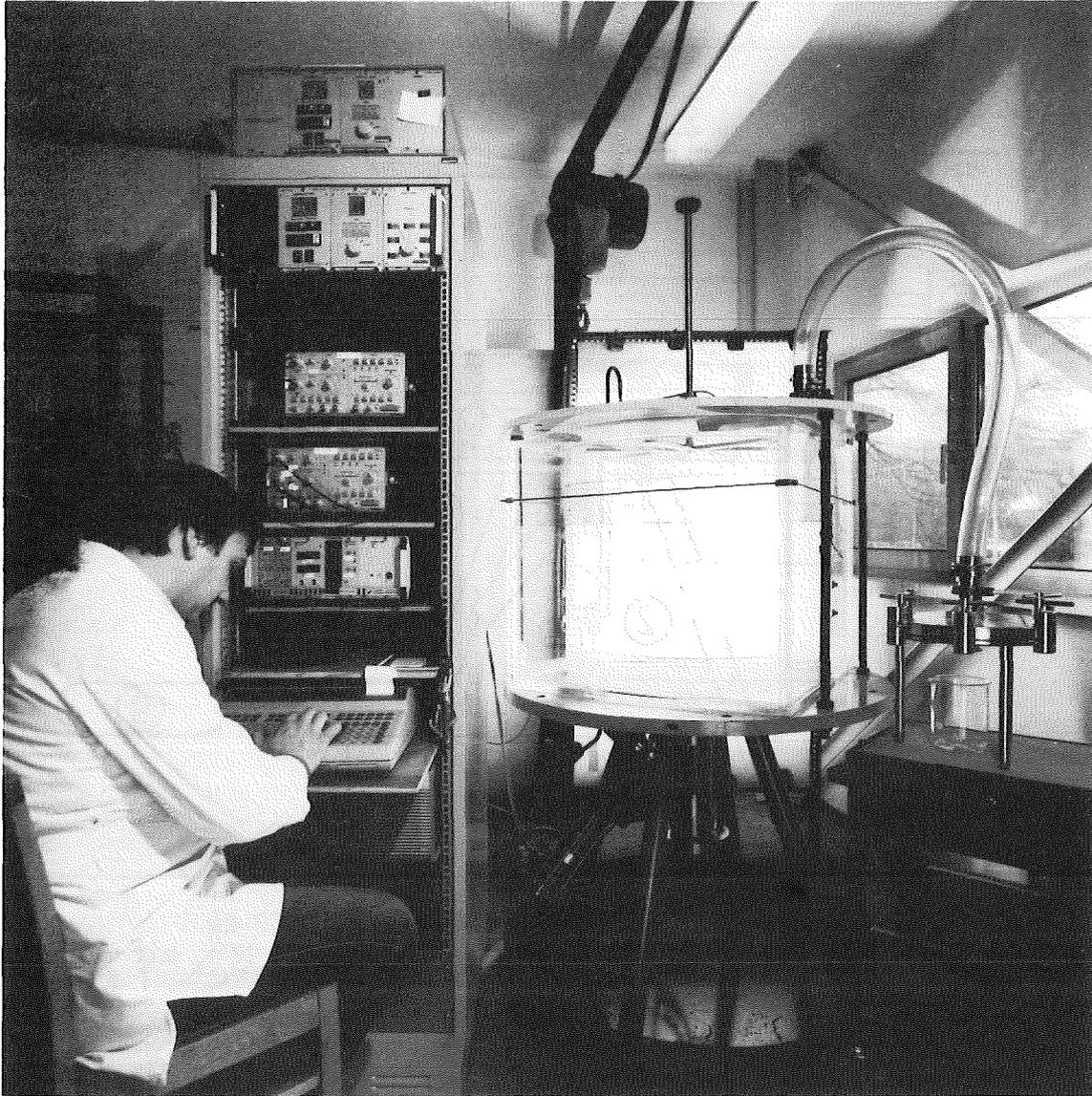


Abb. 7    Versuchsstand FAUST - 1B

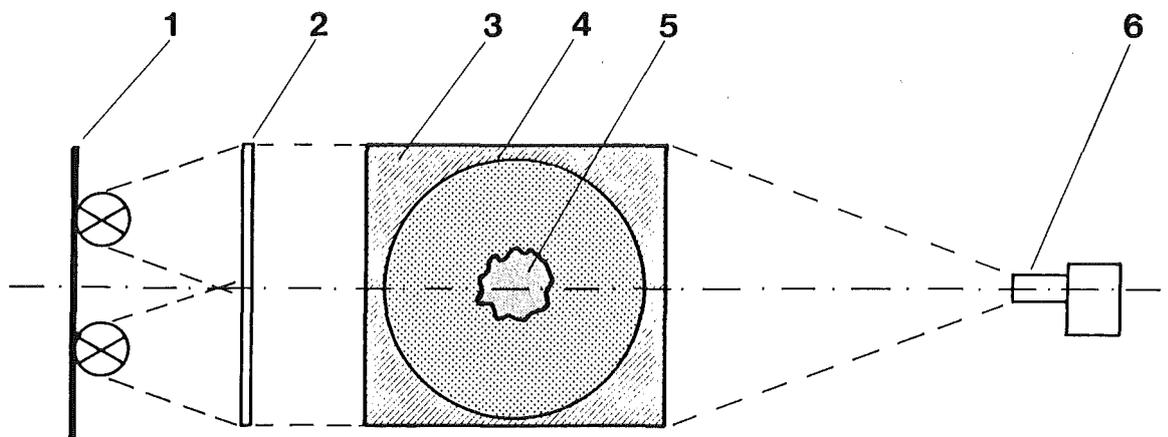


Abb. 8      Der optische Aufbau

- 1 Gerüst mit 4 Halogenlampen á 2000 Watt
- 2 Mattglasscheibe
- 3 Quaderförmiger Behälter aus Plexiglas. Er umgibt den zylindrischen Versuchsbehälter. Der Zwischenraum ist mit Wasser gefüllt. Mit dieser Methode wird die optische Verzerrung der Ereignisse im Versuchsbehälter korrigiert.
- 4 Versuchsbehälter aus Plexiglas, zylindrisch, Innendurchmesser 28,8 cm bei 1A und 63 cm bei 1B
- 5 Blasenexpansion
- 6 Hochgeschwindigkeits-Filmkamera (HYCAM, 2000 Bilder/Sekunde). Entfernung Behältermitte-Kamera ca. 1,5 Meter.

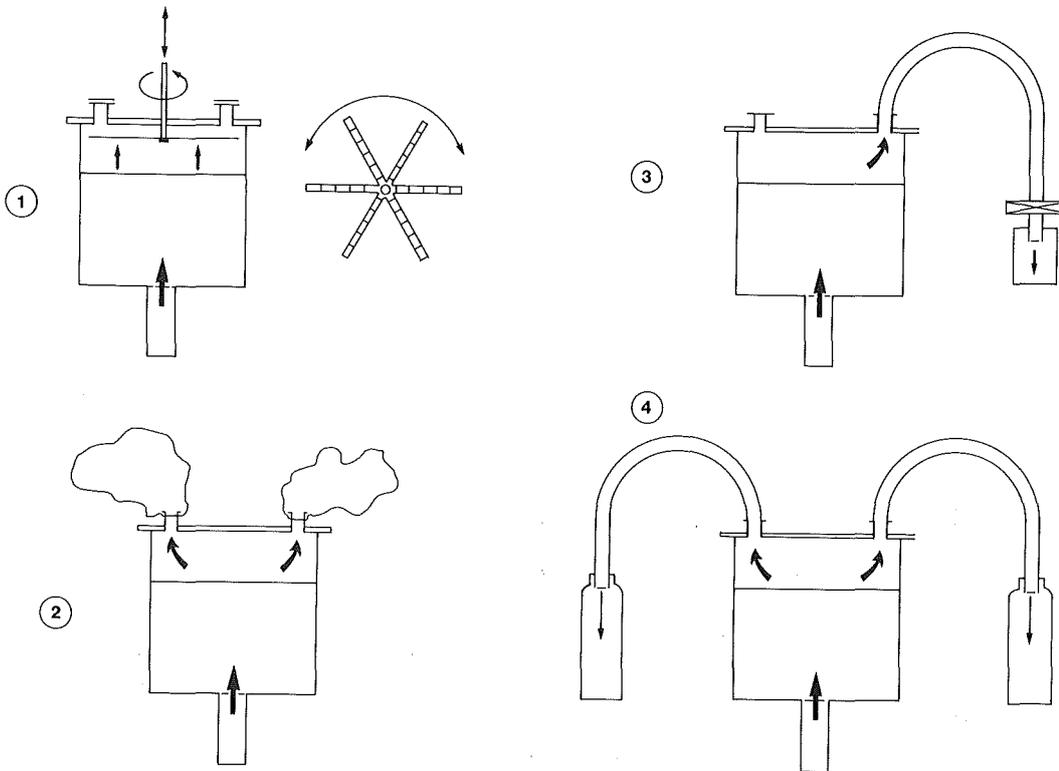


Abb. 9 : Die verschiedenen Methoden zum Nachweis von Partikeln im Covergas sowie der Partikel- und Wassermengen, die aus Deckelleckagen entweichen.

- 1) Magnetstern im Covergas
- 2) Plastiksäcke an den Deckelstützen
- 3) Schlauchleitung, Filter, Auffangbehälter
- 4) Schlauchleitung, Auffangkannen  
(einfach oder doppelt)

Nähere Beschreibung siehe Kap. 3.5

Abb. 10

Auf den folgenden vier Seiten (Abb. 10a - 10d) werden insgesamt zwölf Aufnahmen aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm (2000 Bilder/sec) zum 1A - Experiment Nr. 29 gezeigt: Entladung von 30 g Fe-Partikeln  $< 44 \mu\text{m}$  mit 1 MPa in einem 60 cm hohen Wasserpool. Die Aufnahmen zeigen charakteristische Phasen des Entladungsvorganges, der Oszillationen und des Blasenanstiegs über einen Gesamtzeitraum von 3 Sekunden.



Bild 1                    0 sec  
Zustand vor der Entladung

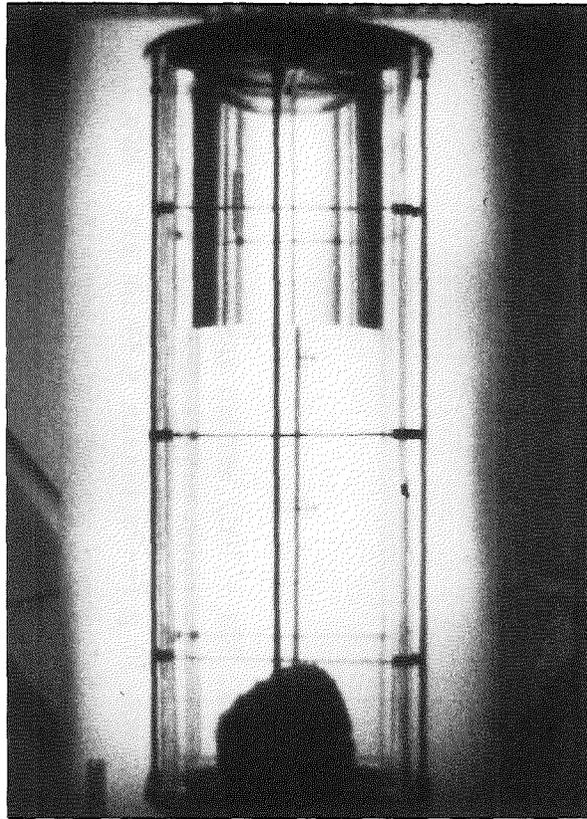


Bild 2                    10 msec  
Hemisphärische Entladung mit  
Entrainment in die Blase



Bild 3                    22 msec  
Das Wasser wird nach oben ver-  
drängt. Dadurch wird das Cover-  
gas komprimiert.

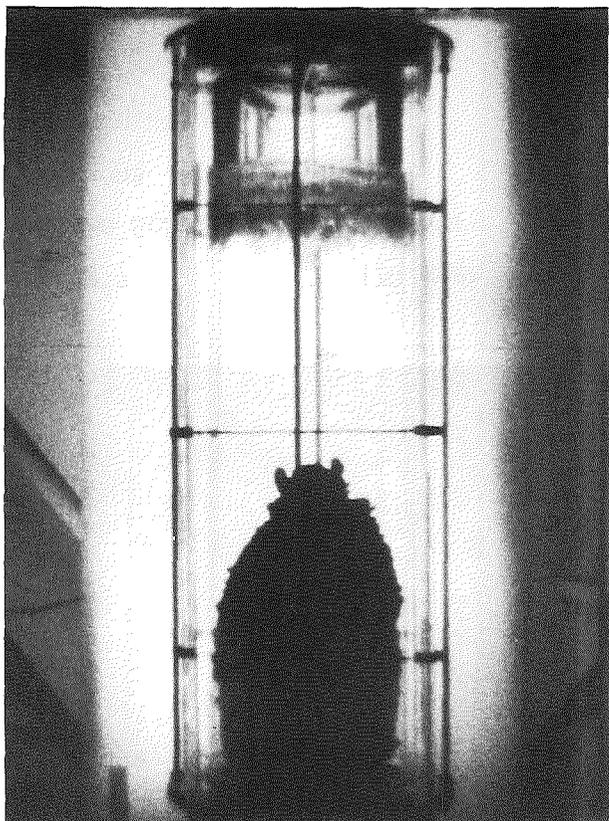


Bild 4            40 msec  
Maximale Blasenexpansion,  
Rückwärtsbeschleunigung des  
Wassers, einsetzende Entrain-  
mentprozesse im Covergas

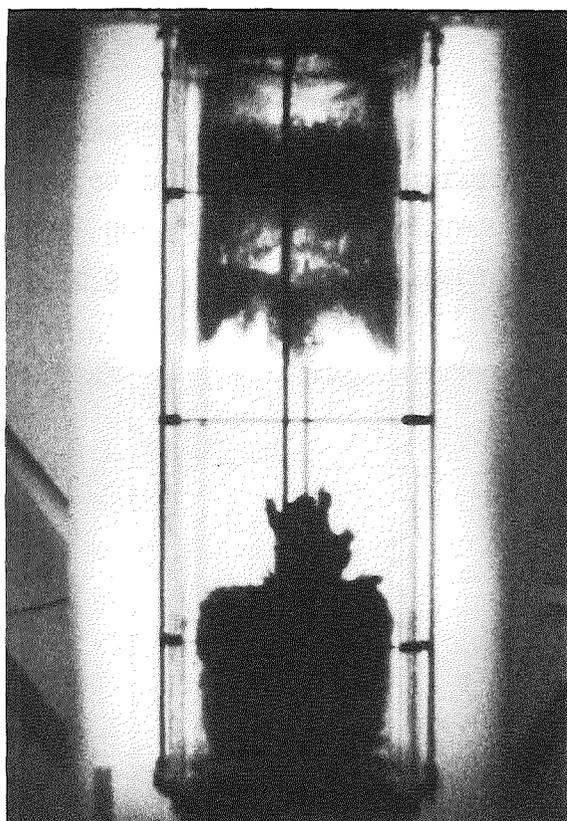


Bild 5            60 msec  
Covergas expandiert, Blase wird  
komprimiert, Partikel gelangen  
infolge Eigenträgheit in das  
Wasser, Ausbildung eines Was-  
serkolbens

