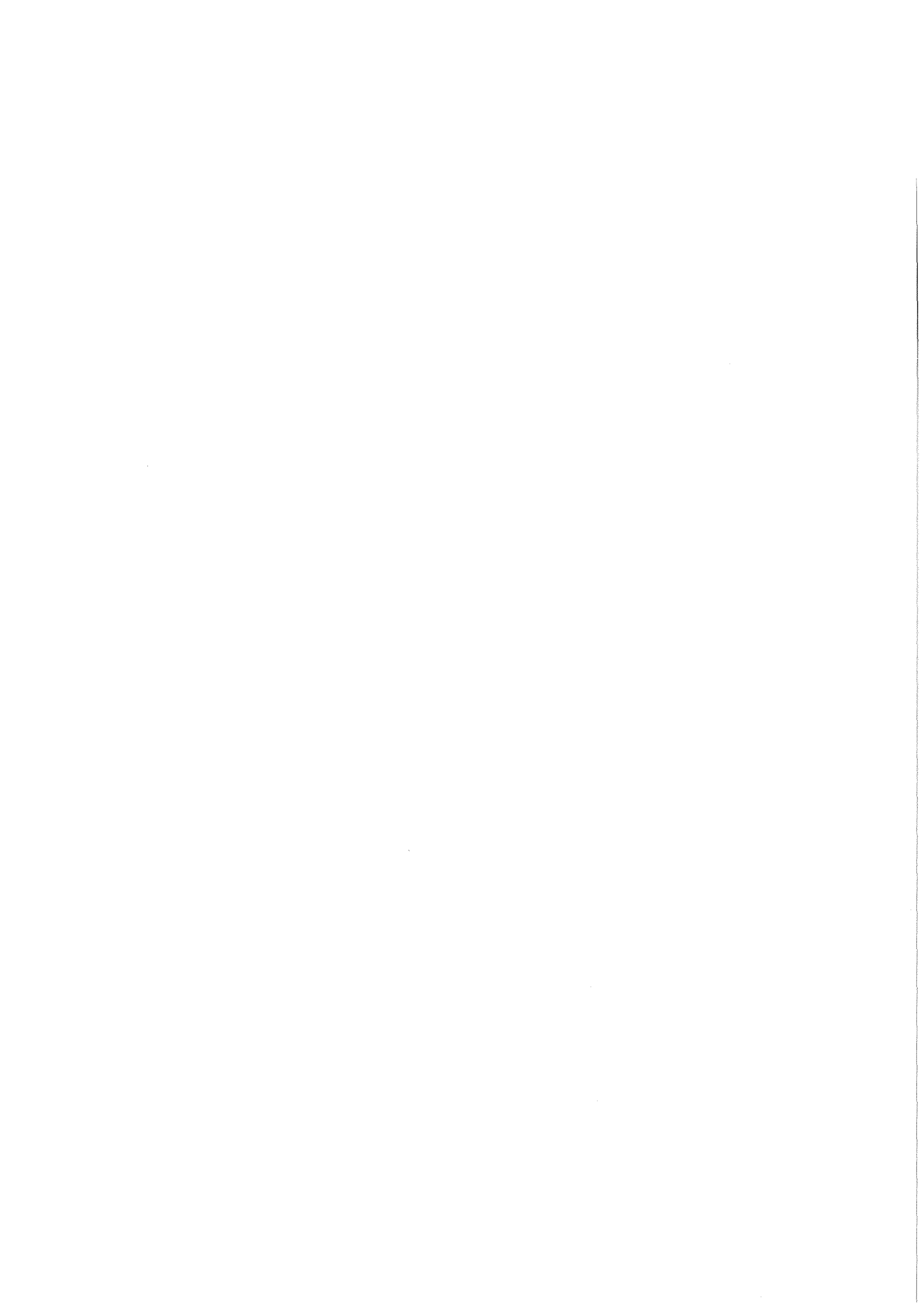


KfK 5082
Mai 1993

SNR- Quelltermexperimente mit Berstscheibenentladungen unter Natrium

J. Minges, W. Schütz
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 5082

SNR - QUELLTERMEXPERIMENTE
MIT BERSTSCHEIBENENTLADUNGEN UNTER NATRIUM

J. Minges, W. Schütz

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

ZUSAMMENFASSUNG

SNR-Quelltermexperimente mit Berstscheibenentladungen unter Natrium

Im KfK-Versuchsprogramm FAUST werden Beiträge zur Abschätzung des instantanen Quellterms bei einem SNR-Kühlmitteldurchsatzstörfall mit expandierendem Brennstoff- oder Natriumdampf geliefert. Im Vordergrund steht die - vorwiegend experimentelle - Erfassung der Rückhaltefähigkeit des Kühlmittels für Brennstoff und Spaltprodukte. Dazu ist es notwendig, das Zusammenwirken von Blasen- und Aerosolverhalten nach einer Druckentladung und den Aerosoltransport zu untersuchen.

Nach einer Serie von Wasserversuchen (FAUST-1) wurden in der Phase FAUST-2 Versuche mit Berstscheibenentladungen unter Natrium bis 500°C und 3,81 MPa durchgeführt mit den beiden Versuchsständen 2A (etwa 2 Liter Natrium) und 2B (etwa 200 Liter Natrium). Dem Argon-Druckgas wurden die Simulationsmaterialien Cs, CsI, NaI, I₂, SrO und UO₂ beigemischt. Cs war flüssig, I₂ dampfförmig, alle anderen Substanzen partikelförmig. Außer UO₂ wurde nur nichtradioaktives Material (natürliches Isotopengemisch) benutzt.

Die Rückhaltefähigkeit des flüssigen Natriums wird durch Rückhaltefaktoren RF erfaßt. Generell wird RF definiert als das Massenverhältnis aus entladener Menge und im Covergas nachgewiesener Menge der jeweiligen Substanz. Aus der Probenahme unmittelbar nach der Entladung erhält man die instantanen Werte, aus einer späteren Probenahme die verzögerten Werte. Da der Entladungsvorgang unter erhöhtem Druck abläuft, werden die beiden wichtigen Abscheidemechanismen "Impaktion infolge Massenträgheit relativ zu den Blasenoszillationen" und "Auswaschen durch Sedimentation des Flüssigkeitseintrags in Blase und Covergas (Entrainment)" wirksam. Andererseits ist das Rückhaltevermögen für Partikel, die in aufsteigenden Blasen eingeschlossen sind, deutlich kleiner.

Die 2A- und 2B-Versuche zeigten bezüglich der Rückhaltefaktoren keine gravierenden Unterschiede, obwohl sich die eingesetzte Natriummenge um 2 Größenordnungen unterschied. Die instantanen Rückhaltefaktoren RFC (Gesamt-Covergas) bei den 2A-Versuchen liegen in der Größenordnung 10⁴ bis 10⁵ für Jod und Strontium aus partikelförmigem NaI bzw. SrO, oberhalb 5 · 10³ für flüssiges Cs, bei 10³ für UO₂-Staub und bei 6 für dampfförmiges Jod aus I₂. Ein ähnliches Bild ergibt sich aus den 2B-Versuchen: Jod aus NaI und CsI hat RFC-Werte von 5 · 10³ bis 6 · 10⁵, Cäsium aus CsI um 10⁴, Strontium aus SrO von 4 · 10³ bis 2 · 10⁵, Cäsium aus flüssigem Cs 7 · 10³ und dampfförmiges Jod wieder im Bereich von 6 (bei 2B gab es keine UO₂-Versuche).

Die verzögerten Rückhaltefaktoren sind beim partikelförmigen Material oft niedriger als die instantanen Werte. Dies ist damit erklärbar, daß sich an die Druckentladung noch eine längere Phase mit aufsteigenden kleinen Gasblasen anschließt, die einen verstärkten Beitrag zum Partikeltransport durch den Pool leisten können. Beim

dampfförmigen Jod hingegen sind die Rückhaltefaktoren zeitlich konstant oder ansteigend.

Die Natriumkonzentration im Covergas (Dampf und Aerosol) vor der Entladung war bei 500°C Pooltemperatur in der Größenordnung von 10 g / m³. Unmittelbar nach der Entladung war die Covergaskonzentration erheblich höher: Bei 2B wurden Werte bis 360 g / m³, bei 2A sogar bis 977 g / m³ gemessen. Diese Konzentrationen können nur transient existieren; die hohe Sedimentationsrate bewirkt gleichzeitig ein hohes Maß an Abscheidung.

Die Entladungsvorgänge sind mit Druckspitzen und Schwingungen des "Natriumkolbens" sowie damit korrelierten Entrainmentprozessen verbunden. Der Schwingungsvorgang hat typischerweise eine Schwingungsdauer von 70 ms und endet nach ca. 0,3 bis 0,5 s.

Die Mechanik des Entladungsvorgangs sowie die Partikelabscheidung durch Impaktion konnte mit dem Rechenprogramm PAROGA modelltheoretisch untersucht werden. Eine relativ gute Übereinstimmung mit den Experimenten ergibt sich bei der Schwingungsdauer und bei der Anzahl der Schwingungen. Die völlige Partikelabscheidung durch Impaktion erfolgt oft schon während der ersten Schwingung.

Der wesentlich umfangreichere BERTA-Code wurde auf die geometrischen Randbedingungen der FAUST-Versuche abgeändert und am Beispiel des Versuchs 304 verifiziert. BERTA berechnet die hydrodynamischen und thermodynamischen Vorgänge bei der Entladung, allerdings unter Verwendung einer UO₂-Dampf-Quelle. Berechnete und gemessene Schwingungsperioden stimmen gut überein.

ABSTRACT

LMFBR Source Term Experiments with Rupture Disk Discharge under Sodium

In the frame of the KfK research program FAUST, contributions are given to the assessment of the instantaneous source term in case of an LMFBR loss-of-flow accident with expanding fuel or sodium vapour. The main goal of the program is to achieve information, mainly by experiments, on the retention capability of the primary sodium pool for fuel and fission products. For that purpose, it is necessary to investigate the interaction of bubble and aerosol behaviour after a pressure discharge, and the subsequent aerosol transport.

After a series of water tests (FAUST-1), rupture disk discharge tests under 500°C sodium up to 3.81 MPa were performed during the phase FAUST-2 with the two test facilities 2A (about 2 liters of sodium) and 2B (about 200 liters of sodium). The discharge tests were performed with pressurized argon gas and admixtures of the simulation materials Cs, CsI, NaI, I₂, SrO, and UO₂. Cs was a liquid, I₂ vapour, and all other substances solid particles. Besides UO₂, non-radioactive material was used (natural isotopes).

The retention capability of liquid sodium is expressed by retention factors RF. In general, RF is defined as the mass ratio of discharged amount, and the amount which is detected in the cover gas for the relevant species. From sampling immediately after the discharge, the instantaneous retention factors are deduced. From retarded sampling, the 'delayed factors' follow.

High pressure discharge creates two important removal mechanisms, namely 'impaction by inertia relative to the bubble oscillations' and 'wash-out by sedimentation of entrained sodium droplets'. On the other hand, the retention of particles enclosed in a buoyantly rising bubble is significantly smaller.

Concerning retention factors, the 2A and 2B tests did not show significant differences, although the amounts of sodium differed by two orders of magnitude. The instantaneous factors RFC (for total cover gas) from the 2A tests are of the order of 10^4 to 10^5 for iodine and strontium from particulate NaI and SrO, above $5 \cdot 10^3$ for liquid Cs, near 10^3 for UO₂ dust, and near 6 for I₂ vapour. Results from the 2B tests are similar: iodine from NaI and CsI has RFC from $5 \cdot 10^3$ to $6 \cdot 10^5$, cesium from CsI near 10^4 , strontium from SrO between $4 \cdot 10^3$ and $2 \cdot 10^5$, cesium from liquid Cs $7 \cdot 10^3$, and iodine vapour again in the proximity of 6 (no UO₂ tests were performed during 2B).

The delayed retention factors are, in case of particulate materials, often smaller than the instantaneous values. This may be explained by the fact that the discharge causes a subsequent phase of buoyantly rising small bubbles which contribute to particle transport through the pool. In case of iodine, however, the factors are constant or rising.

The cover gas sodium concentration (vapour or aerosol) before the discharge was of the order of 10 g / m^3 at 500°C pool temperature. Immediately after the discharge, the concentration was much higher: up to 360 g / m^3 at 2B, and even up to 977 g / m^3 at 2A. Such concentrations can only exist during a transient state; the large sedimentation rate creates a large potential for removal of particles.

The discharge is connected to pressure pulses and oscillations of the 'sodium piston'. The oscillations exhibit a period of typically 70 ms, ending after 0.3 to 0.5 s.

The mechanics of the discharge process as well as the removal of particles by impaction was investigated theoretically using the PAROGA code. A fairly good agreement with experiments has been achieved concerning the oscillation period and the number of oscillations. Very often, a complete removal of particles by impaction occurs during the first oscillation.

The more elaborate BERTA code has been adjusted to the FAUST boundary conditions and applied to 2B test No. 304. BERTA calculates the hydrodynamical and thermodynamical processes during the discharge, however, by the use of an UO₂ vapour source. We have good agreement between measured and calculated oscillation periods.

<u>INHALT</u>	<u>SEITE</u>
1. EINLEITUNG	1
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	4
3. RÜCKBLICK AUF DIE WASSERVERSUCHE	6
4. EXPERIMENTELLE PROBLEME BEIM ÜBERGANG AUF NATRIUM	7
5. DER VERSUCHSSTAND FAUST - 2A	8
6. PARAMETER DER FAUST - 2A - VERSUCHE, SIMULATIONSMATERIALIEN	10
6.1 Technische Parameter	10
6.2 Physikalische Parameter	10
6.3 Eigenschaften der Simulationsmaterialien	11
7. ANMERKUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER 2A - VERSUCHE	12
7.1 Die einzelnen Zustände bei der Versuchsdurchführung 2A	12
7.2 Rückhaltefaktoren, Natriumkonzentration	12
7.3 Chemische Analytik	13
8. ERGEBNISSE DER FAUST - 2A - VERSUCHE	14
8.1 Technische Ergebnisse	14
8.2 Rückhaltefaktoren	14
8.3 Natriumfreisetzung, Konzentration im Covergas	16
8.4 Drucksignale	17
9. MODELLRECHNUNGEN ZUM NATRIUMVERHALTEN BEI FAUST - 2A	18
10. DER VERSUCHSSTAND FAUST - 2B	19
11. ZUR DURCHFÜHRUNG DER FAUST - 2B - VERSUCHE	23
11.1 Natriumbehandlung	23
11.2 Die Berstscheibenentladung	24
11.3 Versuchsstreuung, Datenerfassung, Probenahme	24
11.4 Der "Instantane Quellterm" im Experiment	25
11.5 Die einzelnen Zustände bei der Versuchsdurchführung	26

12.	PARAMETER DER FAUST - 2B - VERSUCHE	28
13.	AUSWERTUNG DER FAUST - 2B - VERSUCHE	29
13.1	Vorbemerkungen	29
13.2	Definition der Rückhaltefaktoren	29
13.3	Instantane und verzögerte Rückhaltefaktoren	30
13.4	Computer-Auswerteprogramm	31
13.5	Anmerkungen zur Natrium- bzw. Aerosolkonzentration im Covergas	32
13.6	Anmerkungen zur Untergrundkorrektur	33
13.7	Die chemische Analytik	33
13.8	Die obere Grenze des Rückhaltefaktors aus der analytischen Nachweisgrenze	33
14.	ERGEBNISSE DER FAUST - 2B - VERSUCHE	34
14.1	Vorbemerkungen	34
14.2	Cäsium-Rückhaltefaktoren	34
14.3	Jod-Rückhaltefaktoren	35
14.4	Strontium-Rückhaltefaktoren	36
14.5	Natrium: Freisetzung und Konzentration im Covergas	36
14.6	Abhängigkeit der Natriumfreisetzung und der Rückhaltefaktoren von Versuchsparametern	37
14.7	Drucksignale und Schwingungen während der Entladung	37
15.	MODELLRECHNUNGEN ZUM NATRIUMVERHALTEN BEI FAUST - 2B	39
15.1	PAROGA-Rechnungen	39
15.2	BERTA-Rechnungen	39
16.	ZUSAMMENFASSUNG, DISKUSSION, AUSBLICK	41
	DANKSAGUNG	44
	LITERATUR	45
	TABELLEN	48 - 63
	ABBILDUNGEN	64 - 92

ANHANG I:

Zusammenstellung wichtiger Gleichungen zur Behandlung aufsteigender Blasen, expandierender Blasen, Entrainment und Partikelverhalten als Grundlage der PAROGA-Rechnungen.

ANHANG II:

FAUST-2B-Versuche: Versuchsparameter und aufgesammelte Mengen in den Sammelbehältern bei den Versuchen 301 - 314 (Ausdrucke des FAUST-Auswerteprogramms).

1. EINLEITUNG

Bei den Sicherheitsanalysen und -maßnahmen für Schnelle Natriumgekühlte Brutreaktoren (SNR) spielt traditionell der hypothetische Unfall mit Kernzerstörung (hypothetical core disruptive accident - HCDA) eine große Rolle [1.1]. Schnelle Reaktoren haben die Eigenschaft, daß das Corematerial nicht in der reaktivsten Konfiguration angeordnet ist. Bewegungen und Verlagerungen des Corematerials (Brennstoff/Natrium/Stahl) während des Unfallablaufs können zu einer Leistungserhöhung und im Extremfall zu einer schweren Leistungsexkursion führen. Konsequenterweise hat man in der Vergangenheit nicht nur große Vorsichtsmaßnahmen ergriffen zur Verhinderung von Bedingungen, die zu einem solchen Unfall führen, sondern man hat auch umfangreiche Untersuchungen vorgenommen zur Abschätzung der Konsequenzen eines solchen Unfalls [1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6].

Der Unfall kann eintreten, wenn es zu einem Mißverhältnis zwischen Reaktorleistung und Kühlmitteldurchsatz gekommen ist. Analysen des Kühlmitteldurchsatzstörfalles ULOF (Unprotected Loss-of-Flow, d.h. alle primären Kühlmittelpumpen versagen und alle Reaktor-Abschaltsysteme versagen) haben gezeigt, daß es unter pessimistischen Annahmen zu einer transienten Aufheizung (Leistungsexkursion) des Cores kommen kann, die zum Aufschmelzen und zur teilweisen Verdampfung des Brennstoffs führt. Die Leistungsexkursion, die mit einer Kernzerlegung unter Freisetzung mechanischer Energie endet, läuft in einer Zeitskala von Millisekunden ab.

Das heiße Zweiphasengemisch aus Brennstoff und Stahl expandiert durch die oberen Kernstrukturen in den Natriumpool im oberen Plenum. Dabei wird die thermische Energie des Brennstoff-Stahl-Gemisches auf das Natrium übertragen. Das Natrium verdampft, und im Pool bildet sich die "HCDA-Blase" [1.7].

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 Natriumdampf, Brennstoffdampf sowie Kondensationsaerosole, fragmentierte Brennstoffpartikeln und Natriumtröpfchen aus Entrainmentprozessen (Eintrag von flüssigem Natrium in die Blase). Sie kann im Natriumpool kondensieren oder durch den Pool hindurch bis zum Schutzgasvolumen aufsteigen. Im letzteren Fall wird radioaktives Material in das Schutzgasvolumen und bei Leckagen auch in das Reaktorgebäude freigesetzt. Damit ist offensichtlich, daß der Behandlung der Quelltermproblematik beim Unfallgeschehen eine ganz besondere Rolle zukommt.

Die unmittelbar nach der Leistungsexkursion aus den Deckelleckagen austretende Aktivitätsmenge bezeichnet man als "instantanen radiologischen Quellterm S_0 ". Im Falle des SNR-300 war S_0 die Menge an Brennstoff, Spaltprodukten und Natrium, die

aus den Tankdeckelleckagen in das innere, inertisierte Containment freigesetzt würde. Weitere "verzögerte" Quellterme, die im Vergleich zu S_0 über einen langen Zeitraum effektiv sind, können folgen [1.8], 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. Die in dem Bericht beschriebenen Arbeiten beziehen sich aber ausschließlich auf den instantanen Quellterm 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 gab 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.) unter realistischen Bedingungen zur Zeit noch keine ausreichende Information und ist daher auf konservative Abschätzungen angewiesen.