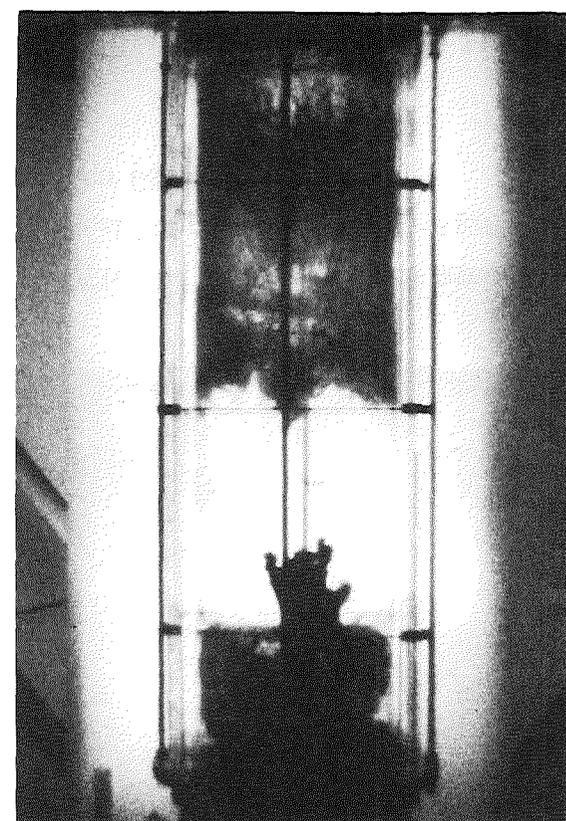


Bild 6            80 msec  
Ebene Schwingung des Wasser-  
kolbens

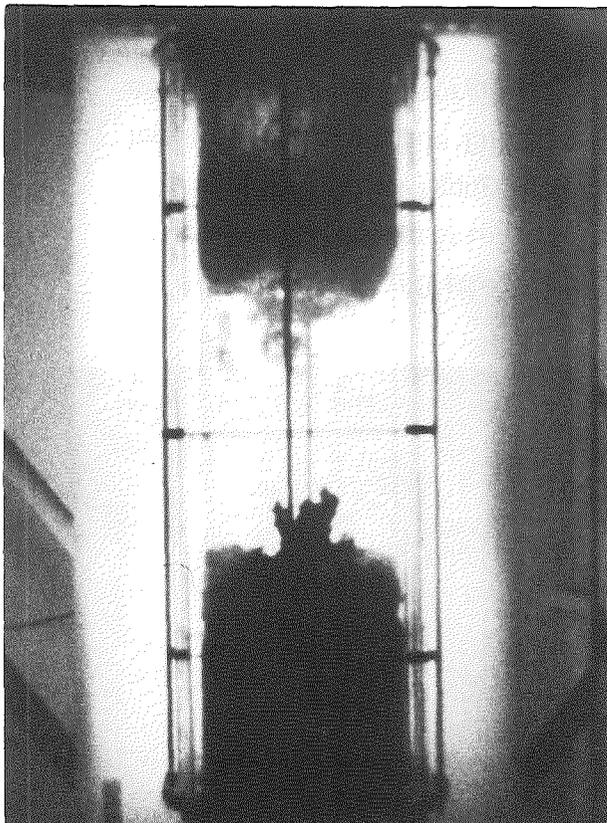


Bild 7                    120 msec  
Ebene Schwingung des Wasser-  
kolbens

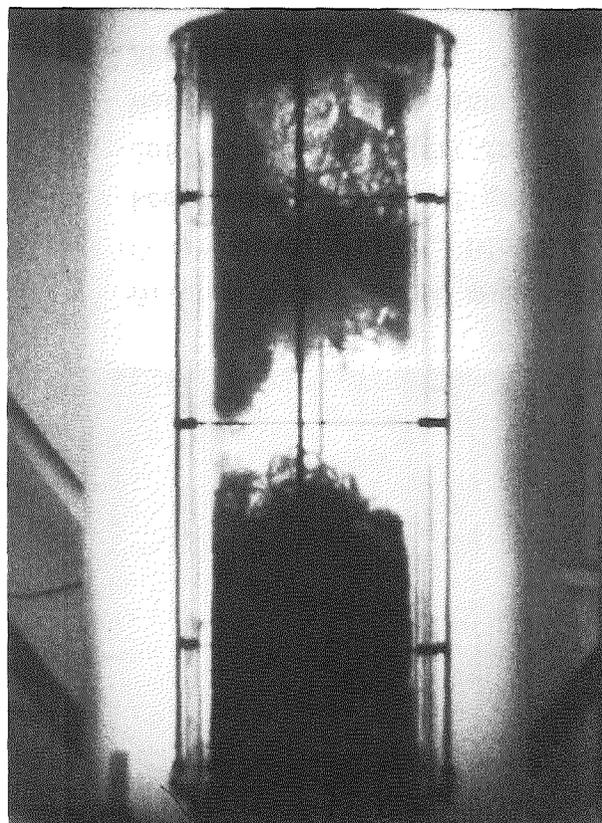


Bild 8                    450 msec  
Ende der Schwingungen, Sedimen-  
tation des Flüssigkeitseintrages  
in das Covergas



Bild 9                    520 msec  
Ausbildung einer aufsteigen-  
den Gasblase



Bild 10            600 msec  
Aufsteigende Blase mit der  
typischen Kugelkappenform



Bild 11            900 msec  
Die aufsteigende Blase hat  
das Covergas erreicht und steht  
kurz vor dem Aufbrechen

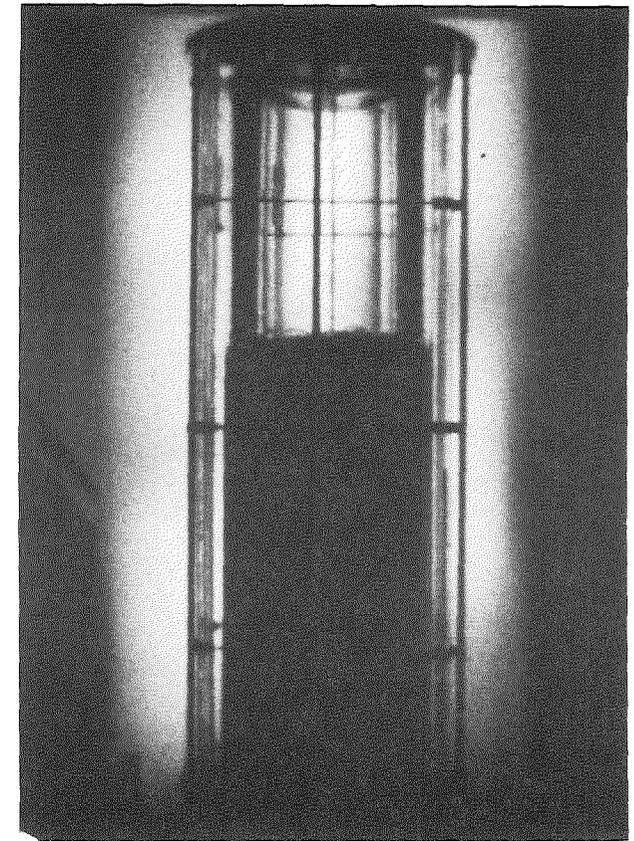


Bild 12            3 sec  
Endzustand: Das Wasser er-  
scheint schwarz wegen der  
abgeschiedenen Partikeln.  
Das Covergas ist frei von  
Partikeln oder Wassertröpfchen

Abb. 11

Auf den folgenden fünf Seiten (Abb. 11a - 11e) werden insgesamt 15 Aufnahmen aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm (2000 Bilder/sec) zum 1B - Experiment Nr.103 gezeigt: Entladung von 30 g Ni-Partikeln, Größe 1  $\mu\text{m}$ , mit 2 MPa in einem 40 cm hohen Wasserpool. Die Leckageöffnungen im Deckel sind verschlossen. Die Aufnahmen zeigen charakteristische Phasen des Entladungsvorganges, der Oszillationen und des Gasanstiegs über einen Gesamtzeitraum von 2,5 Sekunden.

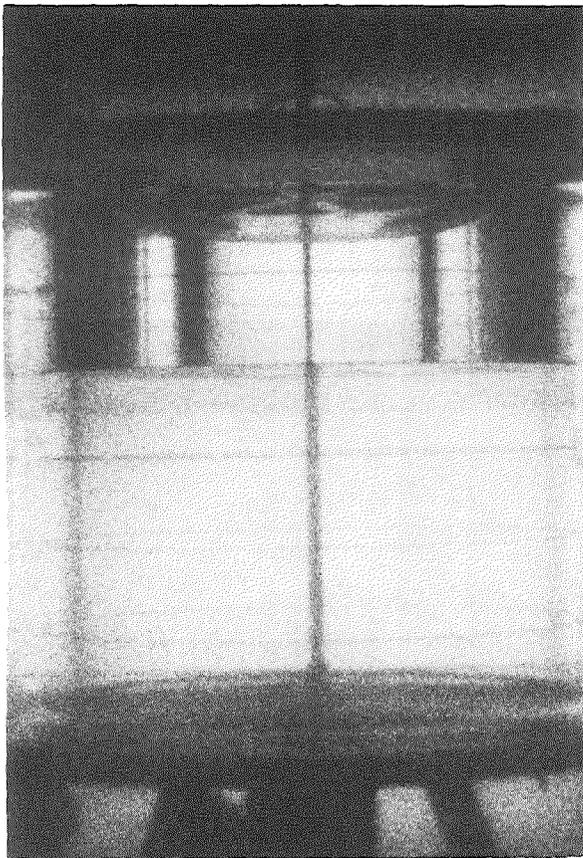


Bild 1            0 sec  
Zustand vor der Entladung

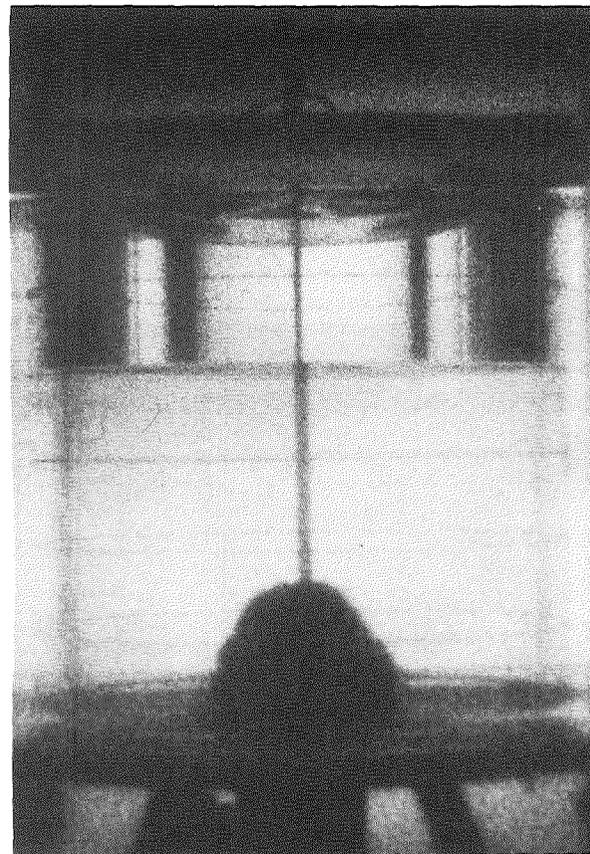


Bild 2            5 msec  
Hemisphärische Entladung  
mit Entrainment in die  
Blase

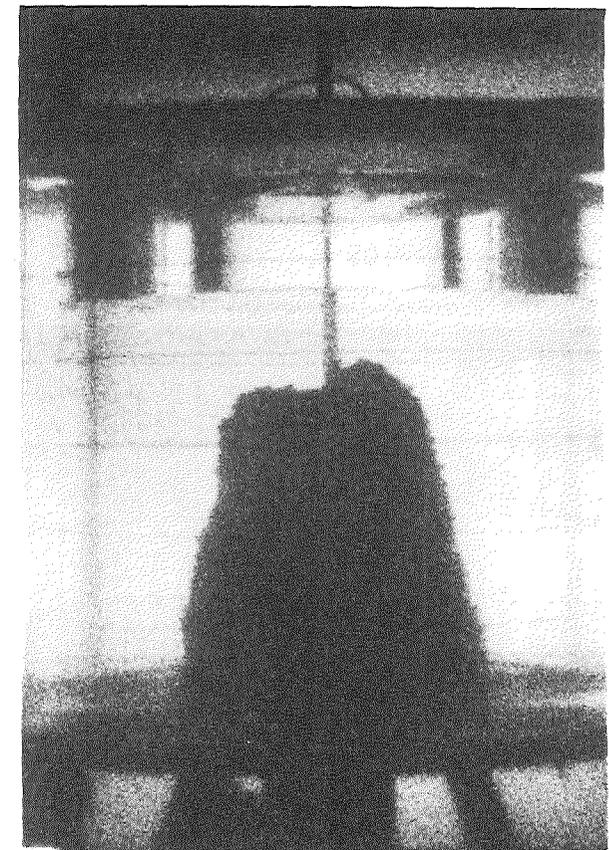


Bild 3            15 msec  
Das Wasser wird nach oben ver-  
drängt. Dadurch wird das Cover-  
gas komprimiert. Wasserspiegel  
zeigt keine Wölbung



Bild 4            25 msec  
Maximale Blasenexpansion,  
beginnende Entrainmentpro-  
zesse im Covergas

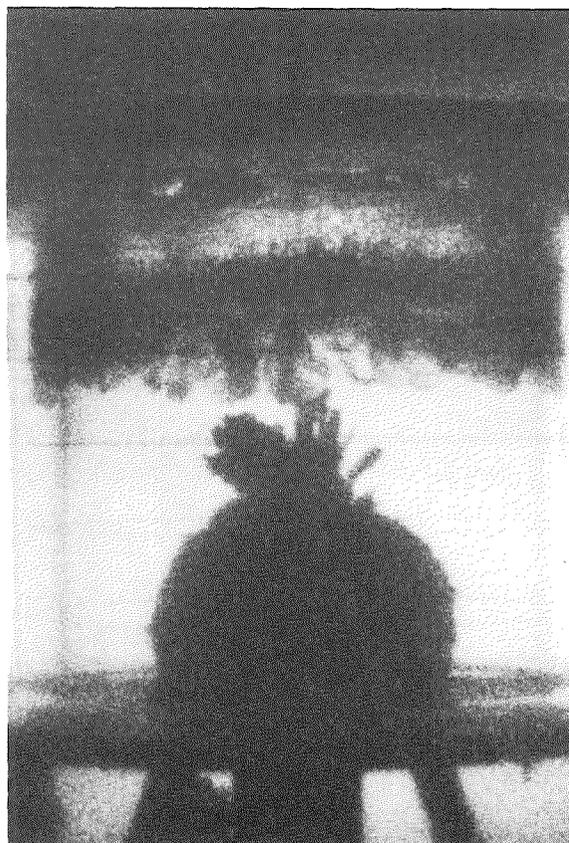


Bild 5            40 msec  
Rückwärtsbeschleunigung,  
Covergas expandiert, Blase  
wird komprimiert, dabei Par-  
tikelabscheidung

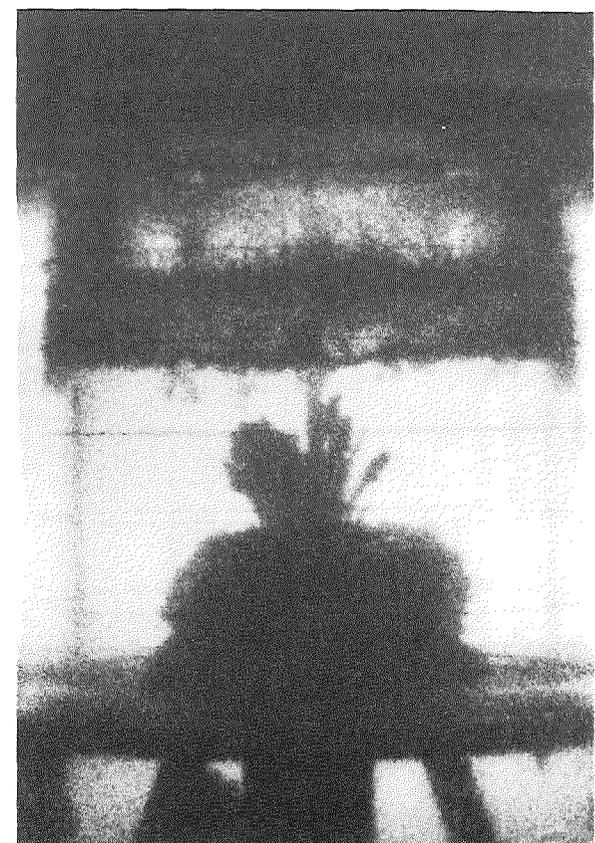


Bild 6            50 msec  
Typische Form der komprimierten  
Blase: Aufgesetzter Torus und Sok-  
kel, der am Boden zerfließt



Bild 7            60 msec

Übergang zur Kolbenform

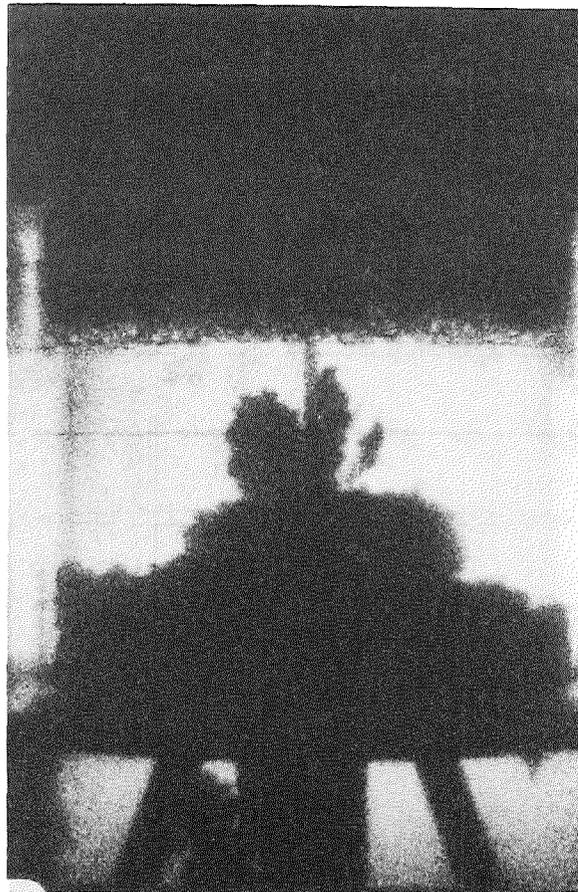


Bild 8            80 msec

Kolbenform ist erreicht. Covergas hat sich mit dem Flüssigkeitseintrag vollständig vermischt

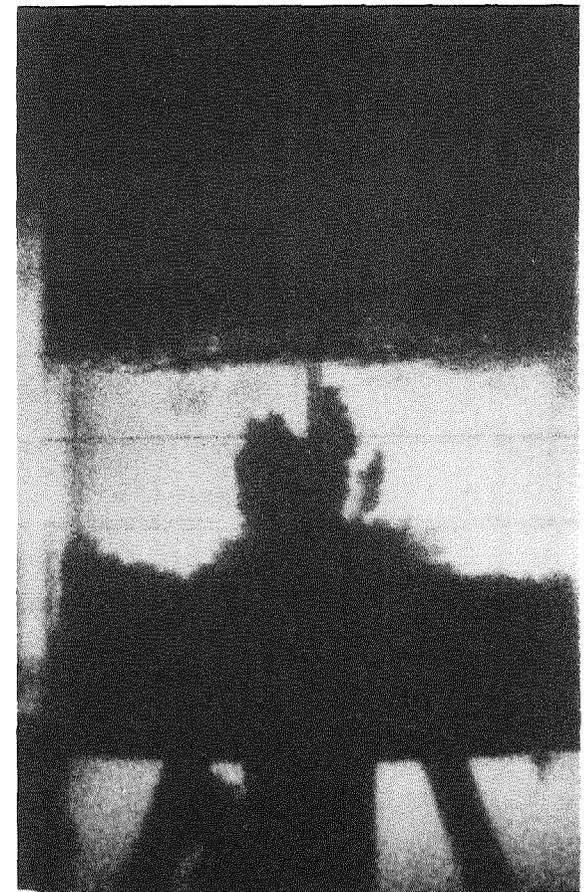


Bild 9            100 msec

Ebene Schwingung des Wasserkolbens zwischen Blase und Covergas



Bild 10                    150 msec  
Ebene Schwingung, dabei allmählicher  
Aufstieg der Blasenfront. Mehrere Blasen  
unterschiedlicher Größe.

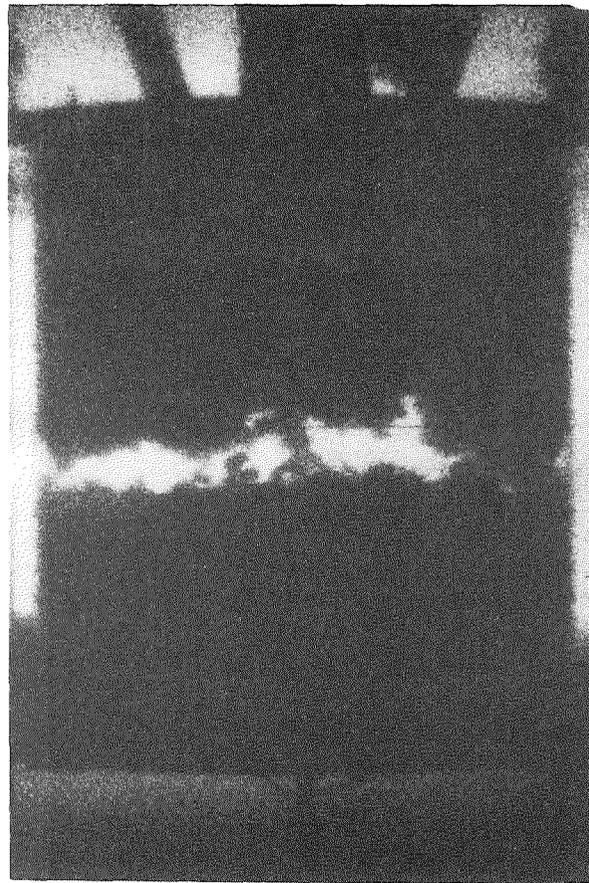


Bild 11                    350 msec  
Aufsteigende Blasenfront hat  
das Covergas fast erreicht

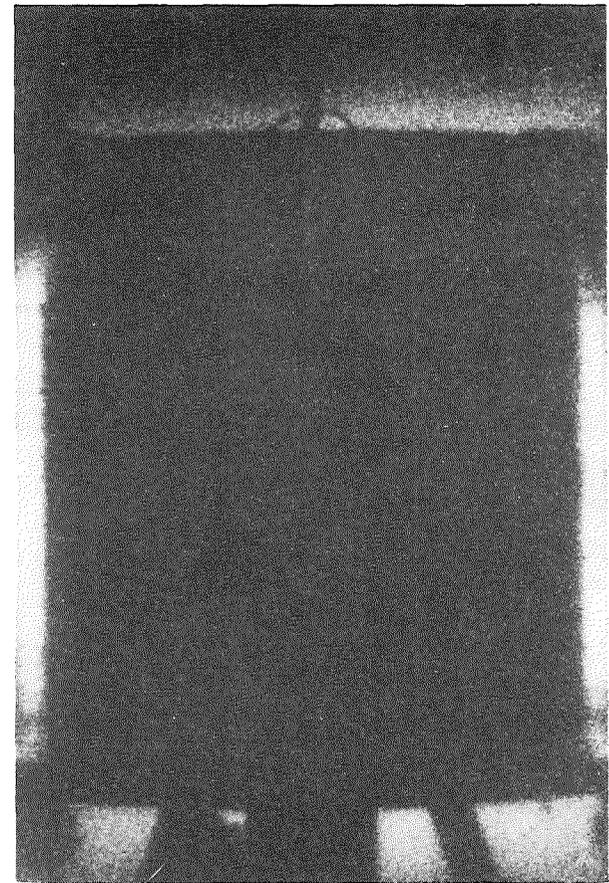


Bild 12                    500 msec  
Vereinigung von Blase und  
Covergas. Der Poolbehälter  
ist nun vollständig mit einer  
Emulsion gefüllt.



Bild 13            900 msec  
Allmähliche Entmischung, Sedi-  
mentation im Covergas

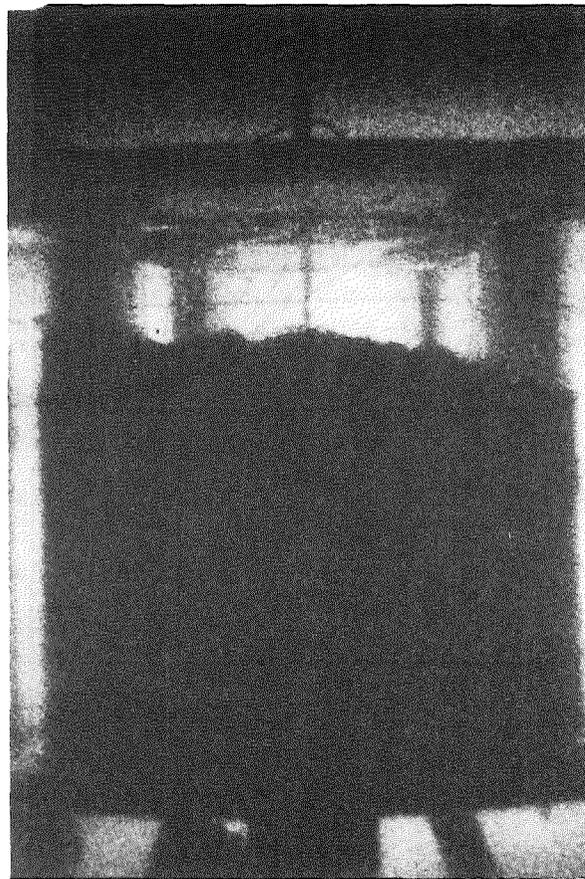


Bild 14            1500 msec  
Aufbrechende Gasblasen in Covergas

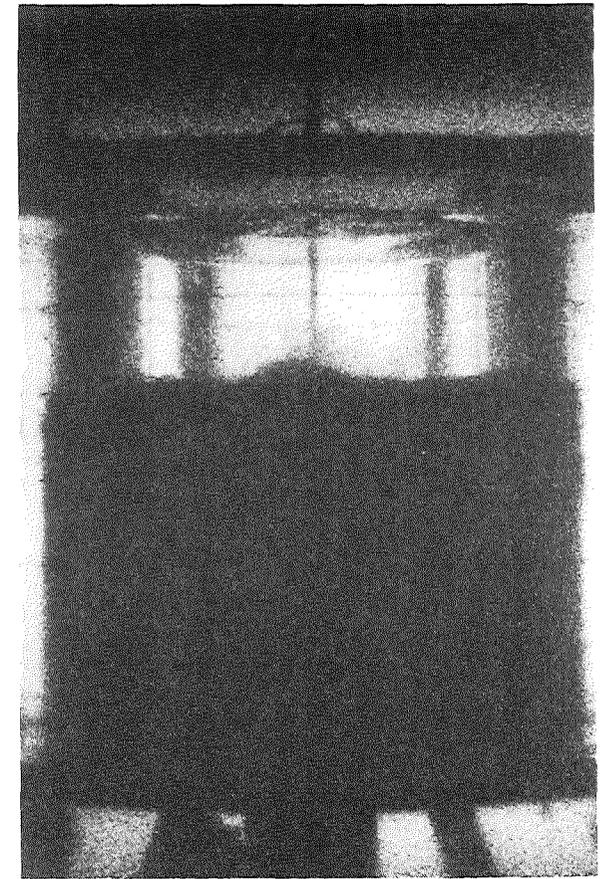


Bild 15            2500 msec  
Endzustand: Covergas klar,  
Poolflüssigkeit getrübt von  
Partikeln und restlichen  
kleinen Gasblasen