In Deutschland hat man umfangreiche Risikostudien für den SNR-300 durchgeführt; z.B. wurde in der Risikostudie der GRS für den SNR-300 [1.9] ein Rückhaltefaktor von 6 für Partikeln in der Blase angenommen. Analoge Studien für den EFR stehen aber noch aus.

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 gliederte sich zunächst in die Phasen FAUST-1 (Berstscheibenentladungen unter Wasser) und FAUST-2 (Berstscheibenentladungen unter Natrium). Die Wasserversuche (d.h. es wurde Wasser als Poolmedium verwendet) hatten orientierenden Charakter. Es sollten wichtige Phänomene erkannt und verstanden werden, die bei der Entladung eines Partikel-Gas-Gemisches in einen Flüssigkeitspool auftreten. Mit den Natriumversuchen wurde ein wesentlicher Schritt zur Übertragbarkeit auf Reaktorbedingungen und realistische Materialien unternommen.

Das Hauptanliegen der FAUST-Experimente kann man relativ einfach beschreiben: Es wird eine definierte Substanzmenge unter hohem Druck in einen Wasser- bzw. Natriumpool entladen. Unmittelbar danach wird das Schutzgasvolumen oberhalb des Pools auf seinen Anteil an dieser Substanz untersucht. Das Verhältnis aus der

entladene Menge und der Menge, die in das Schutzgas gelangt ist, wird als Rückhaltefaktor RF bezeichnet und ist ein Maß für die Rückhaltefähigkeit des Pools. Meist handelt es sich hier um einen Wert, der größer als 1000 ist und somit die hohe Rückhaltefähigkeit des Pools dokumentiert.

Die Wasserversuche wurden ausführlich in einem KfK-Bericht beschrieben [1.10]. Dieser Bericht enthält auch eine Darstellung der theoretischen Grundlagen. Der vorliegende Bericht ist eine Dokumentation der Natriumversuche FAUST-2 mit Berstscheibenquellen. Sie bestanden aus der Phase 2A in kleinerem Maßstab, durchgeführt 1984 - 1985, und der Phase 2B in größerem Maßstab, durchgeführt 1986 - 1989. Bei diesen Versuchen wurde die unter hohem Druck ablaufende Entladung des Corematerials durch Berstscheibenentladungen von maximal 4 MPa in einen Natriumpool mit typischerweise (2B) 200 Liter bei 500°C nachvollzogen. Simulationsmaterial für Spaltprodukte waren inaktives SrO, NaI, CsI, I₂ und Cs. Bei den 2A-Versuchen wurde auch UO₂-Pulver entladen. Mit dieser Auswahl lassen sich Ergebnisse für die Spaltproduktgruppen "leichtflüchtig" und "schwerflüchtig" ableiten.

Zwischenergebnisse sind in der Fachliteratur bereits veröffentlicht worden [1.11, 1.12]. Die relativ lange Zeitspanne für die Versuche ist darauf zurückzuführen, daß das Versuchsprogramm NACOWA zum EFR-Schutzgasaerosol [1.13] alternierend mit FAUST am gleichen Versuchsstand durchgeführt wird und vorübergehend höhere Priorität hatte.

Die prinzipielle Anordnung für alle FAUST-Versuche, bestehend aus Quelle, Pool, Schutzgas und Deckel mit Leckagen ist in Abb. 1.1 dargestellt.

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Wichtige theoretische Grundlagen und Vorüberlegungen wurden bereits in dem Bericht zu den Wasserversuchen [1.10] ausführlich beschrieben. An dieser Stelle soll keine Wiederholung, sondern nur eine stichpunktartige Auflistung der Themen erfolgen:

Die Aerosolbildung in der "Blase" ist auf kondensierenden Brennstoff- und Spaltprodukt Dampf (siehe ORNL-FAST-Experimente [2.1, 2.2] und KfK-TUNA-Experimente [2.3]), auf Fragmentierung des flüssigen Brennstoffes während der Beschleunigungsphase [2.4], auf Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung [2.5] und auf Entrainmentprozesse zurückzuführen. Dabei entstehen Partikel im Größenbereich von $0,001\mu\text{m}$ bis $100\mu\text{m}$.

Den Blasenaufstieg kann man nach der Theorie von Davies und Taylor [2.6] behandeln. Eine vereinfachte Theorie zur Partikelabscheidung in einer aufsteigenden Blase findet man bei Fuchs [2.7]. Zur Beschreibung der Blasenexpansion können die beiden Grenzfälle "Ebene Expansion" und "Radiale Expansion" herangezogen werden. Im ersten Fall betrachtet man einen Flüssigkeitskolben mit ebenen Grenzflächen, der zwischen zwei Gasvolumina (Blase und Schutzgas) oszillierende Bewegungen ausführt. Im zweiten Fall wird eine kugelförmige oder halbkugelförmige Expansion angenommen, die sich durch die Rayleigh-Gleichung beschreiben läßt. Beiden Expansionstypen ist gemeinsam, daß sie infolge Kompression und Gegenexpansion des Schutzgases zu Oszillationen führen können mit Schwingungsdauern, die bei den geometrischen Randbedingungen der FAUST - Versuche in der Größenordnung von 100 ms liegen.

Eine wichtige Rolle spielt das Entrainment, also der Flüssigkeitseintrag aus dem Pool in die Blase bzw. in das Schutzgas. Der am häufigsten betrachtete Prozeß ist das Entrainment durch Rayleigh - Taylor - Instabilitäten [2.8]. Ein Modell zur Berechnung der Entrainmentrate wurde von Corradini [2.9] aufgestellt.

Das Partikelverhalten während der Expansionsphase und während der Oszillationen wird beeinflusst durch die Bewegung der Trennfläche zwischen Gas und Flüssigkeit. Luftgetragene Partikel in einem Gasvolumen, das sich extrem schnell ändert, können aufgrund ihrer Massenträgheit nicht der Bewegung der Trennfläche folgen. Daher besteht die Möglichkeit, daß es zur Impaktion und Abscheidung an der bewegten Trennfläche kommt.

Im Rahmen des Rechenprogramms PAROGA [2.10, 2.11, 2.12] wurde ein relativ einfaches, eindimensionales Modell zur Berechnung der Bewegung und eventuellen Abscheidung von Partikeln in einem rasch oszillierenden Gasvolumen aufgestellt, wobei die wesentliche Gleichung für die lineare Partikelbewegung aus dem quadratischen Widerstandsgesetz folgt.

Insgesamt kann man fünf Mechanismen auflisten, die zur Partikelabscheidung in expandierenden und aufsteigen Blasen führen, nämlich

- Impaktion an der rasch oszillierenden Trennfläche (Expansionsphase),
- Auswaschen durch Entrainment-Tropfen (vorwiegend Expansionsphase),
- Trägheitsdeposition an der Blasenoberfläche infolge der internen Gaszirkulation (Aufstiegsphase),
- Diffusion zur Oberfläche (Aufstiegsphase) und
- Sedimentation durch Schwerkraft (vorwiegend Aufstiegsphase).

Der ursprünglichen Versuchsplanung lagen Analysen für den SNR-300 zugrunde. Die FAUST-Versuchsstände wurden allerdings so ausgelegt, daß viele Parameter variiert werden können und eine Anwendung auf andere Reaktoren, z.B. den EFR, möglich ist. Es wurde also in keinem Fall eine starre maßstäbliche Verkleinerung eines bestimmten Typs geschaffen. Für das Mark 1A-Core des SNR-300 ergab sich nach [1.2] beim energetischen Grenzfall, der unter sehr pessimistischen Annahmen abgeleitet wurde, daß 98% des Brennstoffes aufschmilzt, wobei Temperaturen bis 5000 K und Brennstoffdampfdrücke bis 74 bar erreicht werden. Das heiße Zweiphasengemisch (gasförmig/ flüssig) expandiert durch die oberen Kernstrukturen in den relativ kalten (500°C) Natriumpool unter Bildung einer Brennstoffdampfblase. Thermische Energie wird unter Bildung von Natriumdampf auf das Natrium übertragen. 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.

Von einer gewissen Bedeutung für die FAUST-Versuche ist der bei INTERATOM erstellte BERTA-Code (Blasenexpansion im Reaktortank) [2.13, 2.10, 2.12]. Dieser Code wurde entwickelt mit dem Ziel, die mechanische Belastung des Reaktortanks und die Größe des instantanen radiologischen Quellterms im Anschluß an einen hypothetischen Kernzerlegungsstörfall unter den Bedingungen des projektierten SNR-2 abschätzen zu können. Im Vordergrund steht hierbei die Modellierung der Expansion und des Aufstiegs von Gasblasen infolge einer durch Brennstoffdampf getriebenen Coreentladung. In Kap. 15 wird im Zusammenhang mit Vergleichsrechnungen noch einmal näher auf diesen Code eingegangen.

Wichtige Gleichungen zur Beschreibung des Partikelverhaltens während der Expansionsphase und der Aufstiegsphase (Grundlage des PAROGA-Codes) sind im Anhang zusammengestellt.

3. RÜCKBLICK AUF DIE WASSERVERSUCHE

Bei den Wasserversuchen [1.10] wurde durch definiertes Anstoßen einer Umkehrberstscheibe von 5 cm Durchmesser ein Stickstoff-Partikel-Gemisch (Fe- oder Ni-Staub, Korngröße von 1 - 100 μm variiert) aus einem 1,45 Liter Druckbehälter mit maximalem Entladungsdruck von 4 MPa in einen zylindrischen Wasserpool von 30 bzw. 60 cm Durchmesser und maximaler Poolhöhe 90 cm bei Raumtemperatur entladen. Partikeln, die das Gasvolumen oberhalb des Pools erreichten, wurden magnetisch im Gasvolumen oder auf Filtern außerhalb des Tanks aufgefangen. Wichtige Beobachtungsinstrumente waren Hochgeschwindigkeitskameras und Druckaufnehmer mit Transientenrecordern. Meist wurden die entladenen Partikeln sehr effektiv im Wasser zurückgehalten. Für den Rückhaltefaktor ergab sich typischerweise $RF > 10^4$, d.h. im Gasvolumen waren nach der Entladung innerhalb der Meßgenauigkeit keine Partikeln nachzuweisen. Impaktionsprozesse während der heftigen Blasenoszillationen sowie Auswaschvorgänge durch die entrainierten Flüssigkeitströpfchen im Pool und im Gasvolumen erwiesen sich als die entscheidenden Partikelabscheidemechanismen. Die aus den Leckagen austretende Wassermenge war unter 2 MPa sehr gering, stieg dann aber überproportional mit dem Druck an. Mit Hilfe relativ einfacher Modellannahmen (adiabatisch oszillierender Wasserkolben zwischen zwei Gasvolumina und Berücksichtigung des Entrainments) konnte mit Hilfe des Rechenprogramms PAROGA [2.12] eine Reihe von Phänomenen quantitativ verstanden werden, insbesondere die Periode der Oszillationen und die Relativbewegung der Partikeln, die zur Abscheidung infolge Impaktion führt.

Eine wichtige Folgerung aus den Wasserversuchen war, daß zwischen dem Partikeltransport in einer stabilen, aufsteigenden Blase und in einer durch Druckentladung erzeugten "Blase" (genauer: Mehrphasengemisch mit rasch wechselndem Volumen) sehr genau zu unterscheiden ist. Die stabile, aufsteigende Blase kann einen beachtlichen Teil des eingeschlossenen Materials transportieren. Dies hängt von der Blasengröße und von der Größe der eingeschlossenen Partikeln ab. Bei der Druckentladung hingegen werden zwei sehr effektive Abscheidemechanismen wirksam, nämlich die Impaktion infolge heftiger Volumenoszillationen und das Auswaschen durch Poolflüssigkeitstropfen, die bei Beschleunigungsprozessen in das Gasvolumen eingetragen werden (Entrainment). Außerdem wird auch das Schutzgas mit Entrainmenttropfen vermischt.

Theoretische Ergebnisse zur Partikelabscheidung in stabilen, aufsteigenden Blasen, basierend auf der vereinfachten Theorie von Fuchs [2,7] sowie Ergebnisse von PAROGA-Rechnungen, die die Impaktionsprozesse berücksichtigen, wurden in ihrer Relation zu den FAUST-Versuchen u.a. in [2.10, 2.11, 2.12, 2.14] publiziert.

In Abb. 3.1 ist zur Verdeutlichung das Prinzip des Wasserversuchsstandes dargestellt. Zwei Momentaufnahmen einer 1 MPa-Druckentladung mit Stickstoff und Eisenpartikeln in einen Wasserpool, die einem Hochgeschwindigkeitsfilm entnommen wurden, werden in den Abbildungen 3.2 und 3.3 gezeigt.

4. EXPERIMENTELLE PROBLEME BEIM ÜBERGANG AUF NATRIUM

Der Übergang auf Natrium bei 500°C als Poolmedium wirft die folgenden experimentellen Schwierigkeiten auf:

- Die Berstscheiben müssen auch bei 500°C noch zuverlässig und ohne nennenswerte Erniedrigung ihres Ansprechdrucks einsetzbar sein. Außerdem müssen sie trotz des anstehenden Natriums den gesamten Querschnitt freigeben.
- Ebenso müssen die Druckaufnehmer den direkten Kontakt mit Natrium und die hohe Temperatur aushalten.
- Dichtungen, an denen das Natrium ansteht, sind leider unvermeidlich. Sie müssen die Dichtheit der vorhandenen Flanschverbindungen bei den gegebenen Belastungen gewährleisten (Natrium, hohe Temperaturen, mechanische Belastung während der Druckentladung).
- Die Ventile müssen unter den extremen Bedingungen getestet werden. Dies gilt vor allem für pneumatische ferngesteuerte Klappenventile.
- Bei den Wasserversuchen konnte man den Entladungsvorgang mit Hochgeschwindigkeitskameras filmen. Bei den Natriumversuchen muß man auf indirekte Rückschlüsse aus Drucksignalen und evtl. Ultraschallmessungen ausweichen.
- Bei den Wasserversuchen war der Entladungsvorgang zeitlich genau definiert: Die Berstscheibe wurde mit einer Metallspitze angestoßen, was zum augenblicklichen Umklappvorgang führte. Bei den Natriumversuchen muß man -um bewegliche Durchführungen nach außen zu vermeiden- das Hochdruckvolumen allmählich bis zum Berstdruck auffüllen. Die Daten müssen dann vollautomatisch erfaßt werden, wobei z.B. der Druckanstieg im Poolbehälter als Triggersignal benutzt wird.

Aus all diesen Gründen erschien es uns notwendig, vor dem Bau des geplanten Natrium-Versuchsstandes im technischen Maßstab mit ca. 300 Litern Natrium (FAUST 2B) einen kleineren Teststand (FAUST-2A) zu errichten. Das Hauptziel der 2A-Versuche war die Erprobung der Komponenten und des Verfahrens. Einige Versuche konnten aber auch im Hinblick auf die Rückhaltefaktoren ausgewertet werden. Die FAUST-2A-Tests wurden 1984/85 durchgeführt.

5. DER VERSUCHSSTAND FAUST - 2A

Dieser Versuchsstand wurde für den Komponententest unter Natriumbedingungen errichtet, aber auch zur Bestimmung von Rückhaltefaktoren in kleinerem Versuchsmaßstab. Im Hinblick auf spätere Modellrechnungen handelte es sich um einen "ein-dimensionalen" Aufbau, denn Quellbehälter, Berstscheibe und Poolzylinder hatten den einheitlichen Durchmesser von 10 cm.

In seiner Ursprungsausführung bestand der Versuchsstand aus einem Druckbehälter (Volumen 1,45 Liter) mit Inconel-Berstscheibe (Durchmesser 10 cm) und Einsatzkorb zur Aufnahme von pulverförmigem Material (z.B. UO_2 , NaI, SrO), einem darüberliegenden Poolzylinder (Durchmesser 10 cm, Höhe 85,5 cm) zur Aufnahme des Natriums, einem Entspannungstopf (Volumen 7,69 Liter) und einem Natrium-Auffangbehälter (Volumen 3 Liter). Zwischen Druckbehälter und Auffangbehälter sowie zwischen Poolbehälter und Entspannungstopf befand sich je ein pneumatisch betätigtes Klappenventil. Der Poolzylinder besaß eine Ultraschall-Meßeinrichtung mit insgesamt 6 Sender / Empfänger-Paaren für kontinuierlichen Betrieb und 12 Koppelstäben (Edelstahl, 40 cm lang), um die Schwingquarze aus der beheizten Zone herauszubringen (sie durften nur mit max. 70°C belastet werden). Der Poolzylinder sowie der Druckbehälter waren für 4 MPa Überdruck und 500°C ausgelegt, der Ablaufbehälter und der Entspannungstopf für 0,8 MPa bzw. 0,5 MPa. Der Druckbehälter, der Poolzylinder sowie die beiden pneumatischen Ventile wurden elektrisch beheizt. Zur Überwachung wurden mehrere Thermoelemente eingebaut. Als Dichtungsmaterial wurden Helicoflex-Dichtungen oder Nickel-Graphit-Dichtungen verwendet; beide Typen haben sich unter Natrium bewährt. Durch die Verwendung von Krautzrohrverschraubungen war eine bequeme Zerlegung und Reinigung der Anlage nach einem Versuch möglich. In dem Natrium-Auffangbehälter stand eine herausnehmbare "Wegwerfbüchse", die nach dem Versuch das gesamte Natrium aufnehmen konnte (außer Restablagerungen und dem Anteil im Entspannungsgefäß).

Während des anfänglichen Versuchsbetriebes, z.T. noch mit Wasser als Poolmedium, zeigte sich sehr bald, daß einige Änderungen durchzuführen waren. Insbesondere war das Öffnungsverhalten der Berstscheiben unbefriedigend, denn die Öffnung des vollen Querschnitts wurde nicht erreicht.

Um ein vollständiges Öffnen der Berstscheibe unter Natrium zu ermöglichen, wurde auf Empfehlung der Herstellerfirma der Druckbehälter von 1,45 Liter auf 5,5 Liter vergrößert. Dies machte die Vergrößerung des Entspannungsvolumens von 7 Litern auf 24,5 Liter notwendig; dazu wurde ein zweiter Entspannungsbehälter nachgeschaltet. Leider brachte diese Maßnahme nicht den gewünschten Erfolg. So wurde schließlich eine "Doppelberstscheibe" eingebaut. Sie bestand aus der ursprüngli-

chen Inconel-Berstscheibe mit Haltering (wahlweise Wölbung in Druckrichtung oder gegen die Druckrichtung), einem Zwischenring und darüber einer in einem Haltering gehaltenen dünnen Edelstahlfolie (20 μm). Mit dieser Konstruktion öffnete sich die Berstscheibe nicht mehr direkt gegen das Natrium, das ihr einen erheblichen Widerstand entgegenbrachte, sondern in ein (evakuierbares) Zwischenvolumen von 0,75 Litern. Danach traf der volle Druck auf die dünne Edelstahlfolie, die augenblicklich im vollen Querschnitt abriß. Abb. 5.1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau im Endstadium. Das Einbringen von Partikeln wurde durch die Doppelberstscheibe vereinfacht: Sie konnten direkt auf die untere Berstscheibe aufgegeben werden, als Schutz gegen seitliches Verrutschen durch einen dünnen Edelstahlring zusammengehalten. Für Versuche mit Cäsium und Jod wurde der "Korb" im Druckbehälter mit einem oberen Prallblech mit Dorn versehen. Das in einer Glaskugel eingeschmolzene Material wird im Augenblick der Entladung nach oben geschleudert. Beim Auftreffen auf den Dorn wird die Glaskugel zerstört und das darin befindliche Material freigesetzt (siehe dazu Abb. 5.2 und 5.3).