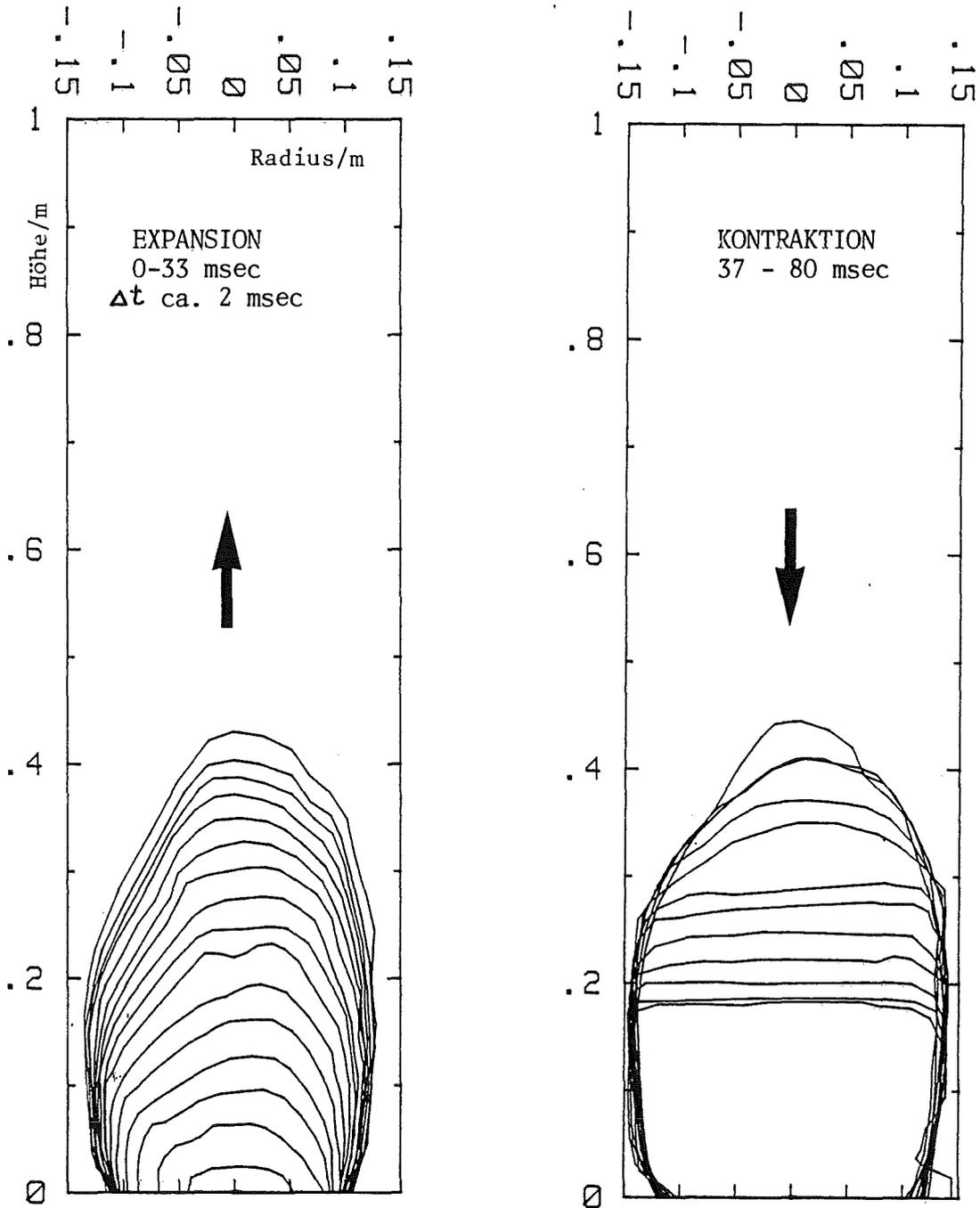


Abb. 12 a, b Expansionscharakteristik (Beispiel)

Versuch FAUST 29, Serie 1A, Entladungsüberdruck 1,00 MPa,  
Poolhöhe 60 cm

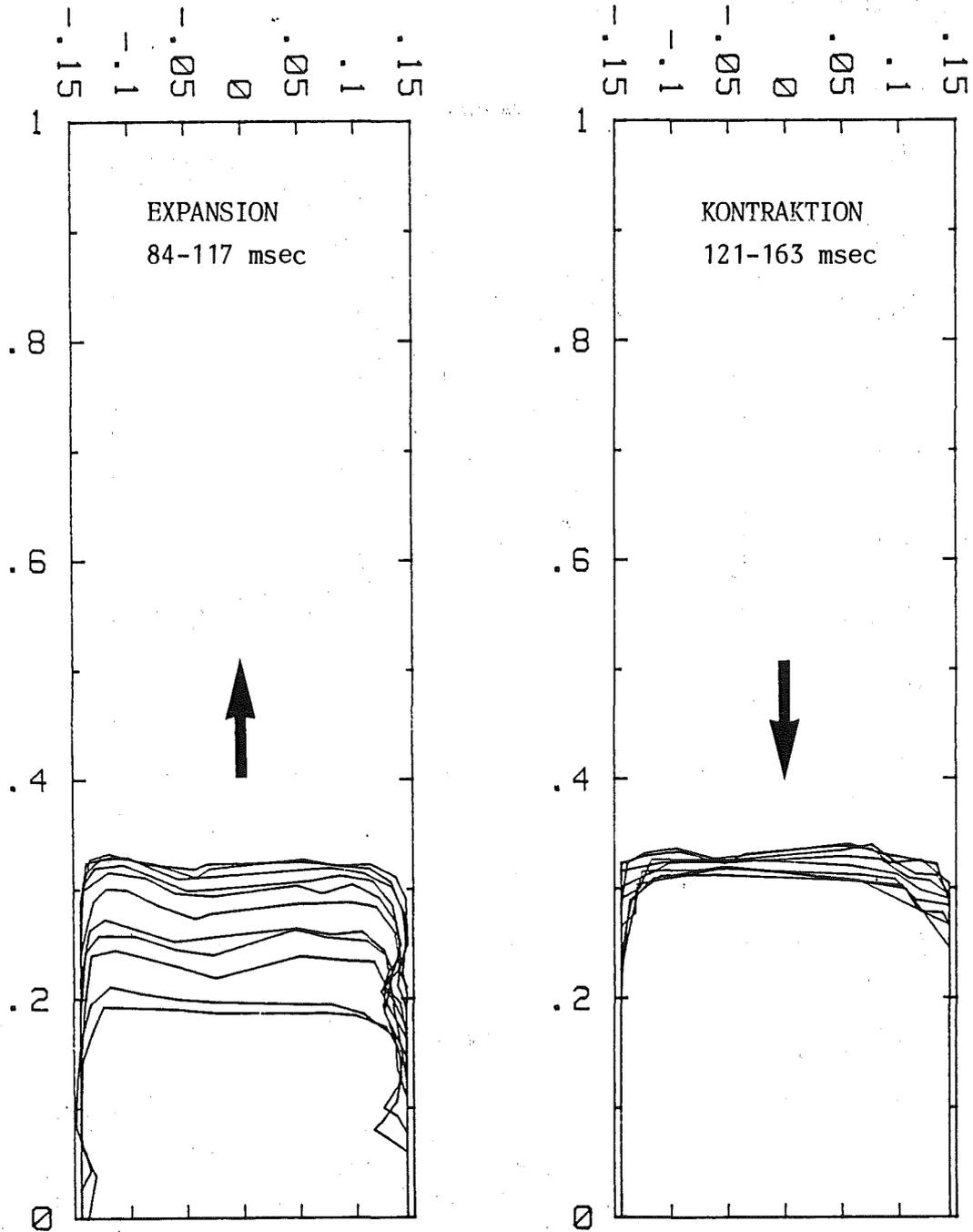


Abb. 12 c, d Expansionscharakteristik (Beispiel)

Versuch FAUST 29, Serie 1A, Entladungsüberdruck 1,00 MPa,  
Poolhöhe 60 cm

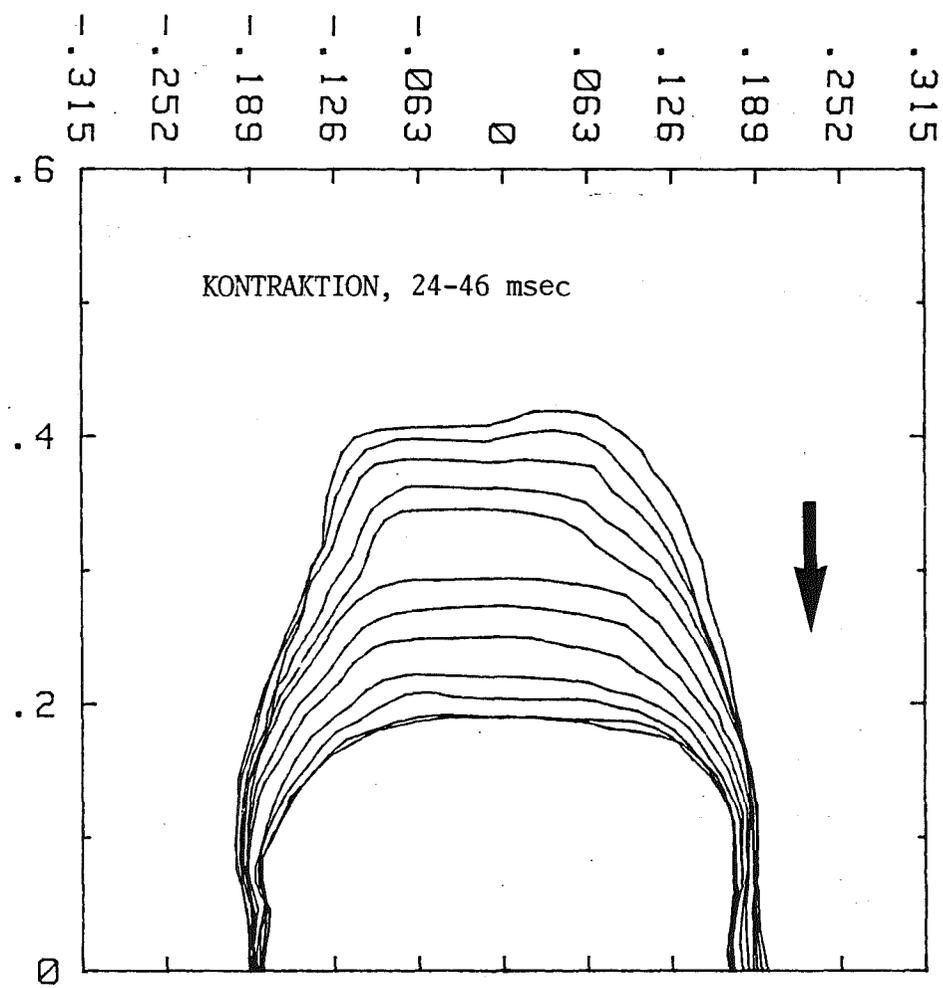
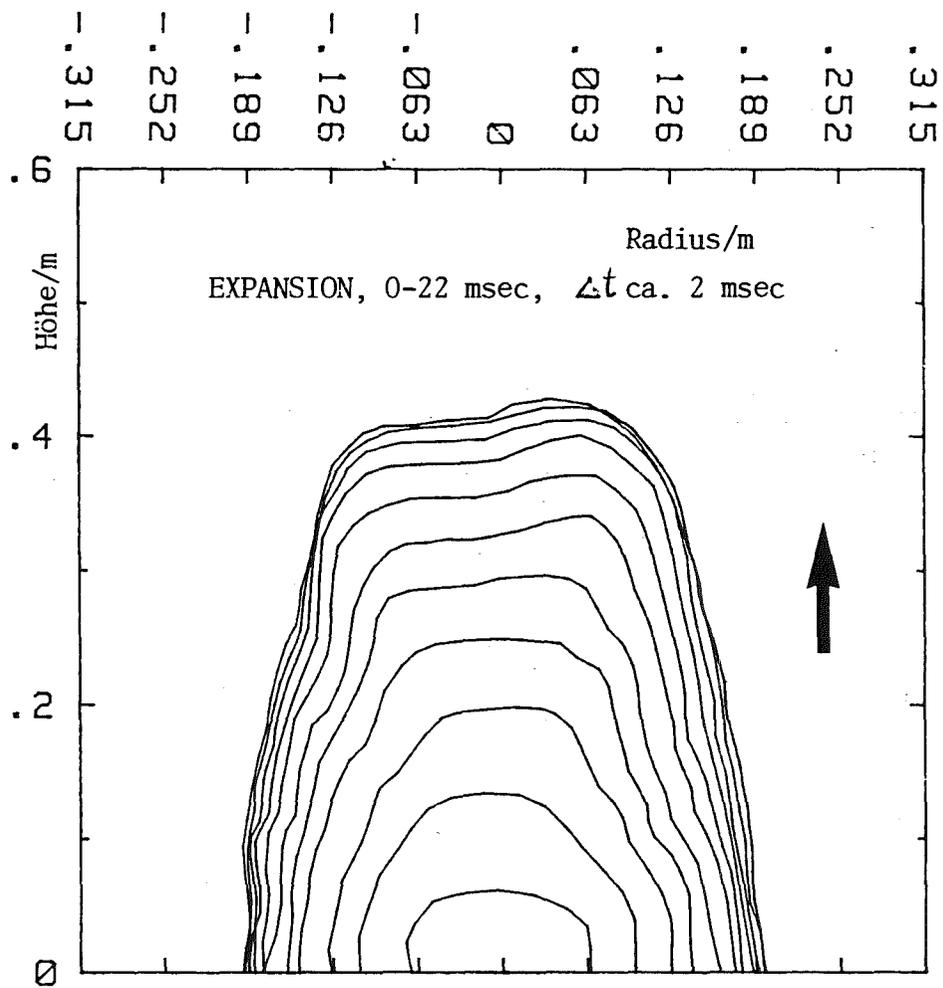


Abb. 13 a, b Expansionscharakteristik (Beispiel)