Die Versuche wurden typischerweise mit einer 1 MPa-Berstscheibe bei 500°C durchgeführt, wobei der Poolbehälter und der Quellbehälter näherungsweise auf gleicher Temperatur waren, die Entspannungsbehälter allerdings auf Raumtemperatur gehalten wurden. Die in den Poolzylinder eingebrachte Natriummenge lag bei 2 kg. Als Druckgas im Quellbehälter wurde in allen Fällen Argon benutzt, als Schutzgas Argon bei Natriumversuchen und Luft bei den anfänglichen Wasserversuchen. Bei den in den Quellbehälter eingebrachten Substanzen handelte es sich um NaI, SrO, UO₂, Cs und I₂. Der Berstdruck wurde durch allmähliches Hochfahren des Druckes im Quellbehälter erreicht. Nach dem Ansprechen der Berstscheibe wurden die Druck- und Ultraschallsignale vollautomatisch erfaßt. Hierzu waren ein Rechner und ein Multiprogrammer sowie parallel zwei Transientenrecorder angeschlossen. Die Gaszufuhr wurde automatisch unterbrochen. Zur Druckentlastung wurde das pneumatische Ventil oberhalb des Pools kurz nach der Entladung geöffnet. Dabei strömte das Gas aus dem heißen Poolbehälter in den kalten Entspannungstopf und führte einen großen Teil der zu dieser Zeit noch gasgetragenen Mengen (Na-Aerosol, mitgeführte Partikeln) mit. Diese wurden an den Wänden des Entspannungstopfes abgeschieden und später herausgewaschen und analysiert.

Während der Versuche stellte sich heraus, daß die Dichtheit der Klappenventile unzureichend war, insbesondere bei hohen Temperaturen. Auch nach mehreren Reparaturen (Auswechseln der Dichtungen etc.) ergab sich keine wesentliche Besserung. Daher wurde meist auf die Evakuierung des Entspannungsgefäßes bei 500°C heißem Natrium verzichtet, um einen Druckabfall im Natriumzylinder mit erhöhter Natriumverdampfung zu vermeiden. Der Entspannungsvorgang erfolgte also bei der späteren Versuchsphase gegen Atmosphärendruck in den Entspannungsgefäßen.

6. PARAMETER DER FAUST-2A-VERSUCHE, SIMULATIONSMATERIALIEN

6.1 Technische Parameter

Insgesamt haben 16 Versuche stattgefunden. Sie haben die Seriennummer 200 erhalten zur Unterscheidung von den früheren Wassersuchen (Serie 100) und den späteren 2B-Versuchen (Serie 300).

Zunächst war, wie in Abschnitt 4 und 5 bereits dargestellt, die Komponentenerprobung ein wichtiges Ziel. Die Versuche 201 - 209 dienten hauptsächlich diesem Zweck. Es wurde der Übergang von Luft und Wasser bei Raumtemperatur auf Natrium bei 500°C vollzogen. Das größte Problem hierbei war das unvollständige Öffnen der Inconel-Berstscheibe. Es wurden verschiedene Typen mit unterschiedlicher Einbau- richtung verwendet, das Volumen des Quellbehälters vergrößert und Zwischenver- suche mit einfachen Edelstahlfolien durchgeführt, bis schließlich in Gestalt der Dop- pelberstscheibe eine sehr zuverlässige Lösung gefunden wurde. Weitere technische Parameter waren die Druckaufnehmer, die Dichtungen (Helicoflex, Nickel-Graphit, Kupfer), die Ultraschallfrequenz (100 kHz bis einige MHz), die Ventile (insbesondere Klappenventile), die Beheizung (Heizbänder bzw. Heizstäbe) und die Datenerfas- sung (Transientenrecorder und Multiprogrammer).

6.2 Physikalische Parameter

Die Möglichkeit der Parametervariation ist hier sehr groß, wenn man die Simulati- onsmaterialien für Brennstoff und Spaltprodukte einschließt. Schon allein aus Zeit- gründen konnte nur eine kleine Auswahl getroffen werden.

Der Entladungsdruck (max. 4 MPa möglich) lag zwischen 0,9 und 1,7 MPa aufgrund der Tatsache, daß nur Berstscheiben des Nenndrucks 1 MPa eingesetzt wurden. Die Poolhöhe (max. 80 cm möglich) wurde zwischen 0 und 42 cm variiert. Begrenzend war das Volumen des Natrium-Auffangbehälters. Die Pooltemperatur (max. 500°C möglich) betrug 20°C bei den Wasser-Testversuchen und 500°C (in zwei Fällen 260°C) bei den Natriumversuchen. Der Zeitpunkt der Öffnung des Klappenventils zwischen Covergas und Entspannungsvolumen zur Simulation der Leckage am Reaktordeckel lag zwischen 0 und 10 sec nach dem Ansprechen der Berstscheibe.

Als Simulationsmaterial für den Brennstoff wurde UO₂-Pulver verwendet. Eine cha- rakteristische Auswahl von Spaltprodukt-Simulationsmaterial war NaI, SrO, Cs und I₂. Die entladenen Mengen wurden im Hinblick auf die erwartete geringe Freiset- zung relativ groß gewählt und lagen im Bereich von einigen Gramm. Das Druckgas im Quellbehälter war Argon in allen Fällen. Als Covergas wurde Argon bei den Na-

triumversuchen und Luft bei den Wasser-Testversuchen benutzt. In der Tab. 6.1 sind die wichtigsten Parameter der Versuche 201 - 216 zusammengestellt.

6.3 Eigenschaften der Simulationsmaterialien

Das UO_2 -Pulver hatte eine mittlere Korngröße von $20 \mu\text{m}$. In dem durch eine Siebanalyse ermittelten Spektrum waren 4% der Partikeln kleiner als $5 \mu\text{m}$ und 11% größer als $40 \mu\text{m}$. Wegen des hohen Schmelzpunktes (2900°C) sind diese Eigenschaften bei 500°C unverändert.

Ähnliches gilt für SrO . Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigten Korngrößen zwischen 1 und $5 \mu\text{m}$. Der Schmelzpunkt liegt bei 2430°C .

Jod wurde in zwei Formen entladen, und zwar als Natriumjodid NaI und als elementares Jod I_2 . NaI ist pulverförmig, der Schmelzpunkt ist bei 651°C . Es ist hygroskopisch, wodurch die Teilchengrößenbestimmung erschwert wird. Eine Größenangabe für 500°C kann an dieser Stelle nicht gemacht werden. Der Dampfdruck bei 500°C ist ca. $0,1 \text{ Pa}$. Bei I_2 liegen völlig andere Verhältnisse vor: Schmelzpunkt $113,5^\circ\text{C}$, Siedepunkt 184°C , Dampfdruck bei 260°C ca. $0,5 \text{ MPa}$ und bei 500°C ca. 10 MPa . Die Temperatur des I_2 -Versuches wurde auf 260°C begrenzt, um den I_2 -Glasbehälter nicht vorzeitig zu zerstören.

Cäsium hat folgende Eigenschaften: Schmelzpunkt $18,5^\circ\text{C}$, Siedepunkt 690°C , Dampfdruck bei 500°C etwa 100 mm Hg bzw. $1,33 \times 10^4 \text{ Pa}$. Beim Versuch wurde also ein Flüssigmetall mit relativ hohem Dampfdruck entladen.

7. ANMERKUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER 2A-VERSUCHE

7.1 Die einzelnen Zustände bei der Versuchsdurchführung 2A

Im Hinblick auf die Auswertung werden, in Analogie zum späteren Kap. 11.5, die folgenden Zustände während der Versuchsdurchführung definiert, speziell für die Versuche 210 - 216.

Zustand 0

Hochheizen, Argondruck einstellen

Zustand 1

Die Natrium-Solltemperatur ist erreicht. Das Schutzgas steht unter leichtem Überdruck (Absolutdruck etwa 0,105 MPa). Der Entspannungsbehälter ist mit Argon gefüllt, hat 0,1 MPa und Raumtemperatur. Der Argondruck im Quellbehälter wird langsam hochgefahren.

Zustand 2 (Berstscheibe auf)

Der Ansprechdruck der Berstscheibe wurde erreicht. Die Berstscheibe öffnet sich innerhalb weniger Millisekunden. Der Druck im Quellbehälter sinkt rasch ab. Die Druckaufnehmer zeigen mehrere heftige Druckstöße. Der Druck im Versuchsbehälter steigt rasch an. Das Natrium fließt in den Quellbehälter ab.

Zustand 3 (Entspannungsvolumen auf)

Wenige Sekunden nach dem Ansprechen der Berstscheibe wird das Ventil zum Entspannungsvolumen geöffnet. Dies führt zum Druckausgleich und zum Überströmen von gasgetragenem Natrium (Dampf / Aerosol) und Simulationsmaterial in das Entspannungsvolumen. Hier kommt es zur Abscheidung an den kalten Wänden.

Zustand 4

Der Probenahmeprozess für die instantane Freisetzung ist abgeschlossen. Das Ventil wird wieder geschlossen. Die Heizungen werden abgeschaltet.

7.2 Rückhaltefaktoren, Natriumkonzentration

Der Rückhaltefaktor ist ein Maß für die Fähigkeit des flüssigen Natriums, die entladenen Simulationsmaterialien zurückzuhalten. Generell ist der Rückhaltefaktor definiert als

$$RF = \frac{\text{entladene Menge}}{\text{freigesetzte Menge}}$$

Die experimentellen Rückhaltefaktoren werden aus den Mengen an Simulationsmaterial abgeleitet, die im Entspannungsvolumen abgeschieden wurden. Es ist aber unzureichend, wenn nur der direkte Wert RFD angegeben wird, der sich aus dem Verhältnis der entladenen Menge und der im Entspannungsvolumen nachgewiesenen

Menge errechnet. Wichtig sind insbesondere die beiden erweiterten Größen RFA (Ausströmen bis auf Atmosphärendruck) und RFC (Gesamt-Covergas). Die genaue Definition dieser Größen erfolgt in Kap. 13.2 Sie werden aus der abgeschiedenen Menge errechnet unter Berücksichtigung der Druck-, Volumen- und Temperaturbedingungen im Poolzylinder und im Entspannungsgefäß. Die Rückhaltefähigkeit des Natriumpools erhält man unmittelbar aus RFC.

Es muß allerdings berücksichtigt werden, daß die freigesetzten Mengen an Simulationsmaterial oft extrem niedrig sind. So können Untergrundeffekte das Nettoergebnis empfindlich beeinflussen. Leider erlaubte der Versuchsaufbau mit nur einem Probenahmegefäß keine direkte Untergrundmessung (im Gegensatz zur späteren Serie 2B mit vier Gefäßen). Es wurde aber in Form des Versuchs 213 ein reiner Untergrundversuch ohne Simulationsmaterial durchgeführt zur Bestimmung der Blindwerte von Jod und Strontium. Mit diesen Werten kann man analog Kap. 13.2 die Faktoren RFC in die untergrundkorrigierten Faktoren RFU überführen.

Für die umfangreicheren FAUST-2B-Versuche wurde ein Computer-Auswerteprogramm erstellt, um u.a. die Rückhaltefaktoren zu berechnen (siehe Kap. 13.4). Mit einer vereinfachten Version dieses Programms (veränderte Geometrie, nur ein Sammelbehälter, keine Untergrundmessung) konnten nachträglich auch die 2A-Versuche 210 bis 216 ausgewertet werden. Die so ermittelten Werte für RFD, RFA und RFC sind in der Tabelle 8.2 zusammengestellt. Nachträglich wurden hier auch die Werte RFU eingefügt.

Zusätzlich wird aus der im Entspannungsvolumen nachgewiesenen Natriummenge die gasgetragene Konzentration (Dampf / Aerosol) im Covergas unmittelbar nach der Entladung (Zustand 2) errechnet. Die entsprechenden Wert findet man in der Tabelle 8.3.

7.3 Chemische Analytik

Die chemische Analytik bezog sich in erster Linie auf das freigesetzte Natrium und die darin enthaltenen Spurenstoffe. Der Natriumanteil wurde wie üblich durch Titration ermittelt. Die Uranspuren im Natrium wurden fluorometrisch bestimmt. Die Jod-, Strontium- und Cäsiumanalysen wurden im Institut für Radiochemie des Kernforschungszentrums durchgeführt (siehe auch "Danksagung"), und zwar mit Hilfe der Ionenchromatographie, ionenspezifischer Elektroden und der Atomabsorptionsspektroskopie.

8. ERGEBNISSE DER FAUST-2A-VERSUCHE

8.1 Technische Ergebnisse

Das einwandfreie Funktionieren der Berstscheiben konnte nur mit der Doppelberstscheibenanordnung erzielt werden. Die zunächst eingebauten Druckaufnehmer erwiesen sich als sehr temperaturempfindlich und wurden gegen Druckaufnehmer ausgetauscht, die für heiße Kunststoffmassen konstruiert waren. Damit wurde eine wesentliche Verbesserung erzielt. Helicoflex-Dichtungen und gewellte Nickel-Graphit-Dichtungen erwiesen sich als sehr zuverlässig. Da die Letzteren erheblich billiger sind, wurde hauptsächlich dieser Typ verwendet. Kupferdichtungen waren weniger zuverlässig. Bei den pneumatischen Klappenventilen traten trotz mehrerer Reparaturen immer wieder Leckagen auf, die die Experimente erschwerten, z.B. bei Evakuierung der Entspannungsbehälter. Die Ultraschallanlage war im statischen Betrieb voll funktionsfähig. Im Augenblick der Entladung trat jedoch ein hoher Untergrund auf, der die Interpretation des Meßsignals äußerst schwierig machte. Die Natrium-Handhabung war unproblematisch. Die unterschiedlichen Verfahren zum Einbringen der Simulationsmaterialien in die Entladung erwiesen sich als zuverlässig. Die vollautomatische Datenerfassung mit dem Druckanstieg im Poolbehälter als Triggersignal funktionierte einwandfrei.

8.2 Rückhaltefaktoren

Wichtige Ergebnisse aus den Versuchen 201 - 216 sind in der Tabelle 8.1 zusammengestellt. Insbesondere interessieren die freigesetzten Mengen an Simulationsmaterial und Natrium aus den Versuchen 210 - 216. Die hieraus abgeleiteten Rückhaltefaktoren RFD, RFA, RFC und RFU sind in der Tabelle 8.2 aufgeführt. Naturgemäß muß RFC (Gesamt-Covergas) kleiner sein als RFD (direkt). Wegen des relativ großen Entspannungsvolumens sind die Unterschiede aber nur im Bereich von etwa 20%. Zufällig haben RFA (Ausströmen auf 0,1 MPa) und RFC praktisch den gleichen Wert, weil der Druck im Entspannungsvolumen vor der Entladung bereits 0,1 MPa betrug. Bei der Berechnung "Gesamt-Covergas" und "Ausströmen auf 0,1 MPa" fällt dieser Beitrag in beiden Fällen in gleicher Weise heraus. Dies steht im Gegensatz zu den späteren 2B-Versuchen (Kap. 14), wo die Entspannungsgefäße evakuiert waren.

Erwartungsgemäß sind die Rückhaltefaktoren für partikelförmiges Material sehr hoch. Dies ist auf Impaktionsprozesse während der Druckstöße sowie auf das intensive Auswaschen durch den Natriumeintrag (Entrainment) in das entladene Gasvolumen und in das Covergasvolumen zurückzuführen. Die Versuche 210 und 211 liefer-

ten RFD-Werte von $1,80 \cdot 10^5$ für Jod aus NaI und $4,70 \cdot 10^4$ für Strontium aus SrO. Die Werte RFA und RFC sind jeweils etwa 15% niedriger.

Wegen der sehr geringen Mengen, die im Entspannungsgefäß nachgewiesen werden konnten, taucht nun zwangsläufig die Frage auf, ob es sich hierbei um echte Meßwerte oder um Untergrundeffekte handelt. Zur Feststellung der Nachweisgrenze bzw. der Untergrundwerte für I und Sr wurde Versuch 213 durchgeführt analog 210 und 211, aber ohne Einwaage eines Simulationsmaterials. Die chemische Analyse ergab Untergrundwerte von $0,03 \mu\text{g} / \text{m}^3 \text{I}^-$ und $0,14 \mu\text{g} / \text{m}^3 \text{Sr}$ in der NaOH-Lösung. Diese Werte würden einer Freisetzung von $50 \mu\text{g} \text{I}$ bzw. $180 \mu\text{g} \text{Sr}$ in das Entspannungsvolumen entsprechen. Bei einer angenommenen Einwaage von 10g NaI bzw. SrO ergäben sich somit die Werte $\text{RFD} = 1,7 \cdot 10^5$ für I und $\text{RFD} = 4,7 \cdot 10^4$ für Sr. Dies sind praktisch die gleichen Werte, die sich aus den Versuchen 210 und 211 ergaben! Somit muß der Schluß gezogen werden, daß hier die Untergrundwerte die eigentliche Netto-Meßgröße total überdecken. In beiden Fällen erhält man so den untergrundkorrigierten Rückhaltefaktor $\text{RFU} = \infty$. Nun ist in letzter Konsequenz aber nicht auszuschließen, daß die Untergrundverunreinigung erst durch die Versuche 210 und 211 in die Versuchsanlage eingebracht wurde. Daher sollte man in realistischer Weise als Ergebnis der beiden Versuche einen Rückhaltefaktor $> 10^5$ angeben.

Deutlich höher war die Uranfreisetzung. Die Versuche 212 und 214 lieferten Rückhaltefaktoren der Größenordnung 10^3 . Möglicherweise ist dafür der Anteil sehr kleiner Partikel im Größenspektrum verantwortlich (5% waren kleiner als $5 \mu\text{m}$). Die gefundenen Uranmengen lagen erheblich über der Nachweisgrenze. Aus Nullproben bei der Fluorometrie läßt sich abschätzen, daß die Untergrundwerte mindestens 2 Größenordnungen unter dem Meßsignal liegen. Somit unterscheidet sich RFU praktisch nicht von RFC. Gemäß Tab. 8.2 ist $\text{RFU} = 2,4 \cdot 10^3$ (212) und $0,53 \cdot 10^3$ (214).

Die geringe Cäsiumfreisetzung (unterhalb der Nachweisgrenze, $\text{RFC} > 4,7 \cdot 10^3$) ist zunächst unerwartet. Da aber Cäsium bei 500°C als Flüssigkeit freigesetzt wird, wäre ein Flashing-Prozeß mit der Bildung großer Partikel ($> 100 \mu\text{m}$) und hoher Abscheiderate denkbar. Der zu diesem Zeitpunkt herrschende Dampfdruck von 100 Torr spielt offenbar keine Rolle. Beim Reaktorfall muß man allerdings von höherer Freisetzung ausgehen. Es ist auch anzunehmen, daß bei einer verzögerten Probenahme (wie z.B. bei FAUST 2B, Tab. 14.2) ein größerer Cäsiumanteil nachgewiesen würde.

Beim Jodversuch wurden große Mengen freigesetzt. Dies ist verständlich, da elementares Jod unter den Versuchsbedingungen in der Gasphase vorliegt und mit hohem Druck expandiert. Kondensation innerhalb des Versuchsbehälters ist nicht möglich, und nur die NaI-Reaktion bewirkt eine Rückhaltung. Mit $\text{RFC} = 6,42$ ist dieser Mechanismus der Rückhaltung allerdings sehr effektiv. Dabei ist zu berücksichtigen,

daß infolge Entrainment eine große Reaktionsoberfläche zur Verfügung steht. Der Untergrund (aus Versuch 213) spielt hier keine Rolle.

8.3 Natriumfreisetzung, Konzentration im Covergas

Die Freisetzung von Natrium aus dem Poolzylinder in das Entspannungsvolumen nach dem Öffnen des Klappenventils ist auf drei Wegen möglich:

1. Natriumtröpfchen aus Entrainmentprozessen während der Expansionsphase fliegen gegen die Ventilklappe als Teil des Deckels und haften dort. Nach dem Öffnen werden sie von dem expandierenden Gasstrom abgerissen und mitgeführt.
2. Natriumtröpfchen, die zum Zeitpunkt der Ventilöffnung noch luftgetragen sind, werden in dem expandierenden Gasstrom mitgeführt.
3. Das von der heißen Pooloberfläche abdampfende Natrium kondensiert in dem kalten Entspannungsvolumen.