Versuch FAUST 103, Serie 1B, Entladungsüberdruck 1,98 MPa, Poolhöhe 40 cm

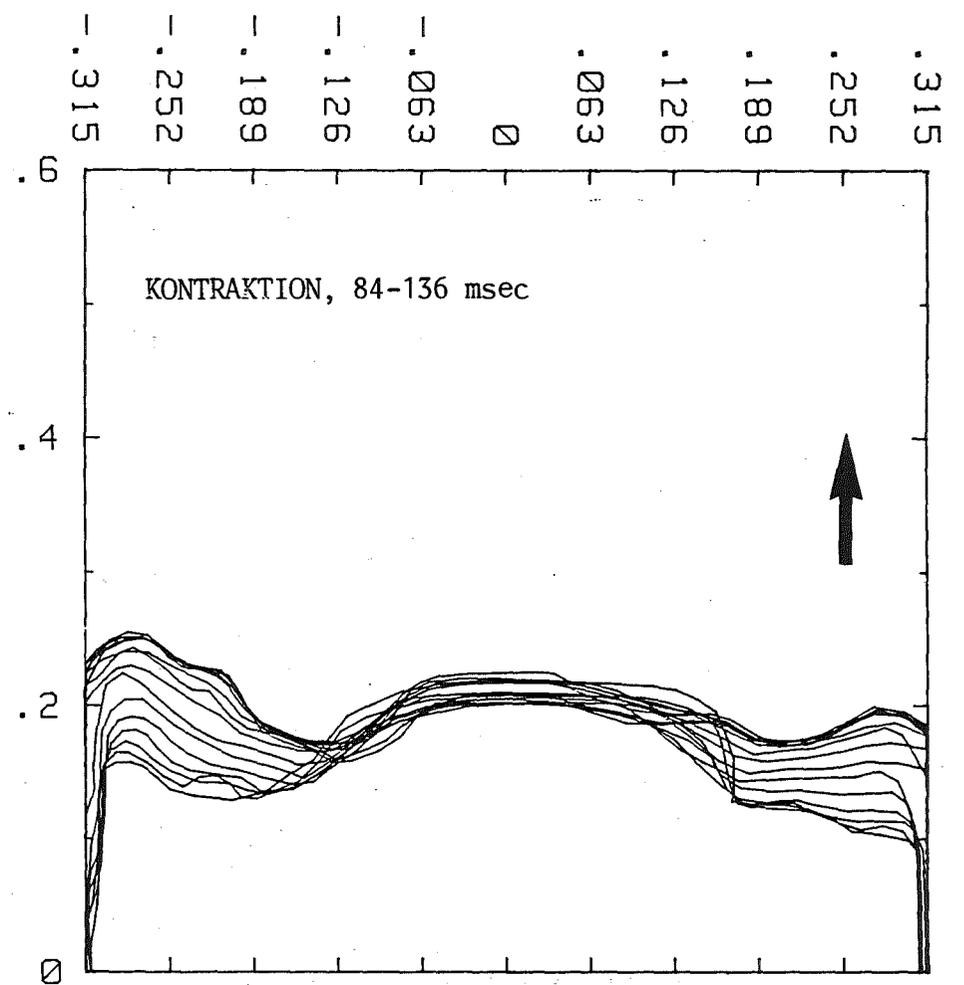
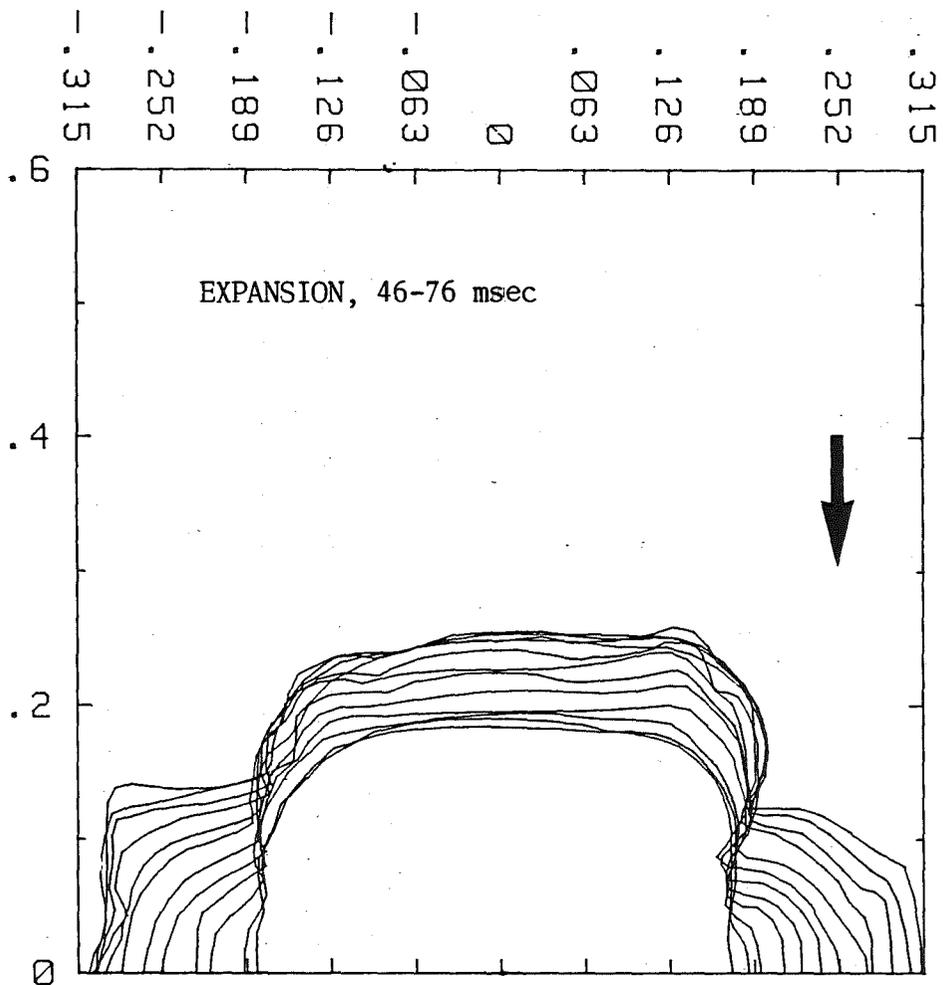


Abb. 13 c, d Expansionscharakteristik (Beispiel)

Versuch FAUST 103, Serie 1B, Entladungsüberdruck 1,98 MPa, Poolhöhe 40 cm

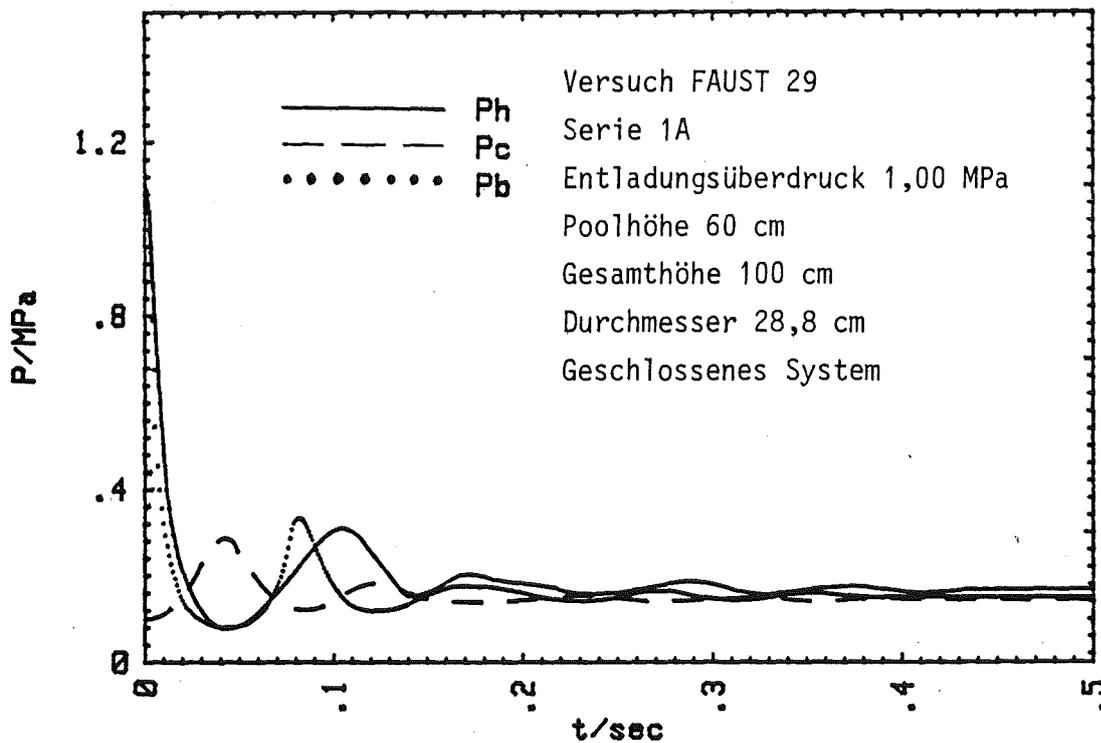
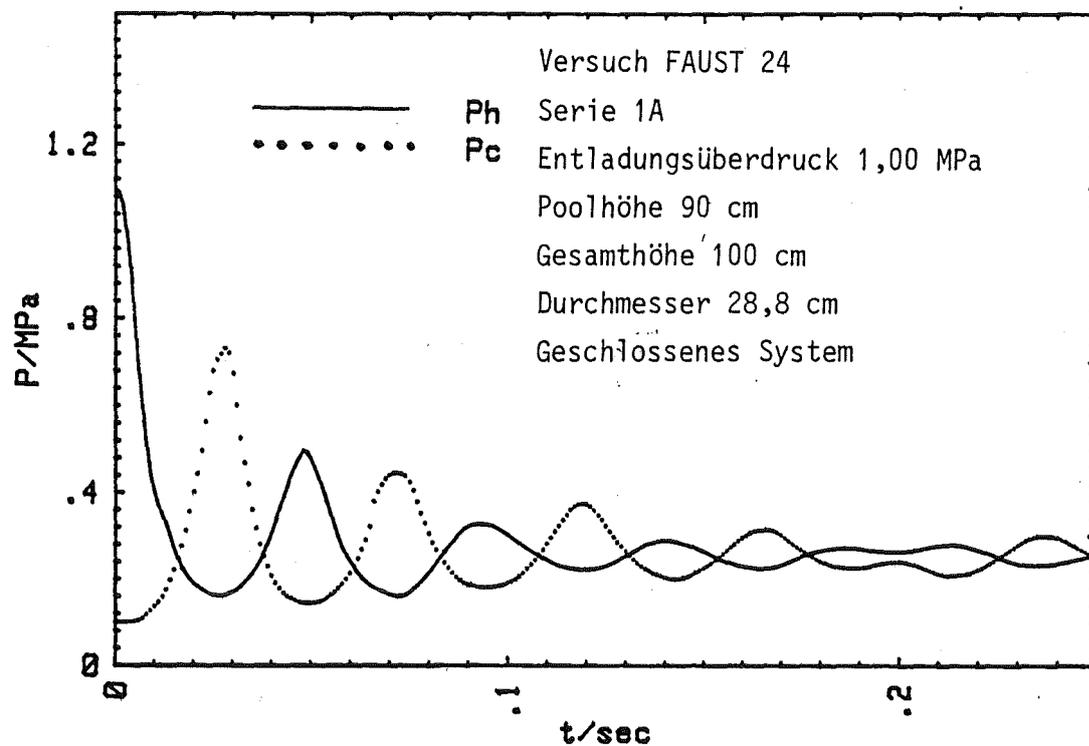


Abb. 14 : Gemessene Drucksignale bei FAUST-1A-Versuchen

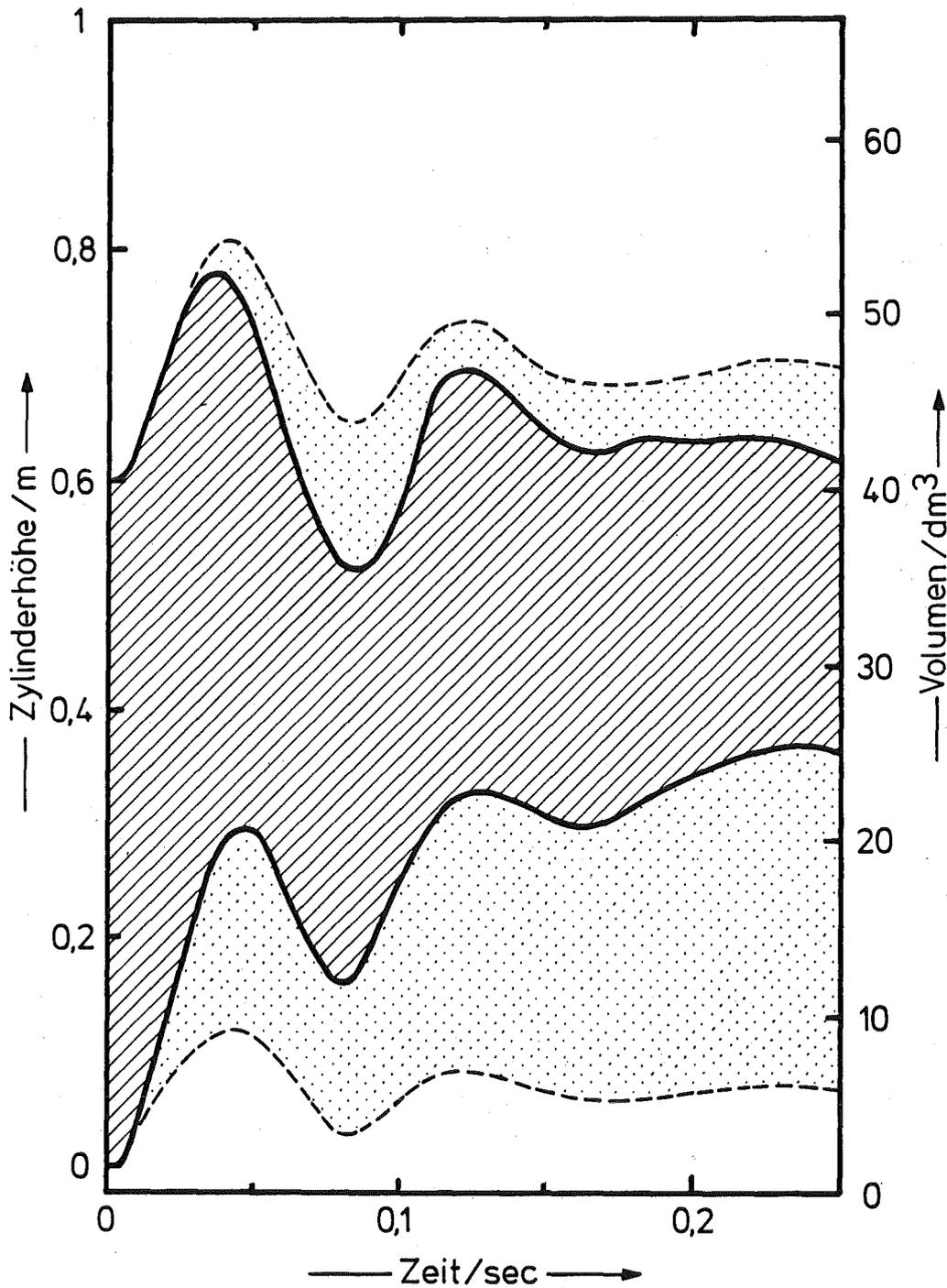


Abb. 15: Oszillationen des "Wasserkolbens" mit Entrainment. Die Zeichnung wurde nach der Auswertung und Digitalisierung des Hochgeschwindigkeitsfilmes von Exp. Nr. 29 angefertigt. Der schraffierte Bereich gibt die Position des Wasserkolbens an. Die durchgezogenen Linien sind die Begrenzungen zum effektiven Blasenvolumen (unten) bzw. zum effektiven Covergasvolumen (oben). Die gestrichelten Linien beziehen sich auf die reinen Gasvolumina und wurden - adiabatisches Verhalten vorausgesetzt - aus den gemessenen Drucksignalen errechnet. Der punktierte Bereich ist somit das Wasser-Entrainment in die jeweiligen Volumina.