Für eine sinnvolle Interpretation der Natriumfreisetzung können nur die Versuche 211 - 216 herangezogen werden. Hier war eine Doppelberstscheibe eingebaut, der Querschnitt voll geöffnet und das Natrium zum Zeitpunkt der Ventilöffnung bereits in den Quellbehälter abgelaufen. Bei den vorangegangenen Versuchen 205 - 210 war der Querschnitt nur teilweise geöffnet, der Natriumabfluß in den Quellbehälter behindert und die Natriumfreisetzung unrealistisch hoch infolge Mitriß im Gasstrom, der noch aus dem Quellbehälter kam. Bei den Versuchen 211 - 216 wurden relativ geringe Mengen im Entspannungsvolumen gefunden (minimal 0,19 g, maximal 8,76 g). Eine Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Ventilöffnung (2 s bis 6 s) ist nicht zu erkennen. Hingegen kann man aus Versuch 216 mit 255°C gegenüber sonst 500°C auf eine Temperaturabhängigkeit schließen. Dies legt die Vermutung nahe, daß die Natriumverdampfung einen wichtigen Beitrag liefert. Andererseits wird ein relativ großer Anteil des freigesetzten Natriums im Bereich der ersten Rohrkrümmung hinter dem Ventil gefunden, was auf Impaktionsabscheidung größerer Partikeln schließen läßt. Es liegt also die Vermutung nahe, daß die Natriumfreisetzung eine Summe der drei o.g. Prozesse mit je nach Versuchsbedingungen unterschiedlicher Wichtung ist.

Mit Hilfe des in Kap. 7 und Kap. 13 beschriebenen Auswerteprogramms wurde aus den aufgesammelten Natriummengen die "Aerosolkonzentration" im Covergas berechnet, die sich während des kurzen Zwischenzustandes (Zustand 2) zwischen Entladung und Probenahme einstellt. Es wird hierbei vereinfachend angenommen, daß die gesamte aufgesammelte Menge gasgetragen war. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 8.3 zusammengestellt. Bei 500°C hat man Konzentrationen von 303 bis 977 g / m³, bei 255°C 22 g / m³. Im Sinne einer "Aerosolkonzentration" hat man bei 500°C ex-

trem hohe Werte, die nur bei transienten Zuständen auftreten können und ein hohes Abscheidepotential für die mitgeführten Simulationsmaterialien darstellen.

8.4 Drucksignale

Die während des Entladungsvorgangs auftretenden Drucksignale sind von großer Bedeutung, weil sie zur Interpretation der kinetischen Vorgänge während der Entladung benötigt werden. Druckaufnehmer waren am Boden des Quellbehälters und am Deckel des Poolbehälters eingebaut.

Der Entladungsvorgang war, ähnlich wie bei den Wasserversuchen, mit einigen heftigen Druckstößen verbunden. Die erste Druckspitze auf den Deckel war meist wesentlich größer als der Entladungsdruck selbst, z.B. 2 MPa bei 1 MPa Entladung. Typischerweise kam es zu drei Druckspitzen mit stark abnehmender Intensität bei zeitlichen Abständen im Bereich von 30 msec. Es ist jedoch nicht möglich, eine genaue Schwingungsperiode anzugeben, da sich die zeitlichen Abstände verkürzen. Das Abbrechen des Schwingungsvorgangs kann man als den Zeitpunkt interpretieren, bei dem durch Entrainmentprozesse der schwingende Natriumkolben in ein Gemisch aus Gas und Natriumtröpfchen zerfallen ist.

Ein Beispiel für die gemessenen Drucksignale wird in der Abbildung 8.1 gezeigt. Vergleichsrechnungen mit dem Modell eines schwingenden Flüssigkeitskolbens werden unter Kap. 9 diskutiert.

9. MODELLRECHNUNGEN ZUM NATRIUMVERHALTEN BEI FAUST-2A

Man kann den Natriumpool als Flüssigkeitskolben zwischen zwei komprimierbaren Gasvolumina ansehen. Ab dem Zeitpunkt der Berstscheibenöffnung führt dieser Kolben Schwingungen zwischen dem unteren Gasvolumen ("Blase") und dem oberen Gasvolumen ("Schutzgas") aus. Sie sind mit Entrainmentprozessen verbunden, in erster Linie durch Rayleigh-Taylor-Instabilitäten, die nach der Theorie von Taylor [2.8] immer dann auftreten, wenn die Beschleunigung an der Trennfläche in Poolrichtung erfolgt. In unserem Fall hat man also abwechselnden Flüssigkeitseintrag in die Gasvolumina "Blase" und "Schutzgas", wobei die Gasvolumina in ein Gas-Tröpfchen-System umgewandelt werden.

Um das Verhalten des Natriumpools (Druckstöße, Schwingungen, Entrainment) zu beschreiben, wurde das Rechenprogramm MOFA-2A erstellt. Das Programm ist in einem internen Bericht [9.1] dokumentiert. Es wird angenommen, daß das Natrium zwischen dem Gasvolumen des Quellbehälters und dem Schutzgas adiabatische Schwingungen ausführt, bis die Entrainmentprozesse zum völligen Aufbrechen des Natriums in ein Zweikomponentengemisch und damit zur Beendigung der Oszillationen führen. Das Resultat einer solchen Rechnung ist in Abb. 9.1 dargestellt, und zwar für den Fall einer 1 MPa-Entladung bei 30 cm Poolhöhe und 500°C. Es besteht gute Übereinstimmung mit dem Experiment im Hinblick auf die Zahl der Oszillationen, die Lage der Druckmaxima und -minima und den Endpunkt der Oszillationen. Die Entrainmentkonstante (normalerweise 4,65 nach Corradini [2.9]) mußte allerdings = 3 gesetzt werden, um eine Übereinstimmung mit dem Experiment zu erzielen.

So erhält man im Experiment und in den Rechnungen drei Druckspitzen im Schutzgas bei 23 / 54 / 74 ms (Versuch 214) und 21 / 59 / 71 ms (MOFA-Rechnungen). Beim Experiment sind die Oszillationen nach ca. 80 ms beendet. Aus den Rechnungen folgt, daß nach 75 ms der Natriumkolben infolge Entrainment völlig verschwunden ist, d.h. die beiden Trennflächen zu den Gasvolumina haben sich getroffen und das gesamte Volumen besteht nun vorübergehend aus einem hochkonzentrierten Gas-Tröpfchen-Gemisch. Im Sinne einer "Aerosolkonzentration" würde der mittlere Wert etwa 40 kg/m³ betragen. Es ist offensichtlich, daß dies nur ein transienter Zustand sein kann, der durch rasche Sedimentation beendet wird. Es ist aber auch offensichtlich, daß er ein enormes Abscheidepotential für Partikeln darstellt sowie eine große Oberfläche für chemische Umwandlungen bietet.

In den MOFA-Rechnungen wurde auch durch einen einfachen Ansatz mit dem Stokes'schen Widerstandsgesetz eindimensional die Bahn der Entrainmentpartikeln als Funktion der Zeit ohne gegenseitige Wechselwirkung berechnet. Es ergab sich, daß ein gewisser Teil den Deckel erreichen kann, wo er möglicherweise nach Impaktion haftet und später nach dem Öffnen des Klappenventils abreißt und zur freigesetzten Natriummenge beiträgt.

10. DER VERSUCHSSTAND FAUST-2B

FAUST-2B ist ein Versuchsstand im technischen Maßstab. Er wurde errichtet für Berstscheibenentladungen bis zu 4 MPa in einen heißen Natriumpool von maximal 600°C, der sich in einem zylindrischen Behälter von 0,6 m Durchmesser und 1,10 m Höhe befindet. Die Bauarbeiten in der KfK-Halle 327 begannen im April 1985 mit der Errichtung einer separaten Meßkabine zur Steuerung und Überwachung der Anlage. Die Grube zur Aufnahme der Natriumbehälter, der Brandschutzwannen und der Gegengewichte wurde im Juli 1985 errichtet, die drei Behälter wurden im September 1985 geliefert, und der Zusammenbau mit Verrohrung, Wärmeisolierung und elektrischen Anschlüssen erstreckte sich von Oktober 1985 bis März 1986. Schließlich mußte noch eine Arbeitsbühne um den Versuchsbehälter gebaut werden, denn der wichtigste Experimentierbereich ist der Behälterdeckel.

Der Versuchsstand kann eingeteilt werden in die vier Hauptkomponenten:

- A. Versuchsbehälter mit Quellbehälter, Schutzglocke, Deckel
- B. Lagerbehälter für Natrium
- C. Sicherheits-Auffangbehälter
- D. Natrium-Einschmelzanlage

Abb. 10.1 zeigt eine Gegenüberstellung der Anlagen 2A und 2B, Abb. 10.2 ein detailliertes Schema der Anlage 2B.

Zu A: Versuchsbehälter

Der Versuchsbehälter hat mit 0,6 m Durchmesser und 1,1 m Höhe ein Bruttovolumen von 311 Litern. Er ist ausgelegt für maximal 1,6 MPa und beheizbar bis 600°C. Die Natrium-Versuchstemperatur beträgt normalerweise 500°C. Der Behälter wird größtenteils drucklos mit Inertgas betrieben. Während der Berstscheibenentladung ist er jedoch mehreren Druckspitzen ausgesetzt, deren Stärke von der Natriumfüllstandshöhe abhängt. Unmittelbar nach dem Versuch wird ein Druckausgleich eingeleitet, d.h. eine Leckage simuliert, indem pneumatische Ventile fernbetätigt geöffnet werden und damit eine Verbindung zu externen Probenahmebehältern geschaffen wird.

Zur Instrumentierung des Behälters gehören zwei Druckaufnehmer (Typ BROSA für heiße Kunststoffmassen) und zahlreiche Temperaturmeßstellen (Fe-Konstantan-Thermoelemente). Für den Betrieb bis 300°C wurden zwei gegenüberliegende Sichtfensterpaare eingebaut; bei höheren Temperaturen werden sie durch Blindflansche verschlossen. Die Natriumfüllstandshöhe wird durch eine entsprechende Länge des Einfüllrohres bestimmt. Weiterhin besitzt der Behälter eine Ultraschallmeßeinrichtung zur Blasendetektion unter Natrium mit insgesamt 4 Sender / Empfänger-Paaren für kontinuierlichen Betrieb und 8 Koppelstäben (Edelstahl, 36 cm lang), um die

Schwingquarze aus der Hitzezone herauszubringen (sie dürfen nur mit max. 70°C belastet werden).

Unterhalb des Versuchsbehälters ist der Quellbehälter mit Doppelberstscheibe angeflanscht. Die untere Berstscheibe, durch die der Entladungsdruck festgelegt ist, besteht aus Inconel mit hoher Temperaturfestigkeit (bei Temperaturen um 1000°C noch ca. 90% Ansprechdruck); der volle Öffnungsquerschnitt hat einen Durchmesser von 10 cm. Die Bruchstellen der Berstscheibe sind durch eine kreuzförmige Einkerbung vorgegeben. Es kommt also nach Überschreitung des Ansprechdrucks zum momentanen Umklappvorgang der vier Segmente, und der Ausströmvorgang wird nicht durch Bruchstücke der Berstscheibe behindert.

Die FAUST-2A-Versuche haben ergeben, daß sich die Inconel-Berstscheibe nur teilweise öffnet, wenn sich das flüssige Natrium unmittelbar darüber befindet. Der Widerstand, den das flüssige Natrium dem Umklappvorgang entgegensetzt, ist zu groß. Dies führte zur Konstruktion der Doppelberstscheibe, die aus der ursprünglichen Inconel-Berstscheibe mit Haltering (wahlweise Wölbung in Druckrichtung oder gegen die Druckrichtung), einem Zwischenring und darüber einer in einem zweiten Haltering gehaltenen dünnen Edelstahlfolie (20 µm) besteht. Die 20 µm-Folie hält bei 500°C einem Überdruck bis zu ca. 0,15 MPa stand. Mit dieser Konstruktion öffnet sich die Berstscheibe nicht mehr direkt gegen das Natrium, sondern in das (evakuierbare) Zwischenvolumen von 0,75 Litern. Danach trifft der volle Druck auf die dünne Edelstahlfolie, die augenblicklich im vollen Querschnitt abreißt. Die Inconel-Berstscheibe hat eine Ansprechtoleranz von $\pm 5\%$. Der Öffnungsvorgang beträgt wenige Millisekunden. Für die Versuche wurden Berstscheiben 1, 2, 3 und 4 MPa Ansprechdruck beschafft..

Der Quellbehälter ist für 4 MPa ausgelegt und hat ein Volumen von 1,45 Litern. Eine spätere Vergrößerung, etwa auf das doppelte Volumen, wäre möglich. Er ist an der Unterseite durch einen abnehmbaren Flansch verschlossen.

Nach dem Ansprechen der Berstscheibe sollen Simulationsmaterialien in Form von Partikeln oder Dämpfen mitgerissen werden. Die beiden Methoden zum Einbringen von Partikeln (z.B. UO₂, SrO, NaI) in den Gastrom wurden bereits in Kap. 5 erläutert. Zunächst können die Partikeln auf die untere Berstscheibe aufgegeben werden, wobei als Schutz gegen seitliches Verrutschen ein dünner Edelstahlring dient. Als zweites wurde ein perforierter "Korb" konstruiert, der in den Quellbehälter eingebaut wird. Die Gasströmung reißt dann das in dem Korb befindliche Material mit nach oben. Für Versuche mit Cäsium und Jod wurde der Korb im Quellbehälter mit einem oberen Prallblech mit Dorn versehen. Das in einer Glaskugel eingeschmolzene Material wird im Augenblick der Entladung nach oben geschleudert. Beim Auftreffen auf

den Dorn wird die Glaskugel zerstört und das darin befindliche Material freigesetzt (siehe dazu Abb. 5.2 und 5.3).

Weiterhin besitzt der Quellbehälter einen Druckaufnehmer und drei Temperaturmeßstellen. Das Druckgas wird durch einen seitlichen Anschluß eingeführt.

Der abnehmbare Deckel hat fünf Probenahmestutzen mit jeweils 4 cm Durchmesser. Vier dieser Stutzen sind mit pneumatisch angetriebenen Schrägsitzventilen, der fünfte als Reserve noch mit einem Blindflansch versehen. Diese Stutzen dienen zur Probeentnahme aus dem Schutzgas und zur Druckentlastung. Ein weiterer Stutzen ist an die Evakuierungs- bzw. Inertisierungsleitung angeschlossen.

Als Vorsichtsmaßnahme sind Berstscheibe und Quellbehälter von einer "Schutzglocke" umgeben. Diese Schutzglocke bildet ein inertisiertes Volumen, in dem unbeabsichtigt austretendes Natrium aufgefangen und in den Abblat tank geleitet wird.

Der Versuchsbehälter hat ein Eigengewicht von ca. 1,5 Tonnen. Trotz dieses hohen Eigengewichtes würde er aber bei einer 4 MPa-Entladung eine Rückstoßbewegung von mehreren Zentimetern ausführen (Beispiel Wasserversuchsstand 1B: Gewicht 600 kg, Sprunghöhe 12 cm nach 4 MPa), was bei einem Natriumversuchsstand auf keinen Fall tolerierbar ist. Deshalb wurde er mit einem Stahlplattenfundament von 4,5 Tonnen starr verbunden sowie zur Schwingungsdämpfung auf vier Federkörpern montiert. Damit wird erreicht, daß selbst im ungünstigsten Fall die Auslenkung (Sprunghöhe) des Behälters während der Entladung geringer als 1 cm bleibt. Da unterhalb des Behälters eine Natrium-Auffangwanne aufgestellt werden muß, war aus räumlichen Gründen auch noch eine Absenkung in den Hallenboden von ca. 1 m Tiefe notwendig.

Zu B: Lagerbehälter für Natrium

Das Natrium wird üblicherweise in 200 Liter-Fässern angeliefert. Der Vorratsbehälter ist mit 500 Litern volumenmäßig also so konzipiert, daß er den Inhalt von 2 Fässern aufnehmen kann und darüber hinaus noch Reserve hat. Er ist beheizbar bis 500°C, die normale Betriebstemperatur liegt allerdings nur bei 300°C. Normalerweise steht der Behälter drucklos unter Argon. Der Versuchsbehälter wird allerdings pneumatisch durch Argon-Überdruck aus dem Lagerbehälter mit flüssigem Natrium gefüllt; deshalb ist der Lagerbehälter als Druckbehälter für 0,6 MPa ausgeführt. Der Behälter besitzt eine Einrichtung zur Füllstandsmessung (Prinzip der Differenzdruckmessung); um die Meßgenauigkeit zu erhöhen, wurde er stehend installiert. Da unter dem Behälter aus Sicherheitsgründen eine Natrium-Auffangwanne eingebaut werden mußte und die Gesamthöhe einschließlich Einschmelzanlage wegen des Hallenkranes nicht über 4 m liegen durfte, war die Errichtung einer Grube notwendig (1,5 m breit, 1,5 m tief, 3,5 m lang). In dieser Grube wurde auch der Sicherheits-Auf-

fangbehälter installiert. Unter beiden Behältern befindet sich eine gemeinsame Natrium-Auffangwanne.

Zu C: Sicherheits-Auffangbehälter

Der Auffangbehälter ist für maximal 0,6 MPa ausgelegt und hat ein Volumen von 300 Litern, damit er den gesamten Natriuminhalt des Versuchsbehälters im Bedarfsfall aufnehmen kann. Damit ein druckloses Abfließen des Na aus dem Versuchsbehälter gewährleistet ist, wurde der Auffangbehälter möglichst tief, d.h. in der Grube, installiert.

Da das Natrium im Quellbehälter an mehreren Dichtungen ansteht, ist ein unbeabsichtigtes Auslaufen nicht ausgeschlossen. In diesem Fall läuft das Natrium zunächst in die inertisierte Schutzglocke und von dort in den Auffangbehälter. Schutzglocke und Auffangbehälter sind während des Versuchs auf ca. 300°C beheizt. Die Instrumentierung des Auffangbehälters ist ähnlich wie die des Lagerbehälters (Füllstandsmessung, Temperaturmeßstellen).

Zu D: Einschmelzanlage

Die Vorrichtungen zum Einschmelzen des gelieferten Natriums wurden räumlich direkt über dem Lagerbehälter angeordnet. Das 200 Liter-Natriumfaß wird mit einer Mantelbeheizung versehen und zur Verflüssigung des Natriums auf 150 - 200°C erwärmt. Über ein Ventil erfolgt dann die Entleerung des Natriums (drucklos) unter ständiger Inertgaszufuhr in den Lagerbehälter. Wie in Abb. 10.2 dargestellt, ermöglicht die Verrohrung des Versuchstandes auch die Rückführung des nicht mehr benötigten Natriums in ein leeres 200 Liter-Faß.

11. ZUR DURCHFÜHRUNG DER FAUST-2B-VERSUCHE

11.1 Natriumbehandlung

Bei noch leerem Lagerbehälter beginnt der Versuch mit dem Füllen über die Einschmelzanlage. Dazu wird zunächst ein gefülltes 200 Liter-Lieferfaß angeschlossen. Der Lagerbehälter wird evakuiert und anschließend mit Argon gefüllt. Das Natriumfaß wird mit Faßbeheizung auf 150 - 200°C erwärmt, der Vorratsbehälter auf 300°C. Zum Umfüllen wird das Handventil zwischen Natriumfaß und Lagerbehälter geöffnet; das Natrium läuft dann drucklos in den Lagerbehälter ab. Werden beim Versuch größere Natriummengen benötigt, so wird der Einschmelzvorgang mit einem zweiten Faß wiederholt. Im allgemeinen kann das Natrium bei den nächsten Versuchen wiederverwendet werden, d.h. der Einschmelzvorgang erübrigt sich dann. Die Natriummenge im Lagerbehälter kann jeweils an der Füllstandsanzeige abgelesen werden.