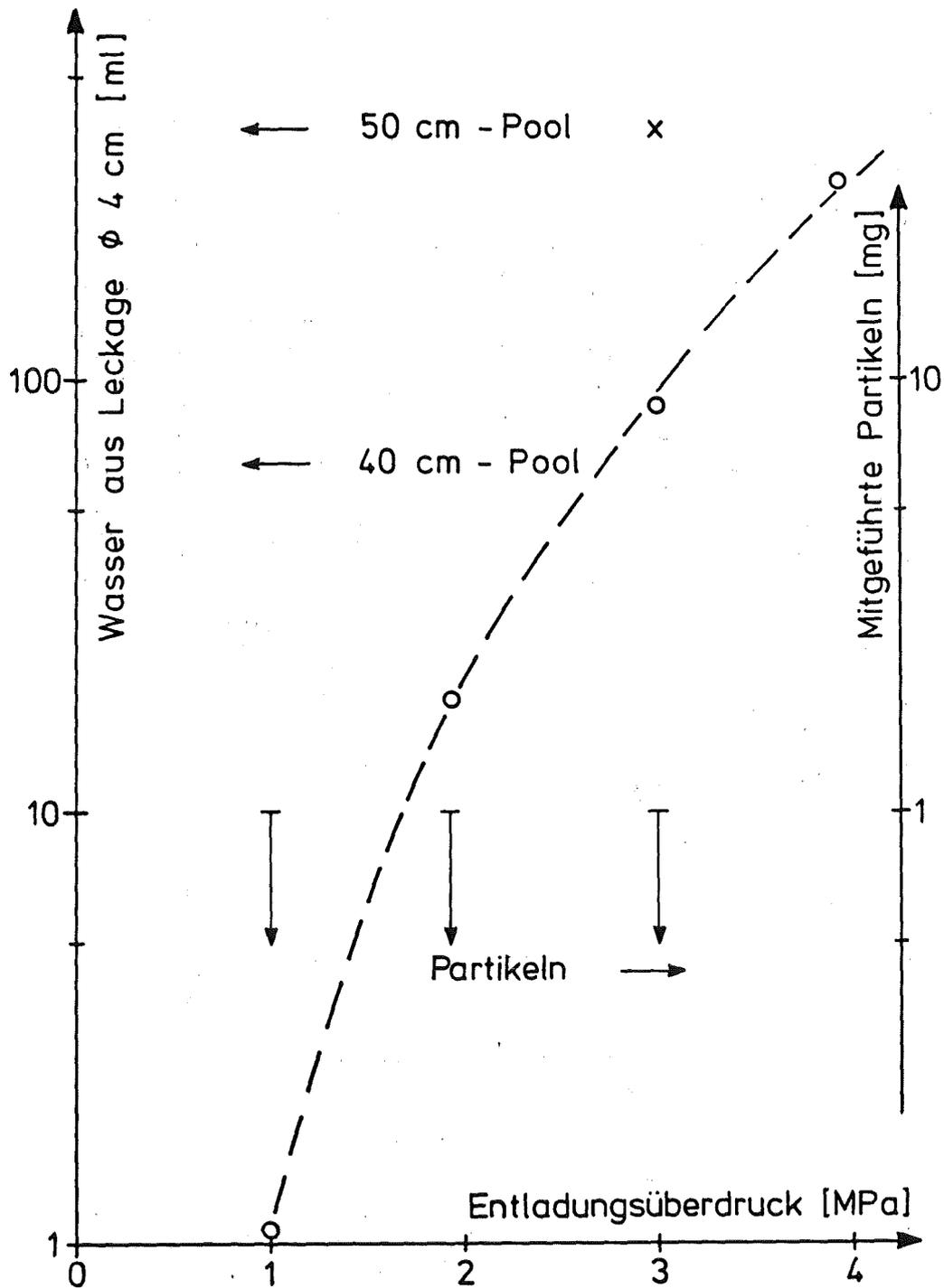


Abb. 16 : Freigesetzte Wassermengen als Funktion des Entladungsüberdrucks bei FAUST-1B mit 40 cm-Pool und 50 cm-Pool. Die freigesetzte Partikelmenge war in allen Fällen unterhalb der Nachweisgrenze.

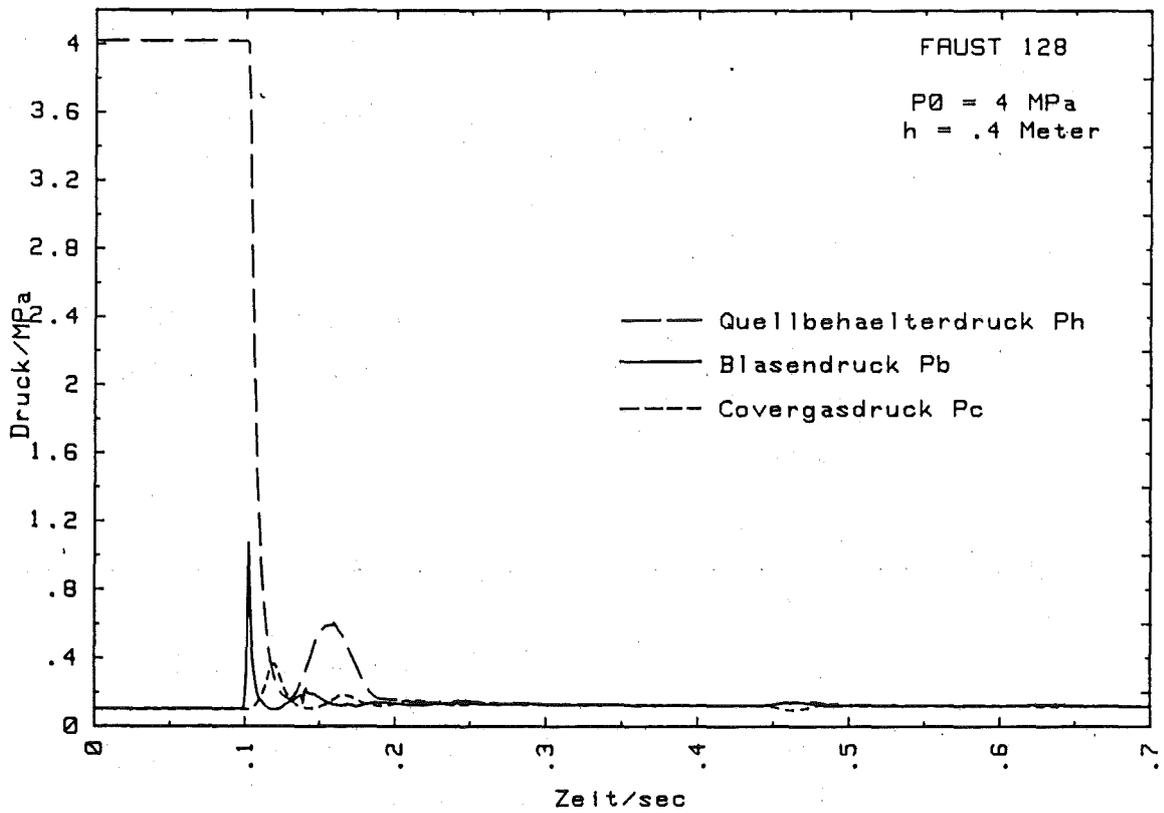
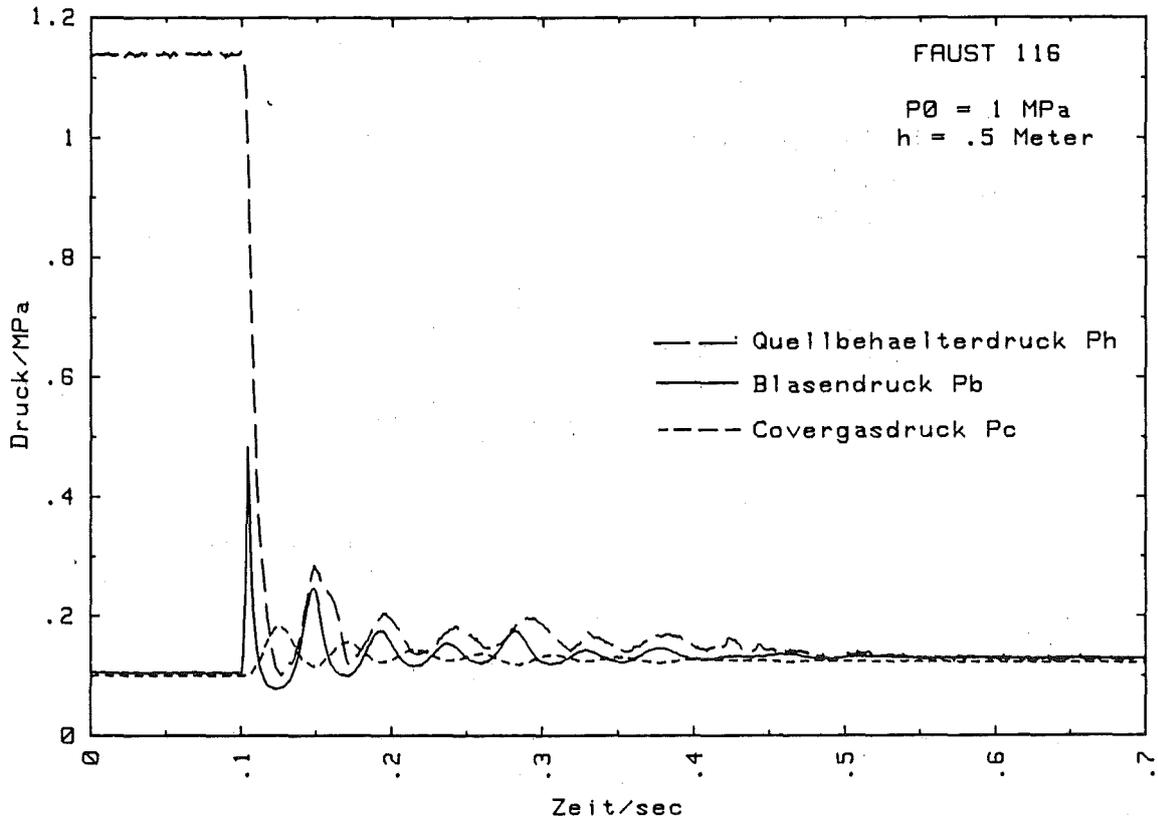


Abb. 17 : Gemessene Drucksignale bei FAUST-1B-Versuchen

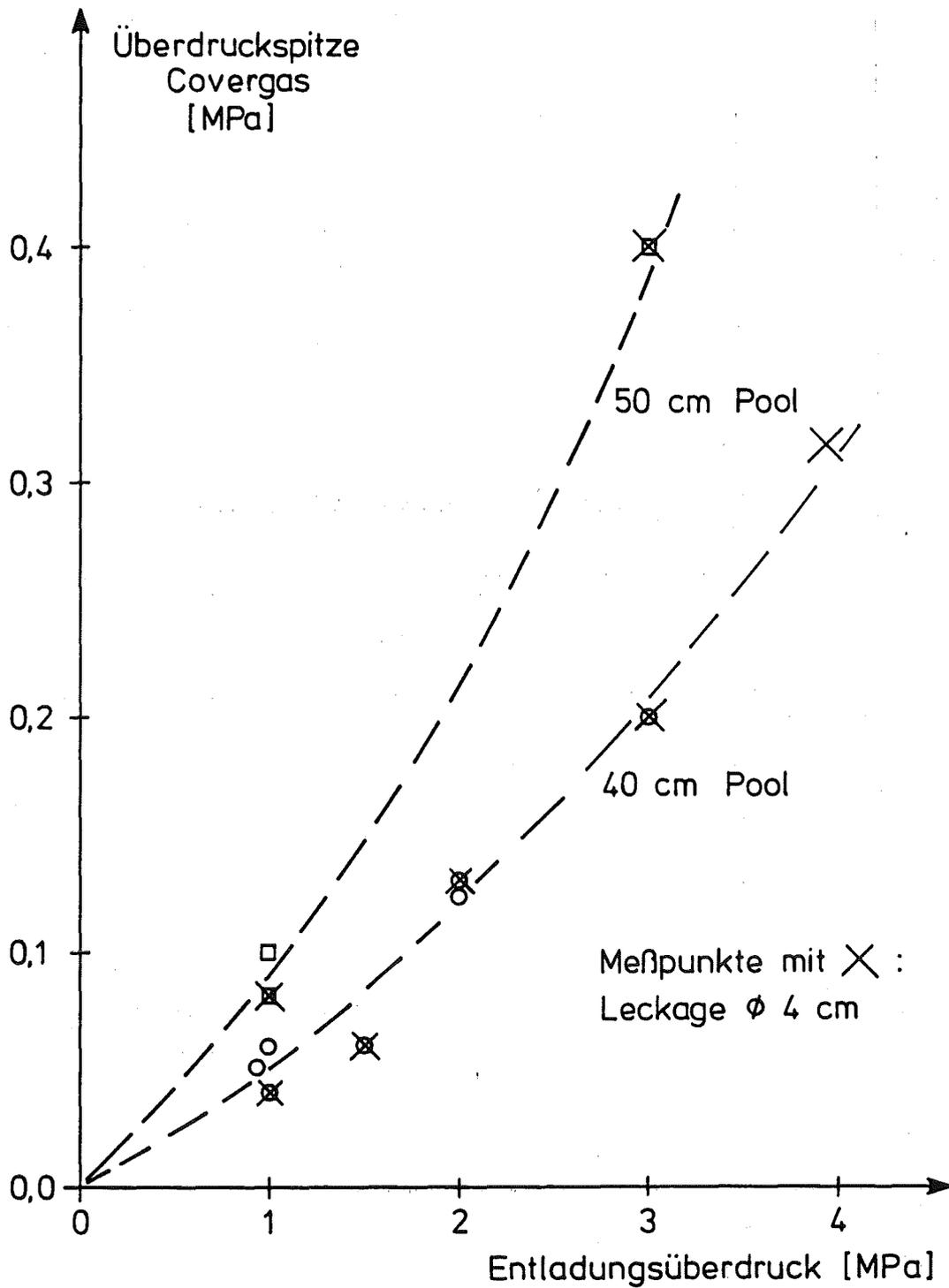


Abb. 18 : Gemessene maximale Überdruckspitze im Covergas bei FAUST-1B mit 40 cm-Pool und 50 cm-Pool, mit und ohne Leckage.