Vor dem Umfüllen vom Lagerbehälter in den Versuchsbehälter werden alle natriumführenden Anlagenteile evakuiert, mit Inertgas gefüllt und auf ca. 300°C beheizt. Das Umfüllen geschieht dann pneumatisch durch Argon-Überdruck im Lagerbehälter. Die Höhe des Natriumspiegels im Versuchsbehälter ist einer der Versuchsparameter. Eine definierte Höheneinstellung wird folgendermaßen erreicht: Das Natrium wird durch eine Rohrleitung eingefüllt, die fast bis auf den Boden des Versuchsbehälters reicht. Ein zweites Rohr, von außen per Ventil umstellbar, endet im Versuchsbehälter genau bei der gewünschten Füllstandshöhe. Nachdem zunächst eine die gewünschte Füllstandshöhe übersteigende Natriummenge eingefüllt wurde, wird per Überdruck im Versuchsbehälter durch das zweite Rohr die überzählige Menge in den Lagerbehälter zurückgedrückt und genau die gewünschte Höhe eingestellt.

Nach dem Umfüllvorgang werden alle Ventile am Versuchsbehälter geschlossen. Das Natrium steht unter Argon-Schutzgas und wird bis auf die Versuchstemperatur hochgeheizt. Der Druckanstieg im Schutzgas wird durch Öffnen eines Deckelventils abgebaut. Nach der Berstscheibenentladung ist der Quellbehälter mit Natrium vollgelaufen; das Natrium steht an dem abnehmbaren Flansch an, der den unteren Abschluß des Druckbehälters bildet. Wenn die Probennahmephase abgeschlossen ist, beginnt die Natrium-Entsorgung. Der größte Teil des Natriums wird zunächst per Überdruck aus dem Versuchsbehälter in den Lagerbehälter zurückgedrückt. Dies geschieht durch die gleichen Rohrleitungen wie bei der Füllung. Das so zurückgeführte Natrium kann beim nächsten Versuch wiederverwendet werden. Ein kleiner Rest (Bodenbedeckung plus Inhalt des Druckbehälters) läßt sich allerdings nicht zurückführen. Daher wird nun das völlige Erkalten des Natriums abgewartet, der abnehmbare untere Flansch entfernt, eine Auffangwanne mit "Wegwerfdose" von ca. 20 Litern angeschlossen und noch einmal kurzzeitig hochgeheizt. Somit wird erreicht,

daß das Restnatrium in die Auffangkanne läuft und nach erneutem Abkühlen zusammen mit der Wegwerfbüchse herausgenommen werden kann.

Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit, das Natrium in ein Lieferfaß zurücklaufen zu lassen, falls es wegen Verunreinigung nicht mehr wiederverwendet werden kann. Dieses Faß wird dann zur Entsorgung an die Lieferfirma zurückgeschickt.

11.2 Die Berstscheibenentladung

Zunächst liegen isotherme Verhältnisse bei Normaldruck vor: Der Quellbehälter einschließlich vorher eingebrachter Materialien und der Versuchsbehälter mit Natrium und Schutzgas wurden gleichmäßig auf die Solltemperatur hochgeheizt. Alle Ventile sind geschlossen. Als nächster Schritt wird in dem Quellbehälter ein Überdruck eingestellt, der noch deutlich unter dem Ansprechdruck liegt (z.B. 1,5 MPa bei einer 2 MPa-Berstscheibe). Der Entladungsdruck ist durch die Wahl der Berstscheibe relativ genau ($\pm 5\%$) festgelegt. Durch langsames Hochfahren des Druckes über ein Nadelventil wird schließlich der Berstvorgang ausgelöst. Der Öffnungsvorgang der Berstscheibe dauert nur ca. 3 Millisekunden. Durch die Expansion des Gasvolumens aus dem Quellbehälter heraus wird das Natrium nach oben beschleunigt und komprimiert das Schutzgas. Dieser Kompressionsvorgang ist erst dann beendet, wenn der Schutzgasdruck höher als der Druck der expandierenden Blase geworden ist und eine Re-Expansion des Schutzgasvolumens bewirkt. Der Vorgang kann sich einige Male wiederholen. Während dieser Zeit ist der Versuchsbehälter den entsprechenden Druckstößen auf Deckel und Boden ausgesetzt, auf die er mit einer gewissen Relativbewegung reagiert. Wie bereits in Kap. 10 beschrieben, wird diese Relativbewegung durch künstliche Massenvergrößerung (Fundament mit 4,3 Tonnen) sowie Federkörper minimalisiert. Die gesamte Zeitdauer der Oszillationen ist im allgemeinen wesentlich kürzer (Schwingungsdauer typischerweise 70 msec) als die Aufstiegszeit der Gasblasen im Natrium bis zum Aufbrechen in das Schutzgas.

Etwa eine Sekunde nach der Entladung stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein mit einem Überdruck, der von den Randbedingungen (insbesondere der Größe des Schutzgasvolumens) abhängt und normalerweise Werte von 0,2 MPa nicht übersteigt (demgegenüber können die kurzzeitigen Druckspitzen während der Oszillationsphase wesentlich höher sein). Dieser Gleichgewichts-Überdruck wird aber über die evakuierten Probenahmegefäße bald wieder abgebaut.

11.3 Versuchssteuerung, Datenerfassung, Probenahme

Auf der Empore der Halle 327 wurde eine Meßwarte zur Versuchssteuerung und Datenerfassung aufgebaut. Von hier aus werden die Temperaturen, Drücke, Füllstände etc. überwacht und die schnellen Daten während der Entladung erfaßt. Letzteres er-

folgt automatisch per Rechner, wobei das Druckabfallsignal bzw. der Anstieg im Schutzgas als Triggersignal benutzt wird. Insbesondere werden die während der Entladung auftretenden Drucksignale im Quellbehälter sowie am Boden und am Deckel des Versuchsbehälters registriert. Weiterhin werden von der Meßwarte aus die pneumatischen Ventile geöffnet und geschlossen. Die Meßwarte hat gleichzeitig eine Sicherheitsfunktion: Durch die Trennwand ist das Versuchspersonal während des Versuches geschützt.

Die Bestimmung der in das Schutzgas freigesetzten bzw. aus Deckelleckagen entweichenden Mengen an Natrium und Simulationsmaterial ist das wichtigste Versuchsziel. Dies geschieht mit Hilfe von Probenahmegefäßen, die oberhalb des Deckels installiert sind; sie haben ein Netto-Volumen von 7,5 Litern, das sich mit dem Volumen der Zuleitungsrohre auf ca. 8 Liter erhöht. Sie befinden sich auf Raumtemperatur und werden üblicherweise vor der Probenahme evakuiert. Sie sind über Deckelprobenahmestutzen mit jeweils 4 cm Durchmesser und pneumatischen, schnell öffnenden bzw. schließenden Ventilen mit dem Versuchsbehälter verbunden. Ihre Anzahl wurde von ursprünglich einem Behälter im Laufe der Zeit auf vier Behälter erhöht, um Untergrundwerte und die Zeitabhängigkeit der Freisetzung erfassen zu können. So wurden üblicherweise eine Probe vor der Entladung und bis zu drei Proben nach der Entladung genommen.

11.4 Der "Instantane Quellterm" im Experiment

Wie bereits bei der Einleitung erwähnt, werden Leckagen im Deckel unterstellt, die während des Störfallablaufs entstehen, insbesondere beim Auftreffen des "Natriumhammers" bzw. bei der ersten Schutzgaskompression. Es wird nicht unterstellt, daß der Deckel als Ganzes wegfliegt. Beim Experiment geht es darum, daß möglichst kurz nach der Berstscheibenentladung ein Deckelventil geöffnet, also eine Leckage simuliert wird. Danach kann das unter Druck stehende Schutzgas bis zum Druckausgleich in externe Probenahmebehälter ausströmen und gasgetragenes Material mitführen. Der Druckausgleich sollte möglichst bei 0,1 MPa Atmosphärendruck liegen, anderenfalls ist ein Korrekturfaktor notwendig. Es wäre unrealistisch, wenn die Leckage bereits vor der Entladung existieren würde, d.h. das Ventil bereits vorher geöffnet wäre. Typischerweise wird das Ventil etwa eine Sekunde nach dem Ansprechen der Berstscheibe durch Knopfdruck geöffnet. Wegen des pneumatischen Antriebs dauert der Öffnungsvorgang selbst nur ca. 100 msec.

Der "Instantane Quellterm" entspricht einem Kurzzeitvorgang. Um den Unterschied gegenüber der verzögerten Freisetzung zu erkennen, muß das Ventil bald wieder geschlossen werden. Es ist allerdings problematisch, diese Zeit genau einzugrenzen; beim Experiment liegt sie meist im Minutenbereich. Da die freigesetzten Mengen

meist relativ gering sind, müssen vor der Entladung genaue Untergrundmessungen vorgenommen werden.

11.5 Die einzelnen Zustände bei der Versuchsdurchführung

Im Hinblick auf die Versuchsauswertung werden folgende Zustände während der Versuchsdurchführung definiert:

Zustand 0

Natrium einfüllen, hochheizen.

Zustand 1 (Anfangszustand)

Die Natrium-Solltemperatur ist erreicht. Das Schutzgas steht unter leichtem Überdruck (Absolutdruck etwa 0,108 MPa). Die Sammelbehälter werden evakuiert.

Zustand 2 (Untergrund-Probenahme)

Der erste Sammelbehälter wird geöffnet. Aus dieser Probenahme erhält man später die Untergrundwerte. Da der Behälter Raumtemperatur hat, kondensiert das aufgenommene Natrium (Aerosol oder Dampf) rasch an den Wänden.

Zustand 3 (kurz vor Entladung)

Das Ventil zum ersten Sammelbehälter ist wieder geschlossen. Der Schutzgasdruck wird wieder auf den früheren Wert hochgefahren. Der Argondruck im Quellbehälter steigt langsam an.

Zustand 4 (Berstscheibe auf)

Der Ansprechdruck der Berstscheibe wurde erreicht. Der Druck im Quellbehälter sinkt rasch ab. Die Druckaufnehmer zeigen mehrere heftige Druckstöße. Der Druck im Versuchsbehälter steigt rasch an.

Zustand 5 (Sammelbehälter 2 auf)

Möglichst kurz nach dem Ansprechen der Berstscheibe wird der zweite Sammelbehälter geöffnet. Dies ist der wichtigste Probenahmevergung beim Experiment. Aus den aufgesammelten Mengen ergibt sich später der Rückhaltefaktor RF-S2 (siehe Kap. 13.3). Der Sammelbehälter bleibt im allgemeinen nur wenige Sekunden bis Minuten geöffnet.

Zustand 6 (S2 wieder zu)

Der Probenahmevergung für die instantane Freisetzung ist nunmehr abgeschlossen. Anschließend beginnt die Probenahme für die verzögerte Freisetzung. Es erfolgt kein Druckausgleich im Schutzgas.

Zustand 7 (Sammelbehälter 3 auf)

Der dritte Sammelbehälter ist offen. Gegenüber S2 ist die Öffnungszeit deutlich länger. Aus den abgeschiedenen Mengen wird der Rückhaltefaktor RF-S3 bestimmt.

Zustand 8 (S3 wieder zu)

Falls ein vierter Sammelbehälter angeschlossen ist, ist dies ein Zwischenzustand analog 6.

Zustand 9 (Sammelbehälter 4 auf)

Zur Verbesserung der Zeitauflösung kann nun analog Zustand 7 eine weitere Probenahme vorgenommen werden. Aus den abgeschiedenen Mengen erhält man den Rückhaltefaktor RF-S4.

Zustand 10 (S4 wieder zu)

Das Ventil zu S4 wird geschlossen. Der Versuch ist damit beendet. Das Natrium wird in den Lagerbehälter zurückgedrückt. Die Heizungen werden abgeschaltet.

Es bleibt anzumerken, daß der Ausbau auf 4 Sammelbehälter stufenweise erfolgt ist. Beim ersten Versuch (Nr. 301) gab es nur einen Behälter. Erst ab Versuch 309 standen vier Behälter zur Verfügung.

12. PARAMETER DER FAUST-2B-VERSUCHE

Die wichtigsten Versuchsparameter sind

- Entladungsdruck
- Pooltemperatur
- Poolhöhe
- Art des Simulationsmaterials

Damit läßt sich eine umfangreiche Versuchsmatrix zusammenstellen, die jedoch aus Zeit- und Kostengründen nur in erheblich reduziertem Maße zu verwirklichen war.

Es wurden insgesamt 14 Versuche durchgeführt. Zur Unterscheidung gegenüber früheren FAUST-Versuchen haben sie die Seriennummer 300 erhalten und somit die Versuchsnummern 301 - 314. Die wesentlichen Parameterbereiche waren: Berstscheiben 1/2/3/4 MPa; Pooltemperatur 220 - 500°C; Poolhöhe 40/60/73/81 cm entsprechend 113/170/196/229 Liter Natrium; Spaltprodukt-Simulationsmaterial SrO, NaI, CsI als Pulver, metallisches Cs als Flüssigkeit und I₂ als Dampf; Mengen von 0,5 bis 10 g. Auf den Einsatz von UO₂-Pulver wurde verzichtet, um die Anlage nicht radioaktiv zu kontaminieren.

Versuch 301 war ein 1 MPa-Testversuch mit nur einem Sammelbehälter, noch ohne Simulationsmaterial.

Beim Versuch 306 war die Berstscheibe in umgekehrter Richtung eingebaut. Statt bei 1 MPa öffnete sie schon bei 0,3 MPa.

Versuch 309 war ein Spezialversuch ohne Berstscheibe und ohne Simulationsmaterial. Es sollte festgestellt werden, wie die abgeschiedene Natriummenge von der Öffnungsdauer des Sammelbehälters abhängt.

Bei den Versuchen 306 und 312 befand sich auch eine Cs-Kapsel im Quellbehälter. Leider blieb die Kapsel bei der Entladung in beiden Fällen intakt. Der einzige erfolgreiche Versuch mit Zerstörung der Kapsel war Nr. 314.

In den Tabellen 12.1 und 12.2 sind die Versuchsparameter zusammengestellt.

13. AUSWERTUNG DER FAUST-2B-VERSUCHE

13.1 Vorbemerkungen

Aus den in den Sammelbehältern nachgewiesenen Mengen an Spaltprodukt-Simulationsmaterial werden Rückhaltefaktoren abgeleitet, deren genauere Definition im nächsten Abschnitt erfolgt. Diese Rückhaltefaktoren beziehen sich sowohl auf die instantane Freisetzung (Sammelbehälter S2) als auch auf die verzögerte Freisetzung (Sammelbehälter S3, S4). Die aus der Untergrundmessung S1 abgeleitete Korrektur wird unter Abschnitt 13.6 genauer diskutiert.

Aus den in den Sammelbehältern nachgewiesenen Natriummengen werden die Natriumkonzentrationen im Covergas errechnet. Hierbei kann es sich um Natriumdampf oder -aerosol handeln, wobei die Art der Probenahme leider keine Rückschlüsse über den jeweiligen Anteil gestattet.

Aus den gemessenen Drucksignalen werden die maximalen Druckspitzen am Behälterboden und am Deckel ermittelt sowie die Anzahl der Druckspitzen und deren zeitlicher Abstand, d.h. die Schwingungsdauer der Oszillationen.

13.2 Definition der Rückhaltefaktoren

Der Rückhaltefaktor RF ist ein Maß für die Fähigkeit des flüssigen Natriums, die entladenen Simulationsmaterialien zurückzuhalten. Generell ist der Rückhaltefaktor definiert als

$$RF = \frac{\text{entladene Menge}}{\text{freigesetzte Menge}}$$

RF sollte nun möglichst so definiert sein, daß die Experimente untereinander vergleichbar sind und versuchsspezifische Randbedingungen weitestgehend entfallen. Aus diesem Grund ist es unzureichend, wenn nur der direkt gemessene Wert RFD angegeben wird, d.h. das Verhältnis aus entladener Menge und im Sammelbehälter aufgefangener Menge. Stattdessen werden durch Umrechnung jeweils die drei weiteren Werte RFA, RFC und RFU bestimmt gemäß folgender Definitionen:

A. Direkt, unkorrigiert: RFD

Dies ist die im Quellbehälter eingewogene Menge MQ, geteilt durch die im jeweiligen Sammelbehälter nachgewiesene Menge MS:

$$RFD = MQ / MS.$$

Eine Untergrundkorrektur wird nicht angebracht.

B. Ausströmen auf Atmosphärendruck: RFA

Nach der "instantanen" Probenahme S2 stellt sich ein Covergasdruck ein, der je nach Entladungsdruck und Natriumfüllstand größer oder kleiner als der Umge-

bungsdruck ist. Realistisch in Bezug auf den Reaktorstörfall wäre jedoch das Ausströmen durch eine Deckelleckage bis zum Umgebungsdruck von 0,1 MPa zu betrachten. Außerdem können die einzelnen Experimente besser miteinander verglichen werden, wenn der Enddruck jeweils den gleichen Wert hat. Über einen Korrekturfaktor (Quotient aus Druckdifferenz mit Enddruck 0,1 MPa und experimenteller Druckdifferenz) wird MS in MA umgerechnet, also in die Menge, die bis zum Erreichen des Umgebungsdruckes ausströmen würde. Dann ist

$$\text{RFA} = \text{MQ} / \text{MA}.$$

Eine Untergrundkorrektur wird nicht angebracht.

C. Gesamt-Covergas: RFC

Als nächsten Schritt kann man nun in ähnlicher Weise aus MS die Gesamtmenge MC für den kompletten Covergasraum berechnen. Notwendig dazu ist die Annahme, daß eine homogene Verteilung des Simulationsmaterials im Gasraum vorliegt. Außerdem wird angenommen, daß die Covergastemperatur überall gleich der Pooltemperatur und die Sammelbehältertemperatur gleich der Raumtemperatur ist. Dann ist

$$\text{RFC} = \text{MQ} / \text{MC}.$$

Eine Untergrundkorrektur wird nicht angebracht. RFC ist unmittelbar korreliert mit der Rückhaltefähigkeit des Natriums. Für Quelltermabschätzungen ist RFC ein konservativer Wert.

D. Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur: RFU

Die erste Probenahme S1 (vor der Berstscheibenentladung) liefert die Untergrundwerte. Im Prinzip kann man damit die Rückhaltefaktoren RFD, RFA und RFC korrigieren. Dazu wird angenommen, daß die Untergrundwerte der Schutzgaskonzentration vor der Berstscheibenentladung entsprechen und als Untergrund während des ganzen Versuchsablaufs konstant sind, also z.B. nicht an die Natriumkonzentration gekoppelt sind. Es werden also die S1-Werte jeweils ohne weitere Korrekturen von den S2-, S3- und S4-Werten abgezogen. Eine Proportionalität des Untergrundes zum aufgesammelten Natrium würde oft zu unsinnigen Resultaten führen, bei denen der hochgerechnete Untergrund größer ist als der gesamte Meßwert. Es ist also

$$\text{RFU} = \text{MQ} / (\text{MS} - \text{MU}) \cdot \text{F},$$

wobei F der Umrechnungsfaktor vom Probenahmenvolumen auf das Gesamtvolumen unter Berücksichtigung der Temperaturverhältnisse ist.

13.3 Instantane und verzögerte Rückhaltefaktoren

Gemäß Kap. 11.5 wurde unmittelbar nach der Berstscheibenentladung der Sammelbehälter S2 geöffnet. Die Auswertung dieser Probenahme liefert demnach die "instantanen" Rückhaltefaktoren RFD-S2, RFA-S2, RFC-S2 und RFU-S2. Zu einem späteren Zeitpunkt wurden die Sammelbehälter S3 und S4 geöffnet. In analoger Weise er-

hält man aus diesen Probenahmen die "verzögerten" Rückhaltefaktoren RFD-S3 usw., bzw. RFD-S4 usw. Die verzögerte Freisetzung ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß ein geringer Teil des Simulationsmaterials, das sich mit dem Natriumpool vermischt hat, durch Verdampfungsprozesse oder mechanische Prozesse über einen längeren Zeitraum in das Covergas freigesetzt wird.

13.4 Computer-Auswerteprogramm

Zur Auswertung der Experimente im Hinblick auf Rückhaltefaktoren und Natriumkonzentration wurde ein Rechenprogramm erstellt, das folgende Aufgaben übernimmt:

- Zusammenstellung und Ausdruck der Versuchsparameter.
- Berechnung von Covergasdruck und Covergasvolumen bei den einzelnen Versuchszuständen.
- Berechnung der Natriumkonzentration im Covergas aus den Mengen, die in den Sammelbehältern abgeschieden wurde.
- Berechnung eines Korrekturfaktors für Ausströmen auf Atmosphärendruck 0,1 MPa.
- Berechnung der Gesamtmengen im Covergas aus den Mengen in den Sammelbehältern.
- Berücksichtigung des Untergrundes aus Sammelbehälter 1.
- Berechnung der korrigierten Rückhaltefaktoren für Spaltprodukte.
- Zusammenstellung und Ausdruck der Ergebnisse.

Die schnellen Druckimpulse während des Entladungsvorganges werden in diesem Auswerteprogramm allerdings nicht behandelt.

Im Anhang 2 sind Auszüge des Programmausdruckes zusammengestellt. Es werden Parameter und freigesetzte Mengen für alle Versuche aufgelistet.

Zur Berücksichtigung des Quellbehälters, der Doppelberstscheibe sowie der Sammelbehälter müssen noch die folgenden Angaben gemacht werden:

Der Quellbehälter hat ein Volumen von 1,45 Litern. Allerdings bringt die Leitung zwischen Argonversorgung und Quellbehälter ein Zusatzvolumen, das wegen eines hochliegenden Sicherheitsventils und des außerhalb der Schutzglocke angebrachten Absperrventils nicht vernachlässigt werden kann. Da das Absperrventil erst kurz nach dem Ansprechen der Berstscheibe geschlossen wird, strömt auch noch eine gewisse Gasmenge nach. Dieses Zusatzvolumen wird mit 0,5 Litern abgeschätzt, so daß von einem Gesamt-Quellvolumen von 2 Litern auszugehen ist.

Das Volumen der Doppelberstscheibe zwischen der unteren Inconel-Berstscheibe und der darüberliegenden Edelstahlfolie beträgt 0,75 Liter, der Druck 0,1 MPa. Dieses Zwischenvolumen muß bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Die Sammelbehälter S2 bis S4 unterscheiden sich in ihrem Gesamtvolumen wegen unterschiedlicher Anpassungsstücke an die Deckelventile. Bei der Auswertung wurden folgende Werte eingesetzt:

S1 7,91 Liter

S2 7,93 Liter

S3 8,32 Liter

S4 7,77 Liter

Es wird angenommen, daß die Behälter bei der Probenahme Raumtemperatur haben.

13.5 Anmerkung zur Natrium- bzw. Aerosolkonzentration im Covergas

Der Versuchsstand wurde konstruiert mit der Maßgabe, daß durch die mechanische Deckelbelastung unmittelbar nach der Entladung eine Leckage entsteht und so das Covergas mit gasgetragenem Material bis zum Druckausgleich ausströmen kann. Die in diesem Sinne installierte Probenahmetechnik mit schnell öffnenden Ventilen und evakuierten Behältern erlaubt die Bestimmung realistischer Freisetzungswerte, ist aber aerosolphysikalisch zur Charakterisierung des Covergasaerosols nicht optimal. Hierzu wäre ein langsames, kontinuierliches Absaugen aus dem mittleren Covergasbereich über Probenahmefilter besser geeignet. Wegen der heftigen Druckstöße und der Auslegung auf 1,6 MPa wurde auf den Einbau einer solchen Einrichtung aber verzichtet.

Die aufgesammelte Natriummenge setzt sich zusammen aus abgeschiedenem Aerosol und kondensiertem Dampf. Ein weiterer Anteil kann als unerwünschter Untergrund von Natriumablagerungen im Ventilbereich herrühren, die beim Ausströmvorgang abgerissen und in den Sammelbehälter transportiert werden. Die Probenahmetechnik erlaubt es leider nicht, die jeweiligen Anteile zu quantifizieren. Bezüglich des Verhältnisses Dampf / Aerosol kann man aber die Erkenntnisse aus den NACOWA-Versuchen [1.13] heranziehen, die am gleichen Versuchsstand durchgeführt werden. Hier hat es sich gezeigt, daß man bei niedrigen Deckeltemperaturen (unterhalb 300°C) vorwiegend aerosolförmiges Natrium, bei höheren Temperaturen hingegen vorwiegend dampfförmiges Natrium hat. Demnach wäre in unserem Fall, wo die Deckeltemperatur relativ hoch ist, das gasgetragene Natrium vorwiegend dampfförmig.

Mit Versuch 309 konnte bewiesen werden, daß die aufgesammelte Natriummenge praktisch nicht von der Öffnungsdauer des Ventils abhängt. Die Dauer der Probenahme wurde zwischen 10 s und 100 min variiert (siehe Abb. 13.1) und führte jeweils zum gleichen Ergebnis. Die Diffusion vom Pool in die Behälter ist also äußerst gering.

13.6 Anmerkungen zur Untergrundkorrektur

Die erste Probenahme (Sammelbehälter S1) geschieht vor der Berstscheibenentladung und dient der Erfassung des Untergrundes von Natrium und Simulationsmaterial. Die Untergrundmessung ist notwendig, weil das Natrium eine "natürliche" Verunreinigung haben kann, bzw. in vorausgegangenen Versuchen bereits durch das Simulationsmaterial verunreinigt wurde (das Natrium im Versuchsstand wurde nicht nach jedem Versuch gewechselt). Dadurch kann sich auch ohne Berstscheibenentladung ein gewisser Pegel des Simulationsmaterials im Covergas einstellen.

Typischerweise liefert S1 etwa 100 mg Natrium und 10 µg Spaltprodukt. Der letztere Wert ist bei den Jodversuchen klein gegenüber S2, S3, S4, bei den Versuchen mit partikelförmigem Material hingegen von der gleichen Größenordnung und außerdem in der Nähe der chemischen Nachweisgrenze. Daher ist in diesen Fällen die Untergrundkorrektur problematisch. Wie bereits in Abschnitt 13.2 dargelegt, wird der Untergrund bei der Berechnung von RFU als konstant angenommen und nicht an die Natriumkonzentration angepaßt, weil dies meist zu unsinnigen Werten führt.

13.7 Die chemische Analytik

Die Eigenschaften der Simulationsmaterialien sind bereits unter Kap. 6.3 beschrieben worden. Der Natriumanteil der Proben wurde in allen Fällen durch Titration ermittelt. Die Analyse der Spurenstoffe Strontium und Jod aus den Versuchen 302 bis 308 wurde mit Hilfe der Atomabsorptionsspektrometrie und der Ionenchromatographie im KfK-Institut für Radiochemie IRCh durchgeführt (Gruppe Dr. Mainka). Ab Versuch 309 erfolgten die Analysen im KfK-Institut für Materialforschung IMF I (Gruppe Dr. Adelhelm), und zwar mit der Photometrie für Jod, mit ICP / OES für Strontium und der Atomabsorptionsspektrometrie für Cäsium.

13.8 Die obere Grenze des Rückhaltefaktors aus der analytischen Nachweisgrenze

Die Sammelbehälter einschließlich Zuleitungen werden nach dem Versuch mit H₂O-bidest ausgewaschen. Typischerweise ergibt sich so eine NaOH-Lösung von ca. 100 ml, die auch die freigesetzten Spurenstoffe enthält. Die chemische Nachweisgrenze für Cs, I, Sr liegt größenordnungsmäßig bei 0,01 mg/l. Man kann also 1 Mikrogramm des freigesetzten Simulationsmaterials gerade noch nachweisen. Bei einer typischen Einwaage von 1 Gramm im Quellbehälter liegt so der Grenzwert bei $RF = 10^6$. Im Prinzip kann man den Wert durch Vergrößerung der Einwaage erhöhen. Damit entfernt man sich aber immer mehr von den Reaktorbedingungen, wo die relativen "Einwaagen", bezogen auf das Natrium, wesentlich kleiner sind. Als Richtwert für die Nachweisgrenze bei den FAUST-Versuchen soll also $RF = 10^6$ gelten.

14. ERGEBNISSE DER FAUST-2B-VERSUCHE

14.1 Vorbemerkungen

In den folgenden Abschnitten werden die Rückhaltefaktoren für Cs, I und Sr mitgeteilt und diskutiert, ebenso die Natriumfreisetzung und die Drucksignale. Im Anhang 2 sind die wichtigsten Parameter der Versuche 301 - 314 aufgelistet, dazu die in den Sammelbehältern nachgewiesenen Natriummengen und die darin enthaltenen, durch chemische Analyse nachgewiesenen Simulationsmaterialien. In Ergänzung hierzu gibt die Tab. 12.2 genauere Informationen über den Ablauf der jeweiligen Versuche, d.h. die Dauer der einzelnen Versuchszustände und die Anzahl der eingesetzten Probenahmebehälter. Hier sind auch die Zeitintervalle zwischen der Berstscheibenentladung und dem Öffnen der Deckelventile aufgeführt.

Bedingt durch die Probenahmetechnik mit evakuierten Behältern bei Raumtemperatur gegenüber hoher Natriumtemperatur im Versuchsbehälter mit Natriumdampf und eventuell Aerosol im Schutzgas kommt es nach dem Öffnen des Deckelventils auf jeden Fall zur Freisetzung einer gewissen Natriummenge. Dies ist grundlegend anders als bei den früheren Wasserversuchen (siehe Kap. 3). In dem freigesetzten Natrium ließen sich meist auch Spuren der Simulationsmaterialien nachweisen. Allerdings bewegte man sich oft an der Nachweisgrenze. Diese lag für Cs, I und Sr größenordnungsmäßig bei 0,01 Milligramm pro Liter NaOH-Lösung, was bei einer typischen Quellbehälter-Einwaage von 1 Gramm einem Rückhaltefaktor-Grenzwert von 10^6 entspricht (10^4 bei den früheren Wasserversuchen).

14.2 Cäsium-Rückhaltefaktoren

Es wird unterschieden zwischen metallischem Cäsium und pulverförmigem Cäsiumjodid. Im letzteren Fall wird unterstellt, daß eine chemische Reaktion der Spaltprodukte Cs und I zu CsI bereits vor dem Eintrag in die Blase stattgefunden hat. Metallisches Cäsium wurde beim Versuch 314 entladen (4,5 g), während bei den Versuchen 307 und 308 CsI verwendet wurde (jeweils ca. 10 g).

Versuch 314 war vollständig instrumentiert mit vier Probenahmegefäßen. In allen Fällen wurde Natrium mit nachweisbaren Cäsiummengen freigesetzt, und zwar vor der Entladung (S1), eine Sekunde nach der Entladung (S2) sowie 5 min und 40 min nach der Entladung (S3 und S4). Die gemäß der Definitionen in Kap. 13 abgeleiteten Rückhaltefaktoren RFD, RFC, RFA und RFU sind in der Tabelle 14.1 zusammengestellt.

Zunächst fällt auf, daß alle Rückhaltefaktoren ungewöhnlich hoch sind für eine Substanz, die der Gruppe "leicht flüchtig" zuzuordnen ist. Der niedrigste Wert ist $7,4 \times 10^3$. Metallisches Cs ist bei der Versuchstemperatur 490°C noch flüssig, allerdings mit einem nicht vernachlässigbaren Dampfdruck. Es ist anzunehmen, daß die Flüssigkeit während der 3 MPa-Entladung in Tröpfchen aufbricht, deren Durchmesser gemäß

ei nem Flashing-Prozeß im Bereich von 100 µm liegt. Sie unterliegen dann als relativ große Partikeln einem sehr effektiven Rückhalte­mechanismus.

Aus der Probenahme S2 ergibt sich die folgende Information über den instantanen Quellterm: Der direkte experimentelle Wert ist $RFD = 7,1 \cdot 10^4$. Berücksichtigt man nur den Teil des Covergases, der bis zum Druckausgleich bei 0,1 MPa ausströmt, dann erhält man $RFA = 2,3 \cdot 10^4$. Die Extrapolation auf das gesamte Covergasvolumen ergibt $RFC = 7,4 \cdot 10^3$. Schließlich kommt man, wenn RFC auf den Untergrundwert aus der Probenahme S1 korrigiert wird, auf den Wert $RFU = 7,9 \cdot 10^3$.

Die "verzögerten", d.h. zu einem späteren Zeitpunkt genommenen Proben S3 und S4 unterscheiden sich interessanterweise nur wenig von dem instantanen Wert. Zwar steigt RFD etwas an, dies wird jedoch bei der Umrechnung auf RFC wieder weitgehend kompensiert, weil der Covergasdruck mit jeder Probenahme absinkt und damit auch die aufgesammelten Mengen kleiner werden. RFA steigt an, weil die ausströmenden Mengen infolge des Covergas-Druckabfalles geringer werden. RFU ist geringfügig größer als RFC.

Die Versuche 307 und 308 mit Csl wurden mit drei Probenahmebehältern durchgeführt, und zwar für Untergrund (S1) sowie instantane (S2) und verzögerte (S3) Freisetzung. Da es sich um partikelförmiges Material handelt, waren hohe Rückhaltefaktoren zu erwarten. Wie in Tab. 14.2 gezeigt, sind alle instantanen Werte deutlich größer als 10^4 mit der Ausnahme RFC (308), wo sich der knapp darunter liegende Wert $9 \cdot 10^3$ ergab. Die verzögerten Werte aus S3 unterscheiden sich - wie beim metallischen Cs - wieder nur wenig von den instantanen Werten, teilweise sind sie sogar etwas niedriger. Der minimale Wert ist $RFC = 6,2 \cdot 10^3$ bei Versuch 308.

14.3 Jod - Rückhaltefaktoren

Zur Rückhaltung von Jod wurde eine umfangreiche Anzahl von Versuchen durchgeführt. Es wird unterschieden zwischen elementarem Jod (I_2), das bei der Entladung dampfförmig ist, und den Jodverbindungen Csl und Nal. Die letzteren Verbindungen sind partikelförmig; es wurde dabei angenommen, daß es bereits vor der Entladung zu einer chemischen Reaktion mit dem Spaltprodukt Cs oder dem Kühlmittel Na gekommen ist. Mit elementarem Jod wurden fünf Versuche durchgeführt (303/305 / 310 / 311 / 312), mit Csl zwei Versuche (307 / 308) und mit Nal drei Versuche (302 / 304 / 306).

Die Entladung von I_2 -Dampf oder von partikelförmigen Verbindungen führt zu sehr unterschiedlichen Rückhaltefaktoren. Dies wird durch die Tabellen 14.3 und 14.4

veranschaulicht. Die I_2 -Versuche lieferten - mit Ausnahme von 305 - relativ konsistente Werte, insbesondere für RFC. Die instantanen Werte RFC - S2 liegen zwischen 6 und 15. Im selben Bereich sind interessanterweise auch die verzögerten Werte aus den Probenahmen S3 und S4. Bei Versuch 305 ist zu vermuten, daß es experimentell bedingt zu einer Behinderung der instantanen Freisetzung gekommen ist: RFC-S2

hat den hohen Wert 218, während mit $RFC-S3 = 35$ die Nähe der übrigen verzögerten Werte erreicht wird. Naturgemäß sind die direkten Werte RFD und die Werte des Ausströmens bis zum Druckausgleich RFA höher. Teilweise liegen sie sogar über 100. Auch zeigt sich hier ein Anstieg von S2 nach S4. Die Untergrundkorrektur ist bei den Versuchen mit dampfförmigem Jod vernachlässigbar. RFU ist praktisch gleich RFC, mit geringen Abweichungen bei Versuch 305.

Mehr als drei Größenordnungen höher sind die instantanen Werte RFC-S2 aus den Csl-, bzw. NaI-Versuchen. Es ergaben sich Werte zwischen $5,4 \cdot 10^3$ und $6,1 \cdot 10^5$. Solche Werte waren aufgrund des hohen Abscheidepotentials für Partikeln auch zu erwarten. Interessant ist die Tendenz der verzögerten Rückhaltefaktoren RFC-S3 zu etwas niedrigeren Werten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich nun der Natriumpool mit Csl, bzw. NaI vermischt hat und daß aus dieser Mischung heraus eine Jodfreisetzung stattfindet (vgl. die NALA-Experimente zur Spaltproduktfreisetzung aus Natriumpools [14.1]).

Beim Ausströmen bis zum Druckausgleich erhält man die etwas höheren Werte RFA, bei denen im verzögerten Fall aus dem o.g. Abfall meist wieder ein Anstieg wird, weil der Covergasdruck sinkt. Die untergrundbereinigten Werte RFU sind in drei instantanen Fällen unendlich. Die verzögerten Werte liegen zwischen $2,8 \cdot 10^3$ und $1,6 \cdot 10^5$. Die Tendenz, daß die verzögerten Werte niedriger sind, bleibt also erhalten.

14.4 Strontium - Rückhaltefaktoren

Mit SrO wurden insgesamt sieben Versuche durchgeführt, und zwar Nr. 302, 304-308 und 313. Es wurden hohe Rückhaltefaktoren erwartet, da es sich um partikelförmiges Material handelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 14.5 zusammengestellt. Tatsächlich ergaben sich auch instantane RFC-Werte zwischen $4,1 \cdot 10^3$ und $1,8 \cdot 10^5$. Deutlich höher sind naturgemäß die entsprechenden Werte für RFD und RFA. Die untergrundkorrigierten Werte RFU liegen zwischen $4,2 \cdot 10^3$ und unendlich.

Wieder sind die verzögerten Werte RFC-S3 und RFC-S4 niedriger als die instantanen, manchmal um fast eine Größenordnung. Der niedrigste Wert ist $5,0 \cdot 10^2$ aus Versuch 305. Mit Ausnahme von Nr. 313 wurde jeweils nur eine verzögerte Messung durchgeführt, und Nr. 302 war ohne verzögerte Messung.

14.5 Natrium: Freisetzung und Konzentration im Covergas

Die in die Sammelbehälter freigesetzten Natriummengen waren meist relativ gering und lagen typischerweise in der Größenordnung von 100 mg bis 1g. Die Zahlenwerte für die jeweiligen Versuche sind im Anhang 2 aufgeführt.

Aus den freigesetzten Mengen wurden die jeweiligen Covergaskonzentrationen vor und unmittelbar nach der Berstscheibentladung ausgerechnet unter der Annahme, daß eine homogene Verteilung vorliegt. Die so berechneten Werte sind in der Tabelle 14.6 zusammengestellt. Die Werte vor der Entladung zeigen eine - wenn

auch stark streuende - Abhängigkeit von der Pooltemperatur und liegen zwischen $0,38 \text{ g Na/m}^3$ bei niedriger Temperatur (260°C) und $16,28 \text{ g Na/m}^3$ bei 500°C . Die Werte nach der Entladung bewegen sich zwischen den Extremfällen $0,2 \text{ g Na/m}^3$ (niedrige Temperatur, 1 MPa Entladung) und 360 g Na/m^3 (hohe Temperatur, 4 MPa Entladung). Abgesehen von diesen beiden Extremfällen, wobei insbesondere der geringe Wert $0,2$ aus dem Rahmen fällt, liegt der mittlere Wert bei 53 g Na/m^3 . Dies ist deutlich niedriger als beim "eindimensionalen" Fall FAUST - 2A (siehe Tabelle 8.3), aber im Sinne einer Aerosolkonzentration immer noch ein sehr hoher Wert mit großem Abscheidepotential.