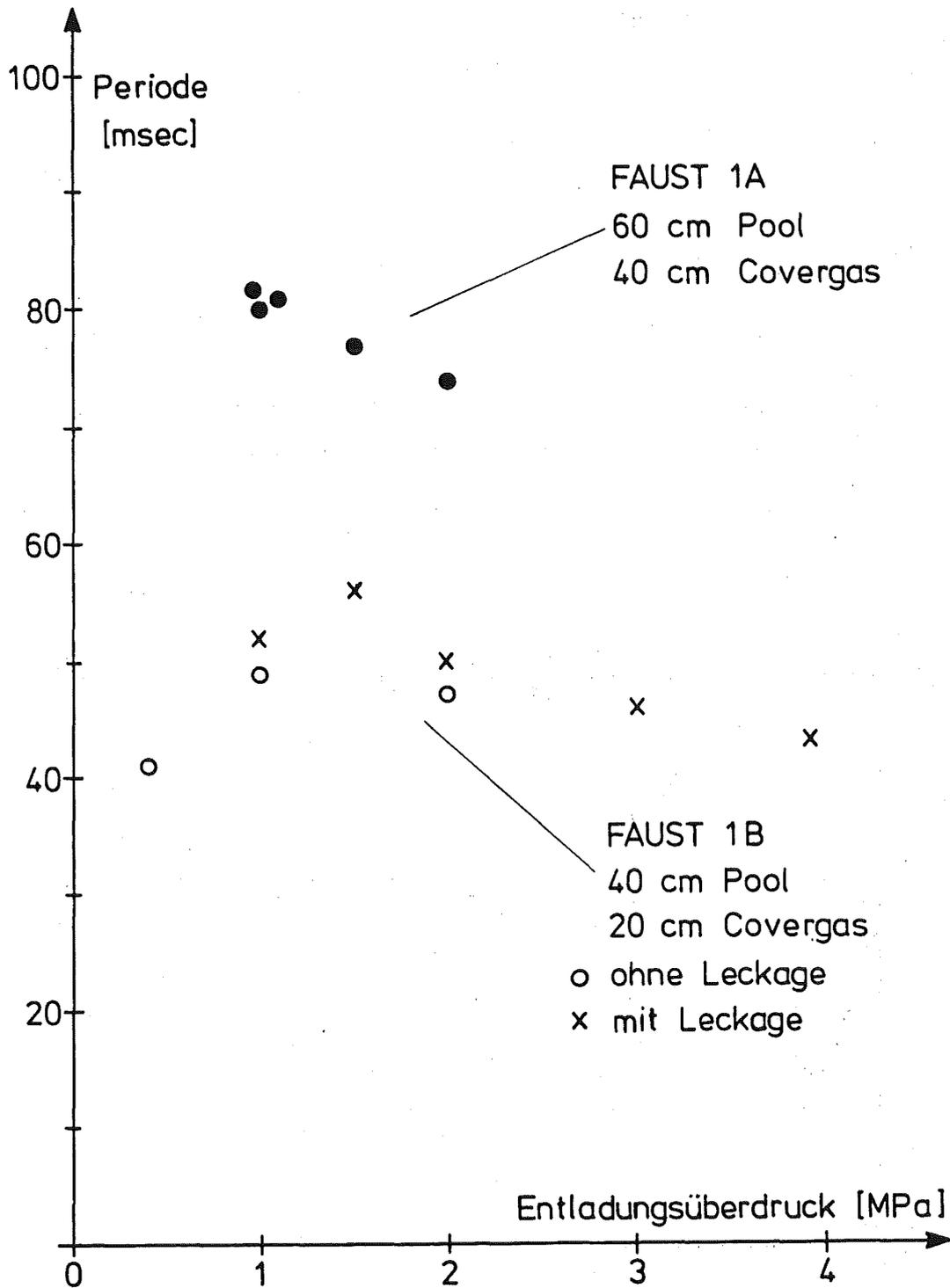


Abb. 19: Periode der Oszillationen bei FAUST-1A-Versuchen mit 60 cm Poolhöhe und FAUST 1B-Versuchen mit 40 cm Poolhöhe.

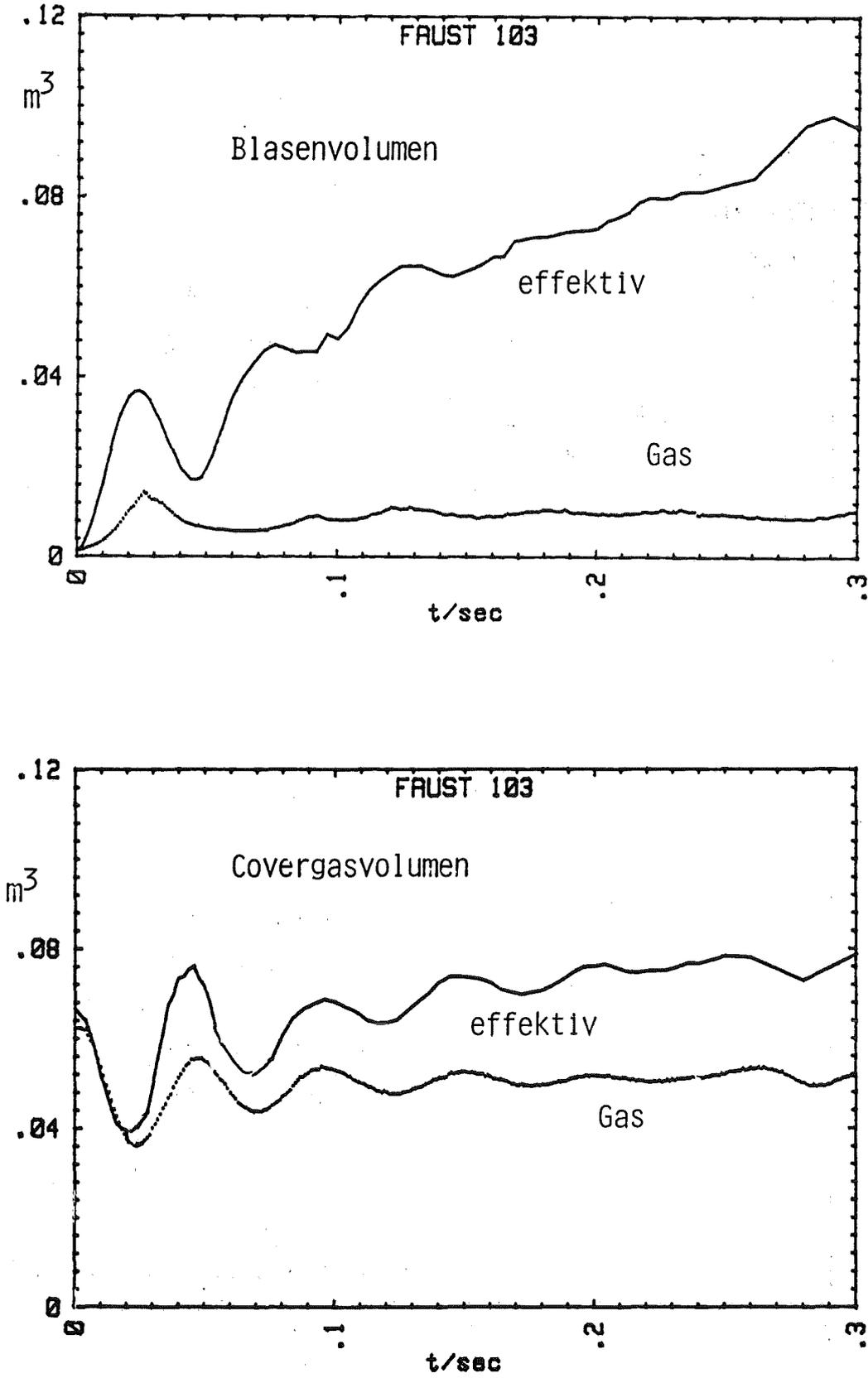


Abb. 20 : Blasen- und Covergasvolumina bei Experiment 103  
(1,98 MPa, 40 cm Poolhöhe, Serie 1B).  
Effektiv: Ermittelt durch Filmauswertung  
Gas: Berechnet aus den gemessenen Drucksignalen

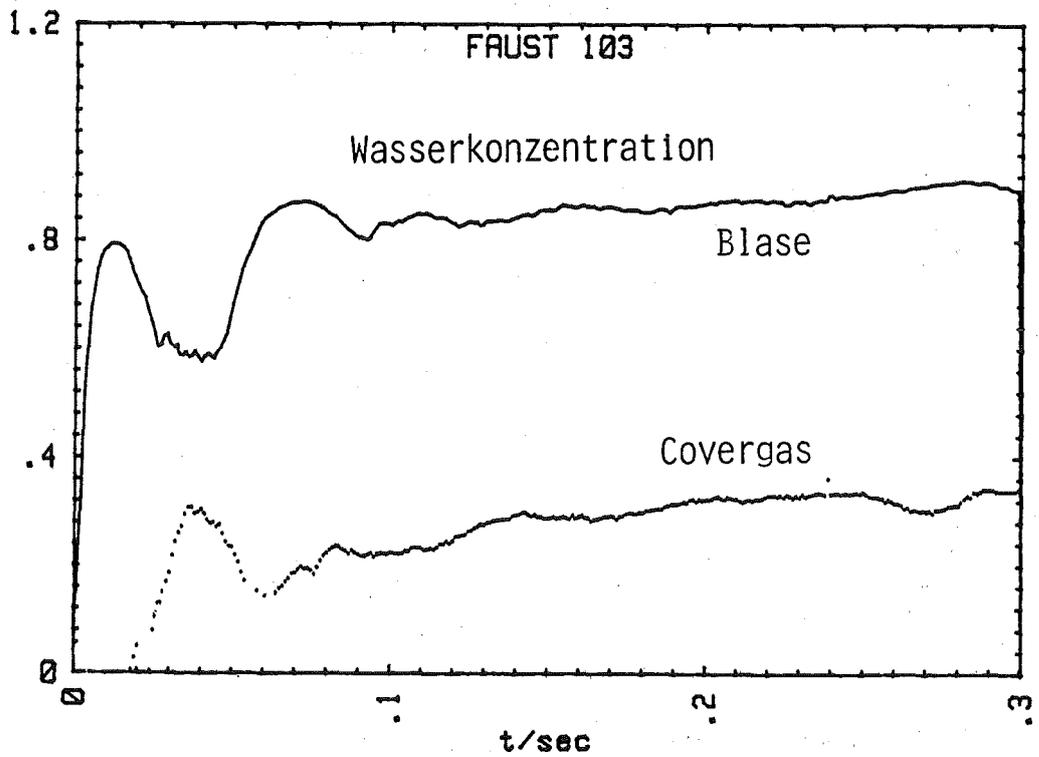
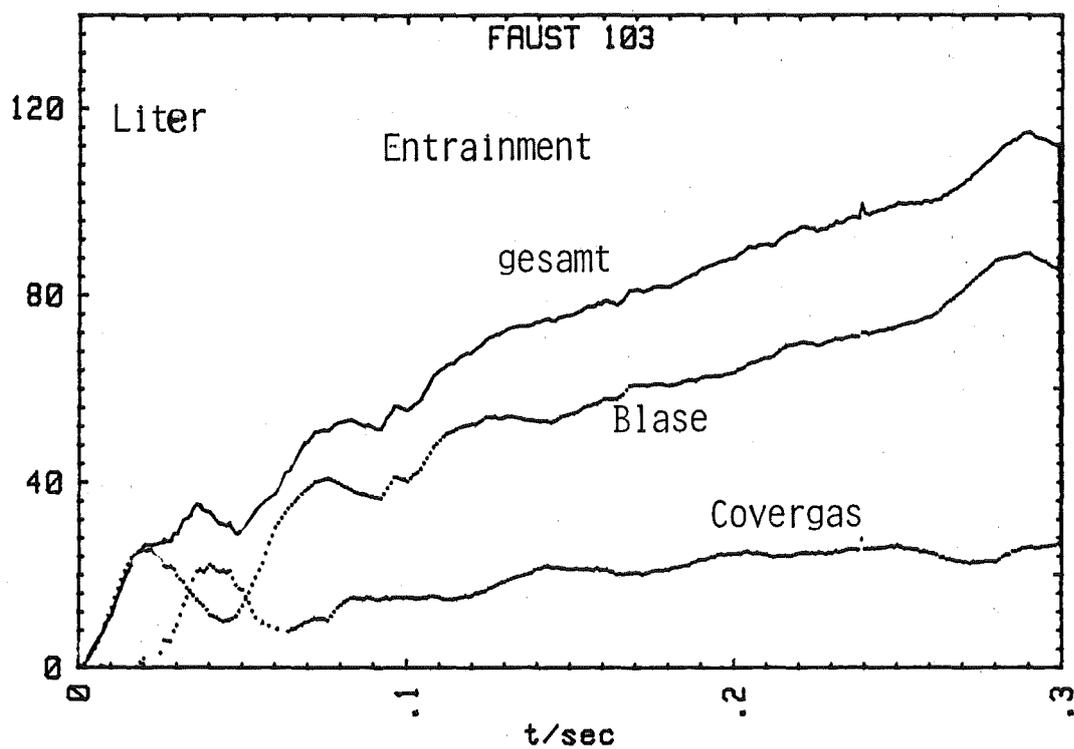


Abb. 21 : Entrainment und Wasserkonzentration bei Experiment 103.  
Siehe dazu Abb. 20 und Kap. 6.4