14.6 Abhängigkeit der Natriumfreisetzung und der Rückhaltefaktoren von Versuchsparametern

Wichtige Versuchsparameter sind die Pooltemperatur, der Entladungsdruck und das Zeitintervall zwischen Entladung und Ventilöffnung. Es liegt nahe, die Abhängigkeit der Natriumfreisetzung und der Rückhaltefaktoren von diesen Parametern zu betrachten.

Wegen der starken Streuung der experimentellen Werte ist die Angabe eines funktionalen Zusammenhanges zwischen freigesetzten Mengen und Versuchsparametern allerdings sehr schwierig. Im Falle der Rückhaltefaktoren kommt hinzu, daß jeweils auch nur eine geringe Datenmenge vorliegt. Trotzdem kann man gewisse Trends und Mittelwerte angeben:

Wie man der Abb. 14.1 entnehmen kann, steigt die Natriumkonzentration im Covergas mit der Pooltemperatur deutlich an. Grobe Mittelwerte sind $0,4 \text{ g Na/m}^3$ bei 200°C und 10 g Na bei 500°C . Ein solcher Trend ist aber nach der Entladung nicht zu erkennen (siehe Abb. 14.2). Hier liegt, bei stark streuenden Werten, der mittlere Wert bei 53 g Na/m^3 . Ein Anstieg ergibt sich aber, wenn man die Ergebnisse über dem Entladungsdruck aufträgt. Hier ergibt sich, in grober Mittelung, etwa 25 g Na/m^3 bei 1 MPa und 200 g Na bei 4 (siehe Abb. 14.3).

Fast trivial ist die Feststellung, daß die Konzentration mit steigendem Zeitintervall zwischen Entladung und Ventilöffnung abnimmt (siehe Abb. 14.4). Mittlere Werte sind 200 g Na/m^3 bei $\Delta t = 0,5 \text{ s}$ und 40 g Na/m^3 bei $\Delta t = 2,0 \text{ s}$.

Bei den Rückhaltefaktoren RFC läßt sich im Falle des Jod aus I_2 -Versuchen gemäß Abb. 14.6 ein asymptotischer Trend nach $\text{RFC} = 6$ mit steigendem Entladungsdruck angeben. Beim partikelförmigen Material ist jedoch, wie Abb. 14.5 zeigt, eine Trendaussage unmöglich. Die Werte streuen zwischen $4 \cdot 10^3$ und $6 \cdot 10^5$.

14.7 DRUCKSIGNALE UND SCHWINGUNGEN WÄHREND DER ENTLADUNG

Die Drucksignale während des Entladungsvorganges wurden mit Hilfe von Druckaufnehmern (Typ BROSA für heiße Kunststoffmassen) registriert, und zwar am Boden des Quellbehälters ($P_h = \text{Hochdruck}$), am Boden des Versuchsbehälters ($P_b = \text{Blase}$) und am Deckel des Versuchsbehälters ($P_c = \text{Covergas}$). Der Entladungs-

vorgang ist mit einigen heftigen Druckstößen verbunden. In den Abbildungen 14.7 und 14.8 werden die gemessenen Druckwerte als Funktion der Zeit dargestellt für die Versuche 304 (1,03 MPa - Entladung) und 313 (3,81 MPa - Entladung). Während der Druck P_h im Quellbehälter steil abfällt, beobachtet man bei P_b und P_c charakteristische Schwingungen mit typischerweise zwei bis vier Druckspitzen. Allerdings kann der Meßvorgang durch auftreffendes Natrium gestört oder unterbrochen werden; so bricht z.B. die P_c -Kurve oft nach der zweiten Schwingung ab.

Am Beispiel des Versuches 313 werden nun die beobachteten Phänomene detaillierter dargestellt: Die Zeiterfassung überstreicht die Zeitspanne von einer Sekunde. Die Berstscheibe öffnet bei 3,81 MPa (absolut) und 118,5 ms. P_h fällt rasch ab, P_b beginnt mit Anstieg bei 119,6 ms, danach

erstes Maximum bei 0,77 MPa / 133,5 ms,
erstes Minimum bei 0,05 MPa / 169,6 ms,
zweites Maximum bei 0,51 MPa / 195,1 ms,
zweites Minimum bei 0,08 MPa / 228,1 ms.

Aus der Maxima-Differenz ergibt sich eine Schwingungsdauer von 61,5 ms, aus der Minima-Differenz 58,5 ms. P_c beginnt mit Druckanstieg bei 119,8 ms, danach

erstes Maximum bei 0,42 MPa / 150,3 ms,
erstes Minimum bei 0,13 MPa / 184,8 ms,
zweites Maximum bei 0,24 MPa / 221,3 ms,

danach Abbruch des Meßsignals durch auftreffendes Natrium. Aus der Maxima-Differenz ergibt sich eine Schwingungsdauer von 71,0 ms. Die aus P_b und P_c abgeleitete mittlere Schwingungsdauer beträgt 63,7 ms. Nach etwa 0,5 s ist der Schwingungsvorgang beendet, und nach etwa 1 s ist ein völliger Druckausgleich erreicht.

Die heftigen Druckstöße bewirken, daß der Versuchsbehälter trotz der großen Gegengewichte ebenfalls eine Schwingungsbewegung ausführt. Beim Versuch 313 wurde eine maximale Auslenkung nach oben von 5 mm, nach unten von 3 mm gemessen. Konstruktiv sind 10 mm erlaubt.

Druckstöße, Oszillationen und Schwingungsdauer sind wichtige Meßgrößen für die modelltheoretische Interpretation der Versuche. Hier zeigt nun ein Vergleich mit den früheren FAUST-1B-Wasserversuchen [1.10] bei ähnlicher Geometrie auch sehr ähnliche Ergebnisse, z.B. Schwingungsdauern im Bereich von 50 ms. Man kann also davon ausgehen, daß die Modellvorstellungen zum Ablauf der Wasserversuche [1.10] ohne größere Änderungen auf die hier beschriebenen Natriumversuche übertragbar sind.

Es muß eingeräumt werden, daß die Druckmessung wegen der problematischen Randbedingungen nicht in allen Fällen gelang. In der Tabelle 14.7 sind die Resultate (Schwingungsdauer, maximale Druckspitzen) der Versuche zusammengestellt, bei denen eine Interpretation der Meßsignale in einwandfreier Weise möglich war.

15. MODELLRECHNUNGEN ZUM NATRIUMVERHALTEN BEI FAUST - 2B

15.1 PAROGA-Rechnungen

Wie bereits in Kap. 1 erwähnt, handelt es sich bei FAUST um ein vorwiegend experimentelles Programm. Modellrechnungen wurden bisher nur zu Teilaspekten durchgeführt. Dies betrifft insbesondere die Mechanik des Entladungsvorgangs einschließlich der Partikelbewegung. Das Rechenprogramm PAROGA (s. Kap. 2 und 9 sowie Anhang 1 und [2.10, 2.11, 2.12]) wurde auf die Geometrie und die Randbedingungen der 2B-Versuche erweitert (das in Kap. 9 beschriebene MOFA-Programm ist eine vereinfachte Version ohne Partikelbewegung). Bei den Rechnungen wurde angenommen (siehe dazu Abb. 3.1), daß der Entladungsvorgang zunächst als ebene Expansion bis zum Erreichen des Poolbehälters, danach als hemisphärische Expansion bis zum Erreichen der Tankwand und anschließend wieder als ebene Expansion mit anschließenden Oszillationen erfolgt. Das Entrainment ist berücksichtigt.

Man kann nun verschiedene Ergebnisse der PAROGA-Rechnungen mit den Experimenten vergleichen. Dies sind insbesondere die Schwingungsdauer, die Anzahl der Schwingungen, die Zeitdauer bis zum Ende der Schwingungen, die Druckspitzen und die Partikelabscheidung. Mit der Entrainmentkonstante als Parameter hat man in begrenztem Maße die Möglichkeit, die Übereinstimmung der berechneten Werte mit den Experimenten zu verbessern. Wie schon in Kap. 9 für die 2A-Versuche wurde auch hier mit der Konstanten $const = 3$ gerechnet.

Ergebnisse von PAROGA-Rechnungen für 2 MPa- und 4 MPa-Entladungen bei 0,73 m Poolhöhe sind in den Abbildungen 15.1 bis 15.4 dargestellt. Typischerweise erhält man vier bis fünf Schwingungen, die nach ca. 0,25 s durch das völlige Aufbrechen des Natriumkolbens in Entrainmenttropfen beendet ist. Diese Zeitdauer stimmt mit den experimentellen Beobachtungen gut überein. Die maximalen Druckspitzen sind erheblich höher als die experimentellen Werte, die mittlere Schwingungsdauer hingegen liegt in der Nähe der experimentellen Werte. Das Entrainment in das Covergasvolumen ist deutlich größer als in das Blasenvolumen. Die Partikelabscheidung durch Massenträgheit erfolgt in dem gezeigten Beispiel (20 µm-Eisenpartikeln) schon während des ersten Schwingungsvorganges.

15.2 Vergleichsrechnungen mit dem BERTA - Code

Der BERTA-Code (Blasenexpansion im Reaktortank, [2.10, 2.12, 2.12]) wurde bei INTERATOM erstellt mit dem Ziel, die mechanische Belastung des Reaktortanks und die Größe des instantanen radiologischen Quellterms im Anschluß an einen hypothetischen Kernzerlegungsstörfall unter den Bedingungen des SNR-2 abschätzen zu können. Im Vordergrund steht hierbei die Modellierung der Expansion und des Auf-

stiegs von Gasblasen infolge einer durch Brennstoffdampf getriebenen Coreentladung. Im FAUST-Versuchsprogramm hingegen wird die Expansion einer durch Druckentladung unter Wasser oder Natrium entstandenen Stickstoff- bzw. Argonblase und der hiermit verbundene Transport und die Abscheidung von Aerosolpartikeln untersucht. Der BERTA-Code tangiert die Thematik des FAUST - Programms, muß allerdings zur Interpretation der Versuche in einigen Punkten geändert werden. Als erster Schritt wurde von Jonas [2.12] der Code von der ursprünglichen Geometrie des SNR-2 auf die Geometrie der FAUST-Versuche übertragen. Anschließend wurden die Schwingungsperioden mit denen der Experimente für verschiedene Poolhöhen verglichen. Dies betraf hauptsächlich die Wasserversuche; mit den Natriumversuchen wurde am Beispiel des Versuchs 304 begonnen.

Für den Versuch FAUST 304 (Entladungsdruck 1 MPa, Poolhöhe 73 cm) der Versuchsreihe FAUST-2B kann festgestellt werden, daß die mit dem BERTA-Code berechnete Schwingungsperiode gut mit dem experimentellen Wert übereinstimmt (80 ms berechnet, 76 ms gemessen). In Abb. 15.5 ist der berechnete Druckverlauf für Blase und Covergas dargestellt. In Abb. 15.6 werden berechnete und gemessene Schwingungsdauern als Funktion des Entladungsdrucks gezeigt

Man muß allerdings darauf hinweisen, daß die BERTA-Rechnungen von einer Brennstoffdampfquelle ausgehen. Die Schwingung ist ungedämpft, weil die Quelle (Zweiphasengemisch) immer wieder genügend Dampf nachliefert. Der Entladungsdruck 1 MPa wurde durch passende Vorgabe der Brennstofftemperatur erzeugt.

Die theoretischen Arbeiten mit dem BERTA-Code sind zur Zeit aus Personalgründen unterbrochen. Zur Begleitung der FAUST-Versuche sind jedoch in Zukunft weitere Arbeiten notwendig.

16. ZUSAMMENFASSUNG, DISKUSSION, AUSBLICK

Im FAUST-Programm wird die Rückhaltefähigkeit des Kühlmittels für Brennstoff und Spaltprodukte nach einer Druckentladung vorwiegend experimentell untersucht. Nach einer Serie von Wasserversuchen (FAUST-1) wurden in der Phase FAUST-2 Berstscheibenuntersuchungen unter Natrium bis 500°C und 3,81 MPa durchgeführt mit den beiden Versuchsständen 2A (etwa 2 Liter Natrium) und 2B (etwa 200 Liter Natrium). Dem Argon-Druckgas wurden die Simulationsmaterialien Cs, CsI, NaI, I₂, SrO und UO₂ beigemischt. Cs war flüssig, I₂ dampfförmig, alle anderen Substanzen partikelförmig.

Ein wesentliches Ergebnis der früheren Wasserversuche war, daß das Rückhaltevermögen des Pools für partikelförmige Substanzen sehr hoch ist (Rückhaltefaktor $RF > 10^4$), wenn der Entladungsvorgang unter erhöhtem Druck abläuft. Dann werden die beiden wichtigen Abscheidemechanismen "Impaktion infolge Massenträgheit relativ zu den Blasenoszillationen" und "Auswaschen durch Sedimentation des Flüssigkeitseintrags in Blase und Covergas (Entrainment)" wirksam. Andererseits ist das Rückhaltevermögen für Partikeln, die in aufsteigenden Blasen eingeschlossen sind, deutlich kleiner.

Die Nachweisgrenze bei den Wasserversuchen lag bei $RF = 10^4$. Bei den Natriumversuchen wurden, je nach chemischer Nachweismethode, hingegen Werte bis $RF = 10^6$ erreicht. Bei den Natriumversuchen konnten in den meisten Fällen Spuren des Simulationsmaterials im freigesetzten Natrium nachgewiesen werden. Diese Spuren waren allerdings - außer im Falle I₂ - oft so gering, daß eine Unterscheidung von Untergrundwerten schwierig war.

Die 2A- und 2B-Versuche zeigten bezüglich der Rückhaltefaktoren keine gravierenden Unterschiede, obwohl sich die eingesetzte Natriummenge um 2 Größenordnungen unterschied. Die instantanen Rückhaltefaktoren RFC bei den 2A-Versuchen liegen in der Größenordnung 10^4 bis 10^5 für Jod und Strontium aus partikelförmigem NaI bzw. SrO, oberhalb $5 \cdot 10^3$ für flüssiges Cs, bei 10^3 für UO₂-Staub und bei 6 für dampfförmiges Jod aus I₂. Ein ähnliches Bild ergibt sich aus den 2B-Versuchen: Jod aus NaI und CsI hat RFC-Werte von $5 \cdot 10^3$ bis $6 \cdot 10^5$, Cäsium aus CsI um 10^4 , Strontium aus SrO von $4 \cdot 10^3$ bis $2 \cdot 10^5$, Cäsium aus flüssigem Cs $7 \cdot 10^3$ und dampfförmiges Jod wieder im Bereich von 6 (bei 2B gab es keine UO₂-Versuche, siehe spätere Anmerkung). In pauschaler Vereinfachung kann man empfehlen, bei Sicherheitsbetrachtungen die instantanen Rückhaltefaktoren 10^4 für partikelförmiges Material und 6 für Jod zu benutzen. Es bleibt anzumerken, daß die untergrundkorrigierten Werte RFU beim partikelförmigen Material noch deutlich höher sein können

(RFU = ∞ in einigen Fällen), wobei jedoch das Anbringen der Untergrundkorrektur mit Problemen verbunden ist.

Wegen der starken Streuung der Meßpunkte und ihrer relativ geringen Anzahl ist es - außer beim dampfförmigen Jod - sehr schwierig, eine RF-Abhängigkeit von experimentellen Parametern wie Poolhöhe und Entladungsdruck anzugeben. Im Falle des Jod zeigen die Daten hingegen eine asymptotische Annäherung an $RF = 6$ mit steigendem Entladungsdruck.

Die verzögerten Rückhaltefaktoren aus den Probenahmen S3 und S4 sind beim partikelförmigen Material oft niedriger als die instantanen Werte. Dies ist damit erklärbar, daß sich an die Druckentladung noch eine längere Phase mit aufsteigenden kleinen Gasblasen anschließt, die einen verstärkten Beitrag zum Partikeltransport durch den Pool leisten können. Beim dampfförmigen Jod hingegen sind (außer Versuch 305) die Rückhaltefaktoren zeitlich konstant oder ansteigend.

Die Natriumkonzentration im Covergas (Dampf und Aerosol) vor der Entladung liegt bei 500°C Pooltemperatur in der Größenordnung von 10 g / m^3 . Dieser Wert ist typisch für den Fall des thermisch isolierten Deckels, wo die Differenz zwischen Untergurttemperatur und Pooltemperatur relativ gering ist (typisch sind $\Delta T = 50^\circ\text{C}$). Unmittelbar nach der Entladung ist die Covergaskonzentration erheblich höher: Bei 2B wurden Werte bis 360 g / m^3 , bei 2A sogar bis 977 g / m^3 gemessen. Diese Konzentrationen können nur transient existieren; die hohe Sedimentationsrate bewirkt gleichzeitig ein hohes Maß an Abscheidung.

Die Kenntnis der Konzentrationswerte ist wichtig zur Abschätzung der freigesetzten Mengen bei Leckagen. Bei den FAUST - 2 - Versuchen wurde angenommen, daß die Leckagen durch die erste Druckspitze des "Natriumhammers" verursacht und ca. 1 Sekunde nach der Entladung wirksam werden. Unter dieser Voraussetzung waren die freigesetzten Natriummengen relativ gering und lagen im Grammbereich. Bereits vor der Entladung geöffnete Leckagen würden zwar zu konservativen, jedoch unrealistisch hohen Werten führen.

Die Entladungsvorgänge sind mit Druckspitzen und Schwingungen des "Natriumkolbens" sowie damit verbundenen Entrainmentprozessen verbunden. Die Druckspitzen sind meist deutlich kleiner als der Entladungsdruck. Der Schwingungsvorgang hat typischerweise eine Schwingungsdauer von 70 ms und endet nach ca. 0,3 bis 0,5 s. Nach dieser Zeit ist der Natriumkolben infolge Entrainment in Blase und Covergas in ein Gas-Tröpfchen-Gemisch aufgebrochen.

Die Mechanik des Entladungsvorgangs sowie die Partikelabscheidung durch Impaktion konnte mit dem Rechenprogramm PAROGA modelltheoretisch untersucht werden. Eine relativ gute Übereinstimmung mit den Experimenten ergibt sich bei der Schwingungsdauer und bei der Anzahl der Schwingungen. Ein Ergebnis der Rech-

nungen ist, daß das Entrainment eine wichtige Rolle spielt. Das Entrainment in das Covergas ist wesentlich höher als in die Blase. In einer Zeitspanne kleiner als 0,5 s ist der Flüssigkeitskolben in ein Gas-Tröpfchen-Gemisch aufgebrochen. Die völlige Partikelabscheidung durch Impaktion erfolgt oft schon während der ersten Schwingung.

Der wesentlich umfangreichere BERTA-Code wurde auf die geometrischen Randbedingungen der FAUST-Versuche abgeändert und am Beispiel des Versuches 304 verifiziert. BERTA berechnet die hydrodynamischen und thermodynamischen Vorgänge bei der Entladung, allerdings unter Verwendung einer UO_2 -Dampf-Quelle. Im Falle des Versuches Nr. 304 stimmen berechnete und gemessene Schwingungsperioden sehr gut überein. Bei den zukünftigen FAUST-Versuchen wird der BERTA-Code zur modelltheoretischen Interpretation eine wichtige Rolle spielen.

Die Wasserversuche FAUST - 1 hatten orientierenden Charakter. Die Versuche FAUST - 2 brachten den Übergang auf realistische Materialien für Pool, Spaltprodukte und Schutzgas und liefen auch bei realistischen Pooltemperaturen und Druckwerten ab. Es ist allerdings immer noch unzureichend, wenn das Reaktor-Core durch ein Druckgas-Partikel-Gemisch angenähert wird, das sich auf dem Temperaturniveau des Natriumpools befindet. Daher wird ein weiterer wichtiger Schritt zur realistischeren Simulation des Störfallablaufs im Rahmen der Phase FAUST - 3 geschehen. Hier werden 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

untersucht. Die Phase 3 hat inzwischen begonnen und wird den Abschluß des FAUST-Programms darstellen.

DANKSAGUNG

Herrn Ing. W. Seither (IT) danken wir für seine intensive Mitarbeit bei Auslegung, Konstruktion und Inbetriebnahme der beiden Versuchsstände.