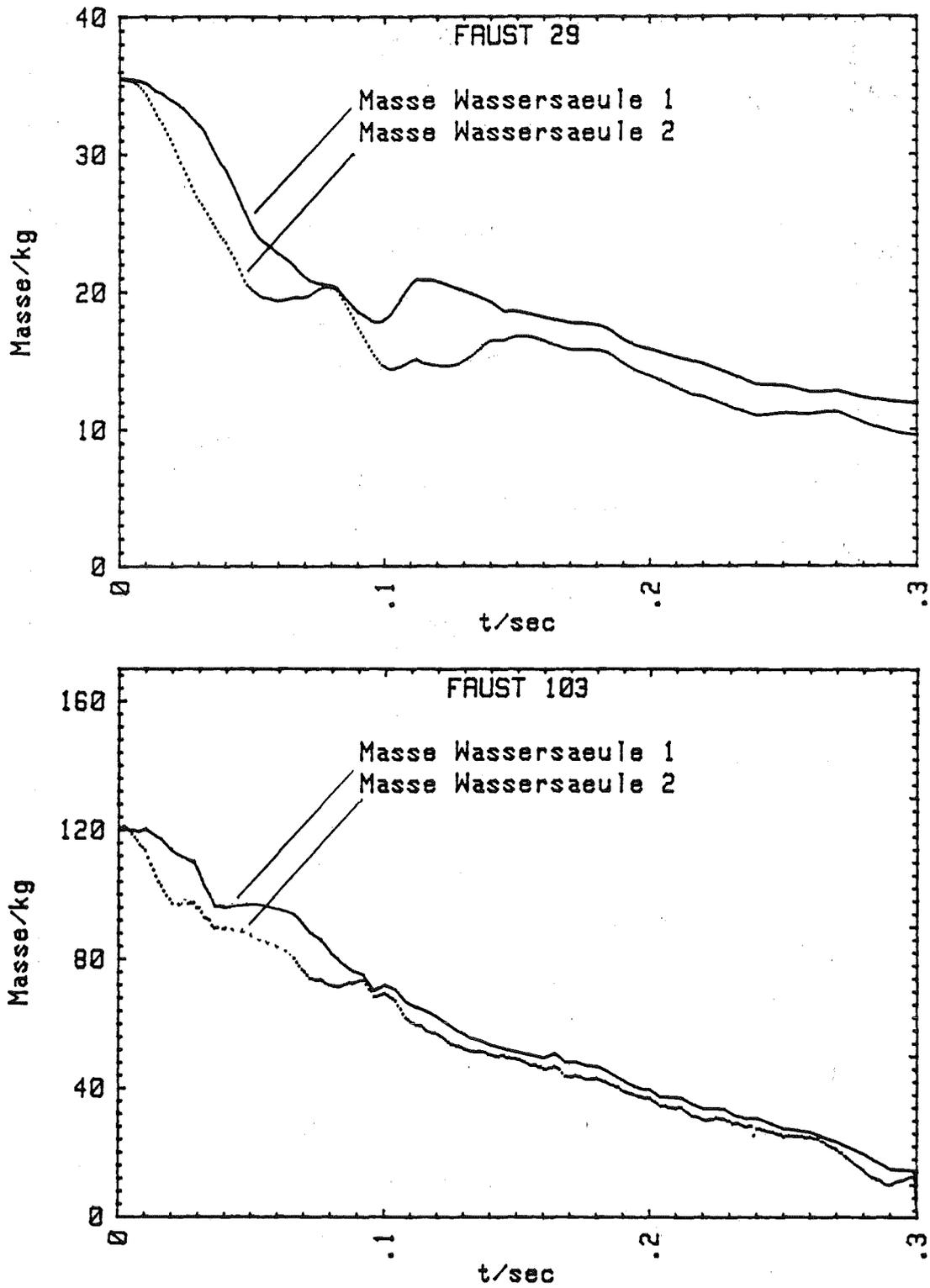


Abb. 22 : Masse der stabilen Wassersäule

- 1) direkt aus der Filmauswertung
- 2) Anfangsmasse minus Gesamtentrainment

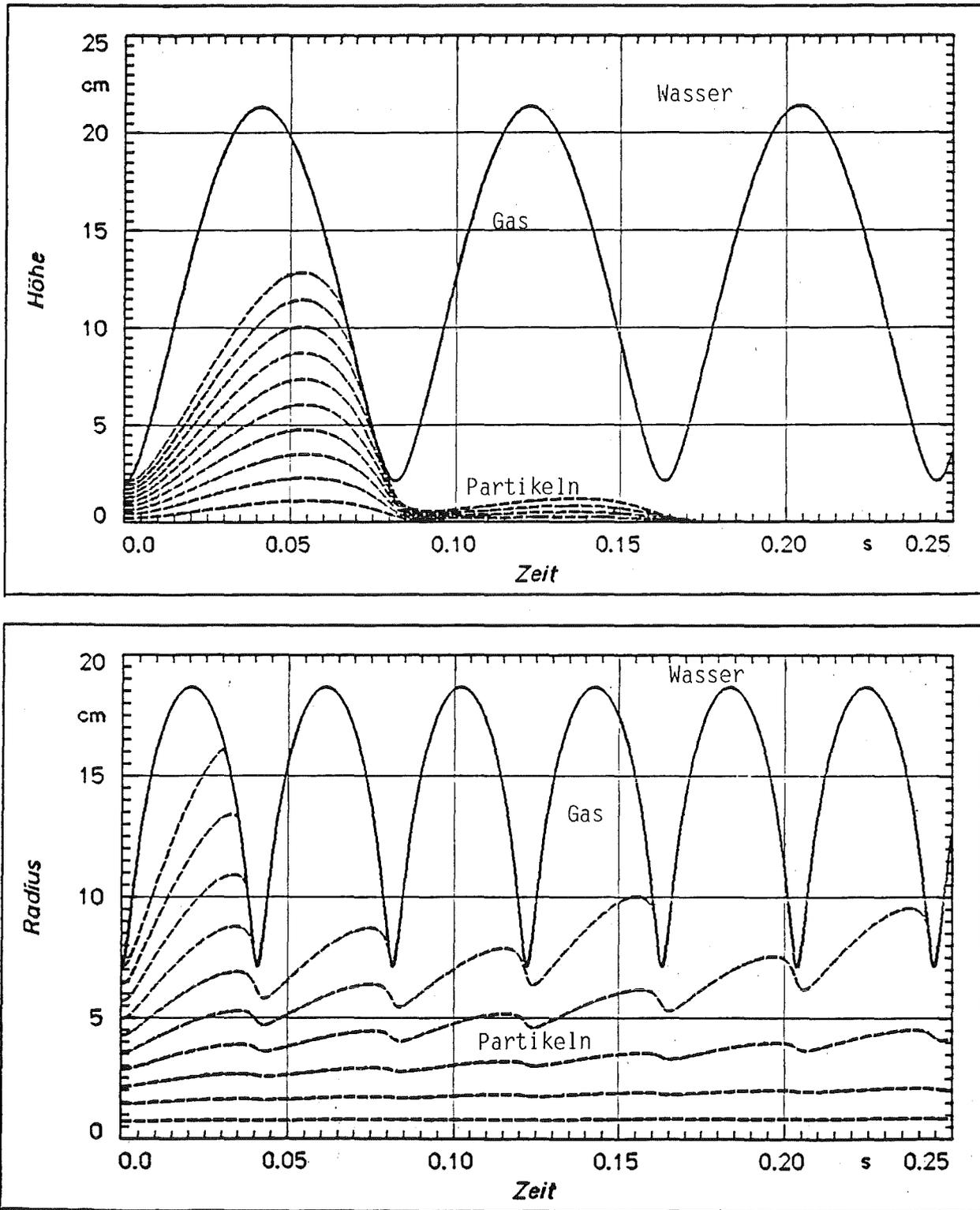


Abb. 23 : PAROGA-Rechnungen zum Blasen- und Partikelverhalten für die beiden Expansionstypen in Abb. 2 .  
Oben: Ebene Expansion, Tankradius 0,15 m, Tankhöhe 1 m, Wasserhöhe 0,6 m, 1 MPa-Entladung bei 1,5 Liter Anfangsvolumen  
Unten: Radialsymmetrische Expansion in unendlich ausgedehntem Pool, 1 MPa-Entladung bei 1,5 Liter Anfangsvolumen.  
Partikeln: Eisen, Radius 10  $\mu\text{m}$ .

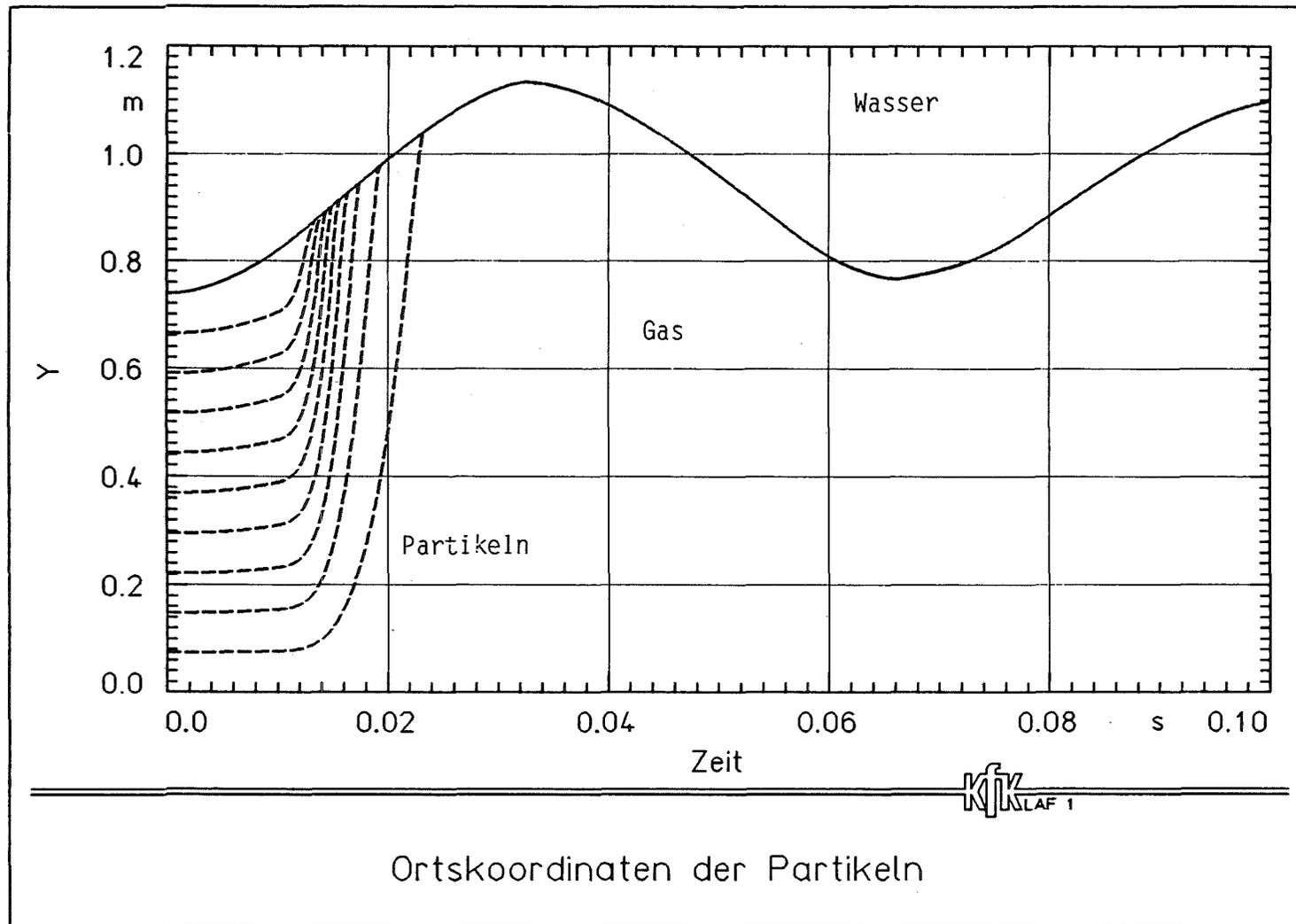


Abb. 24 : PAROGA - Rechnung für die Geometrie der 1A-Versuche. Entladungsüberdruck 1 MPa, Poolhöhe 60 cm, Eisenpartikeln mit 10  $\mu\text{m}$  Radius.

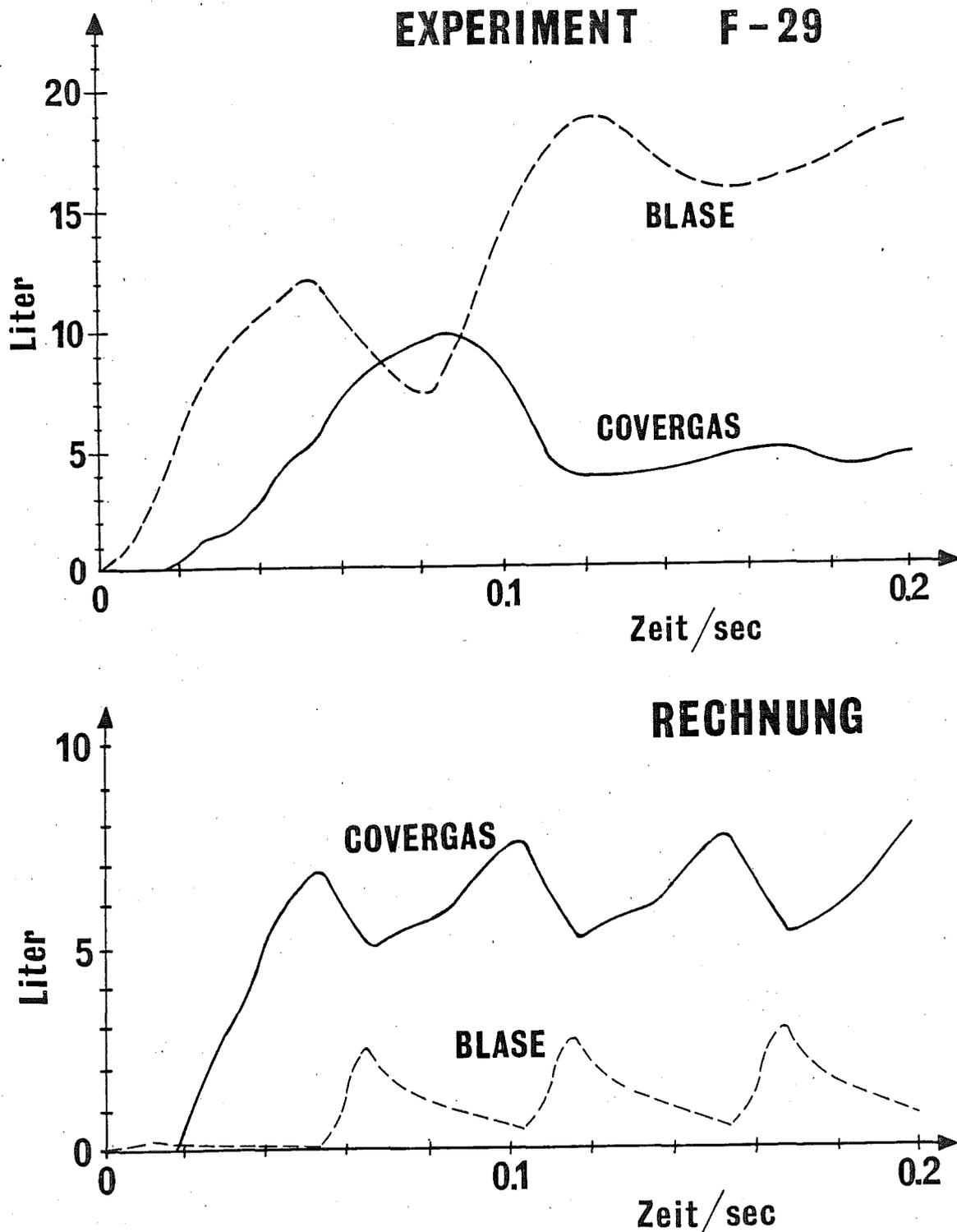


Abb. 25: Näherungsrechnungen zum Entrainment in Blase und Covergas im Vergleich zum 1A-Experiment 29. Bei den Rechnungen wurde nur das Entrainment nach Rayleigh-Taylor berücksichtigt mit Hilfe des Corradini-Modells /Kap. 2.4.3/. Außerdem wurde die Sedimentation berücksichtigt. Für das Covergas ergeben Rechnung und Experiment ein mittleres Entrainment von ca. 6 Litern. Für die Blase hingegen sind die berechneten Werte erheblich kleiner als die experimentellen.