Die chemischen Analysen bis zum Versuch 308 wurden von Frau Dr. Mainka und Herrn Coerdts im IRCh durchgeführt, ab Versuch 309 von Frau Dr. Adelhelm und Frl. A. Grim im IMF 1. Dafür möchten wir uns herzlich bedanken.

Ebenso danken wir Herrn M. Vögtle für seine technische Mitarbeit bei den Experimenten und Herrn Dr. R. Jonas für seine Mitarbeit bei der modelltheoretischen Interpretation mit den Rechenprogrammen PAROGA und BERTA.

Schließlich möchten wir uns bei Frau E. Böhme für die Anfertigung des Manuskripts bedanken.

LITERATUR

- [1.1] A.E. Waltar, A.B. Reynolds, "Fast Breeder Reactors", Pergamon Press, New York, 1981.
- [1.2] P. Royl, M. Cramer, R. Düsing, C. Essig, R. Fröhlich, P. Schmuck, D. Struwe, W. Zimmerer, "Untersuchungen zu Kühlmitteldurchsatzstörfällen im abgebrannten Mark 1A Kern des Kernkraftwerks Kalkar", KfK 2845, Dezember 1979.
- [1.3] W. Bohl, "Some Recriticality Studies with SIMMER-II", Proc. Int. Mtg. Fast Reactor Safety Technology, Seattle, Washington, August 19-23, 1979, Vol. III, p. 1415, American Nuclear Society (1979).
- [1.4] W. Maschek, E.A. Fischer, and M.W. Asprey, "Transition Phase and Recriticality Analyses for a SNR-Type Homogeneous Core with the SIMMER-II Code", Int. Top. Mtg. Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, July 19-23, 1982, Lyon, France, Vol. III, p. 357, European Nuclear Society (1982).
- [1.5] S. Kondo, A. Furutani, and M. Ishikawa, "SIMMER-II Application and Validation Studies in Japan for Energetics Accomodation of Severe LMFBR Accidents", Proc. Int. Top. Mtg. Fast Reactor Safety Knoxville, Tennessee, April 21-25, 1985, Vol. I, p. 481, American Nuclear Society.
- [1.6] T.G. Theofanous, and C.R. Bell, "An Assessment of CRBR Core Disruptive Accident Energetics", NUREG/CR-3225, LA-9716-MS (March 1984).
- [1.7] P. Schmuck, "The Postdisassembly Phase in LMFBRs: Simmer Results and their Evaluation", Int. Top. Mtg. Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, July 19-23, 1982, Lyon, France, Vol. IV, 79 (1982).
- [1.8] M. Schikorr, E. Rumble, "Unveröffentlichte Ergebnisse (1983)".
- [1.9] Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS, "Risikoorientierte Analyse zum SNR-300", Bericht GRS-A-700, April 1982.
- [1.10] W. Schütz, J. Minges, W. Haenscheid, "Wasser-Simulationsexperimente zum instantanen Quellterm beim schweren Brutreaktorstörfall", KfK 4249 (September 1987).

- [1.11] J. Minges, H. Sauter, W. Schütz, "Retention factors for fission products from sodium tests to simulate a severe LMFBR accident", Nucl. Eng. Design 137 (1992) 133-138.
- [1.12] J. Minges, H. Sauter, W. Schütz, "Out-of-pile experiments on fission product source terms for severe accidents", Proc. of the 1990 Int. Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird/Utah, Aug. 1990, 563-572.
- [1.13] J. Minges, W. Schütz, "Experiments on sodium aerosols, heat transfer, and cesium enrichment in the cover gas of fast breeder reactors", Proc. of the 1990 Int. Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird/Utah, Aug. 1990, 573-581.
- [2.1] 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).
- [2.2] G. Berthoud, A.L. Longest, A.L. Wright, W. Schütz, "Experiments on liquid metal fast breeder reactor aerosol source terms after severe accidents", Nuclear Technology Vol. 81, May 1988, pp. 257-277.
- [2.3] H. Jordan, W. Schikarski, H. Wild, "Nukleare Aerosole im geschlossenen System", KfK 1989 (Okt. 1974).
- [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] 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.
- [2.9] M.L. Corradini, "Heat Transfer and Fluid Flow Aspects of Fuel-Coolant Interactions", MIT Nucl. Eng. Dept., COO-2781-12TR (Sept. 1978).

- [2.10] R. Jonas, W. Schütz, A. Reetz, "Model calculations and experimental verification of the bubble behaviour in a Bethe-Tait accident", Nucl. Eng. Design 118 (1990) 71-76.
- [2.11] R. Jonas, W. Schütz, "Motion and deposition of particles in expanding and oscillating gas bubbles", J. Aerosol Science 19 No. 6 (1988), 753-765.
- [2.12] R. Jonas, W. Schütz, "Vergleich der FAUST-Wasserexperimente mit Modellrechnungen", KfK-4351, April 1988.
- [2.13] A. Reetz, "Unveröffentlichte Ergebnisse (1984)".
- [2.14] J. Pich, W. Schütz, "On the theory of particle deposition in rising gas bubbles: the absorption minimum", J. Aerosol Science Vol. 22 No. 3 (1991) 267-272.
- [2.15] H. Kürten, J. Raasch, H. Rumpf, "Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfall konstanter Geschwindigkeit", Chem. Ing. Techn. 38, 941 (1966).
- [9.1] M. Husli, W. Schütz, "Unveröffentlichte Ergebnisse, April 1985".
- [14.1] H. Sauter, W. Schütz, "Aerosol- und Aktivitätsfreisetzung aus kontaminierten Natriumlachen in Inertgasatmosphäre", KfK-3504, Juli 1983.

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Die Tabellen-Nummer bezieht sich auf das jeweilige Kapitel, in dem die Tabelle behandelt wird.

- 6.1 FAUST - 2A - Versuche, Parameter vor der Entladung.
- 8.1 FAUST - 2A - Versuche, Ergebnisse.
- 8.2 FAUST - 2A - Versuche. Instantane Rückhaltefaktoren für Cs, I, Sr und U. Definition von RFD, RFA, RFC, RFU siehe Text Kap. 7.2 und 13.2.
- 8.3 FAUST - 2A - Versuche. Berechnete Natrium-Konzentration (Dampf / Tröpfchen) im Covergas kurz nach der Berstscheibenentladung (Zeitpunkt: Öffnung des Klappenventils).
- 12.1 FAUST - Versuche 301 - 314, Zusammenstellung der Parameter.
- 12.2 Zeitlicher Ablauf der FAUST - 2B - Versuche und Dauer der einzelnen Versuchszustände.
- 14.1 Rückhaltefaktoren für Cäsium aus Versuchen mit metallischem Cs.
- 14.2 Rückhaltefaktoren für Cäsium aus Versuchen mit CsI.
- 14.3 Rückhaltefaktoren für Jod aus Versuchen mit I₂.
- 14.4 Rückhaltefaktoren für Jod aus Versuchen mit NaI bzw. CsI.
- 14.5 Rückhaltefaktoren für Strontium aus Versuchen mit SrO.
- 14.6 Aus den Probenahmen S1 und S2 berechnete Natriumkonzentrationen im Covergas vor und kurz nach der Berstscheibenentladung.
- 14.7 FAUST - 2B - Versuche, Zusammenstellung der mittleren Schwingungsdauer und der maximalen Druckspitzen P_b am Behälterboden und P_c im Covergas.

Exp. Nr.	Berstschr., Typ, bzw. Modus	Pooltemperatur [°C]	Poolmedium X	Menge X [kg]	Poolhöhe [cm]	Entladene Substanz Y	Menge Y [g]	Vol. Quellbehälter [Liter]	Entspannungsvol. [Liter]	Bemerkungen
201	A 1	20	H ₂ O	2,0	25,4	-	-	1,45	7,69	1)
202	A 2	20	Luft	-	-	-	-	1,45	-	
203	A 2	20	H ₂ O	1,5	19,0	-	-	1,45	-	
204	A 2	20	H ₂ O	1,5	19,0	-	-	1,45	7,69	
205	A 2	260	Na	2,22	31,7	-	-	1,45	7,69	2) 1) 3)
206	A 2	500	Na	2,50	38,3	-	-	5,45	24,54	
207	B	500	Na	2,67	41,0	-	-	5,45	24,45	
208	C 1	20 / 500	Luft	-	-	-	-	5,45	-	
209	C 2	500	Na	2,69	41,3	-	-	5,45	24,45	
210	C 2	500	Na	2,68	41,1	NaI	10,0	5,45	24,45	4)
211	D	500	Na	2,00	30,7	SrO	10,0	5,45	24,45	
212	D	500	Na	1,50	23,0	UO ₂	6,13	5,45	24,45	
213	D	500	Na	2,02	31,0	-	-	5,45	24,45	
214	D	500	Na	1,95	29,9	UO ₂	6,42	5,45	24,45	
215	D	500	Na	1,84	28,2	Cs	0,74	5,45	24,45	
216	D	255	Na	1,93	29,6	I ₂	6,40	5,45	24,45	

Tab. 6.1: FAUST - 2 A - VERSUCHE, PARAMETER VOR DER ENTLADUNG (Erläuterungen siehe nächste Seite)

Erläuterungen zu Tabelle 6.1:

Berstscheiben:

- A = Inconel - BS, Nenndruck 1 MPa, zum Einbau mit Wölbung gegen Druckrichtung*
- A1 = Typ A, mit Wölbung gegen Druckrichtung eingebaut*
- A2 = Typ A, jedoch mit Wölbung in Druckrichtung eingebaut*
- B = Inconel - BS, Nenndruck 1 MPa, zum Einbau mit Wölbung in Druckrichtung*
- C1 = Edelstahlfolie als BS (Test mit 10, 20, 30, 100 μm Folienstärke)*
- C2 = Edelstahlfolie als BS, 100 μm Folienstärke*
- D = Doppelberstscheibe: Inconel Typ B + Edelstahlfolie 20 μm*

Bemerkungen

- 1) Testversuch ohne Poolflüssigkeit*
- 2) Ab Versuch 206 vergrößertes Quellbehälter- und Entspannungsvolumen*
- 3) ZerreiBtests für Edelstahlfolien bei 20°C und 500°C*
- 4) Wegen des hohen Dampfdrucks von elementarem Jod wurde dieser Versuch bei niedrigerer Temperatur durchgeführt.*

Druck im Entspannungsvolumen: *Versuche 201 - 207 evakuiert, ab Versuch 208 0,1 MPa*

Druckgas im Quellbehälter: *Argon in allen Fällen*

Covergas: *Argon bei Natriumversuchen, Luft bei Wasserversuchen*

Exp. Nr.	Berstdruck absolut [MPa]	Reaktion der Berstscheibe	Ventil zum Entspannungs- volumen geöffnet nach t [sec]	Freigesetztes Natrium im E'-Volumen [g]	Freigesetztes I, Sr, U bzw. Cs im E'-Volumen [µg]	Bemerkungen
201	1,22	nur Leckage	6	-	-	
202	1,70	voll offen	-	-	-	b)
203	1,74	teilw. offen	-	-	-	b)
204	1,69	"	6	-	-	
205	1,50	teilw. offen	0,8	*	-	a)
206	1,51	"	4	*	-	a)
207	1,08	"	6	*	-	a)
208	*	voll offen	-	-	-	b) c)
209	1,39	½ offen	10	1,65	-	
210	1,39	½ offen	6	5,49	47 I	
211	1,12	voll offen	6	8,76	180 Sr	
212	1,22	"	6	2,46	2000 U	
213	1,05	"	4	2,87	-	d)
214	1,26	"	2	3,12	9300 U	
215	1,11	"	3	2,76	< 135 Cs	
216	1,11	"	3	0,19	805000 I	

Tab. 8.1: FAUST - 2 A - VERSUCHE, ERGEBNISSE (Erläuterungen siehe nächste Seite)

Erläuterungen zu Tabelle 8.1:

Versuche 201 - 209: Tests zur Erprobung der Technik
Versuche 210 - 216: Bestimmung von Rückhaltefaktoren
** : Siehe Bemerkung a)*

Bemerkungen

- a) Berstscheibe nur teilweise offen, deshalb nur langsam abfließendes Natrium und unrealistisch große Natriumfreisetzung (Bereich 0,1 - 1 kg)*
- b) Ventil zum Entspannungsvolumen blieb geschlossen*
- c) Zerreiß-Tests für Edelstahlfolien*
- d) Untergrundtest zur Bestimmung der natürlichen Jod- und Strontiumanteile*

<i>Exp. Nr.</i>	210	211	212	214	215	216
<i>Substanz</i>	I (aus NaI)	Sr (aus SrO)	U (aus UO ₂)	U (aus UO ₂)	Cs	I (aus I ₂)
RFD (direkt aus Messung)	$1,80 \cdot 10^5$	$4,70 \cdot 10^4$	$2,70 \cdot 10^3$	$6,09 \cdot 10^2$	$> 5,5 \cdot 10^3$	7,95
RFA (Ausströmen auf 0,1 MPa)	$1,57 \cdot 10^5$	$4,05 \cdot 10^4$	$2,31 \cdot 10^3$	$5,24 \cdot 10^2$	$> 4,7 \cdot 10^3$	6,42
RFC (Gesamt-Covergas)	$1,57 \cdot 10^5$	$4,05 \cdot 10^4$	$2,31 \cdot 10^3$	$5,24 \cdot 10^2$	$> 4,7 \cdot 10^3$	6,42
RFU (Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur)	∞	∞	$2,4 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^2$	$> 5,0 \cdot 10^3$	6,42

Tab. 8.2: FAUST - 2A - VERSUCHE

*Instantane Rückhaltefaktoren für Cs, I, Sr und U.
Definition von RFD, RFA, RFC, RFU siehe Text Kap. 7.2 und 13.2*

<i>Exp. Nr.</i>	<i>Natrium-Konzentration im Covergas [g l m³]</i>
210	657
211	977
212	261
213	321
214	346
215	303
216	22

Tab. 8.3: FAUST - 2A - VERSUCHE

*Berechnete Natrium-Konzentration (Dampf / Tröpfchen)
im Covergas kurz nach der Berstscheibenentladung
(Zeitpunkt: Öffnung des Klappenventils)*

Exp. Nr.	Berstscheibe [MPa]	Berstdruck absolut [MPa]	Pooltemperatur [°C]	Poolhöhe [m]	Substanzen und Menge [g]	Anzahl Sammelbehälter	Bemerkungen
301	1	1,12	222	0,73	-	1	
302	1	1,03	250	0,73	SrO 6,2 NaI 9,7	2	
303	2	2,02	260	0,73	I ₂ 0,56	2	
304	1	1,03	460	0,73	SrO 10,0 NaI 10,0	3	
305	2	1,94	360	0,73	I ₂ 2,0 SrO 10,0	3	
306	1	ca. 0,3	495	0,60	NaI 10,0 SrO 10,0	3	Berstscheibe in entgegengesetzter Richtung eingebaut.
307	1	0,93	465	0,60	CsI 10,4 SrO 10,2	3	
308	2	1,85	500	0,60	CsI 9,94 SrO 9,96	3	
309	-	-	500	0,73	-	4	Testversuch ohne Berstscheibe zur Untersuchung, wie die Natriummenge in den Sammelbehältern von der Dauer der Probenahme abhängt.
310	3	3,40	400	0,60	I ₂ 0,456	4	
311	3	2,81	450	0,81	I ₂ 0,985	4	
312	4	3,80	490	0,73	I ₂ 0,514	4	2 Sammelbehälter für Untergrund.
313	4	3,81	480	0,73	SrO 9,50	4	
314	3	3,12	490	0,40	Cs 4,50	4	

Tab. 12.1: FAUST- VERSUCHE 301 - 314, ZUSAMMENSTELLUNG DER PARAMETER

Exp. Nr.			S 1	Berstscheibe öffnet		S 2			S 3			S 4		
	Zustand	1	2 [min]	3 [min]	4 [sec]	5 [min]	6 [min]	7 [min]	8 [min]	9 [min]	10			
301					2	12								
302			45	6	1,5	44								
303			60	47	1,5	57								
304			20	30	1	0,5	0	20						
305			45	15	1	0,16	0	47						
306			9	-	9	6	0	60						
307			45	4	1	1	0	30						
308			60	30	1	10	0	60						
309			0,16	15	-	1	15	10	15	100				
310			5	60	2	0,16	0,16	30	0	60				
311			5	16	2	0,16	5	7	30	5				
312			2 x 5	80	1	0,16	5	10						
313			2 x 5	60	0,5	0,16	5	5	30	5				
314			2 x 5	23	1	0,16	5	5	30	7				

Tab. 12.2: ZEITLICHER ABLAUF DER FAUST - 2B - VERSUCHE UND DAUER DER EINZELNEN VERSUCHSZUSTÄNDE

Versuch	314	
Direkt aus Messung		
<i>RFD - S2</i> <i>RFD - S3</i> <i>RFD - S4</i>	<i>7,1 E04</i> <i>7,5 E05</i> <i>1,1 E05</i>	<i>instantan</i> <i>verzögert</i>
Ausströmen auf 0,1 MPa		
<i>RFA - S2</i> <i>RFA - S3</i> <i>RFA - S4</i>	<i>2,3 E04</i> <i>3,3 E04</i> <i>7,1 E04</i>	<i>instantan</i> <i>verzögert</i>
Gesamt-Covergas		
<i>RFC - S2</i> <i>RFC - S3</i> <i>RFC - S4</i>	<i>7,4 E03</i> <i>8,1 E03</i> <i>8,0 E03</i>	<i>instantan</i> <i>verzögert</i>
Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur		
<i>RFU - S2</i> <i>RFU - S3</i> <i>RFU - S4</i>	<i>7,9 E03</i> <i>8,7 E03</i> <i>8,6 E03</i>	<i>instantan</i> <i>verzögert</i>

TAB. 14. 1: RÜCKHALTEFAKTOREN FÜR CÄSIUM AUS VERSUCHEN MIT METALLISCHEM Cs

Versuch	307	308	
Direkt aus Messung			
<i>RFD - S2</i>	<i>9,3 E04</i>	<i>6,2 E04</i>	<i>instantan verzögert</i>
<i>RFD - S3</i>	<i>1,2 E05</i>	<i>4,1 E04</i>	
<i>RFD - S4</i>	-	-	
Ausströmen auf 0,1 MPa			
<i>RFA - S2</i>	<i>6,5 E04</i>	<i>2,8 E04</i>	<i>instantan verzögert</i>
<i>RFA - S3</i>	<i>2,5 E05</i>	<i>3,0 E04</i>	
<i>RFA - S4</i>	-	-	
Gesamt-Covergas			
<i>RFC - S2</i>	<i>1,3 E04</i>	<i>9,0 E03</i>	<i>instantan verzögert</i>
<i>RFC - S3</i>	<i>1,8 E04</i>	<i>6,2 E03</i>	
<i>RFC - S4</i>	-	-	
Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur			
<i>RFU - S2</i>	<i>1,7 E04</i>	<i>1,2 E04</i>	<i>instantan verzögert</i>
<i>RFU - S3</i>	<i>2,6 E04</i>	<i>7,5 E03</i>	
<i>RFU - S4</i>	-	-	

TAB. 14. 2: RÜCKHALTEFAKTOREN FÜR CÄSIUM AUS VERSUCHEN MIT CsI

Versuch	303	305	310	311	312	
Direkt aus Messung						
RFD - S2	113	1369	50	28	30	instantan
RFD - S3	-	206	49	47	80	verzögert
RFD - S4	-	-	348	2189	-	"
Ausströmen auf 0,1 MPa						
RFA - S2	41	596	15	12	11	instantan
RFA - S3	-	143	19	29	36	verzögert
RFA - S4	-	-	187	2693	-	"
Gesamt-Covergas						
RFC - S2	15	218	6,4	6,5	6,0	instantan
RFC - S3	-	34	6,5	11	15	verzögert
RFC - S4	-	-	6,4	11	-	"
Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur						
RFU - S2	15	247	6,4	6,5	6,0	instantan
RFU - S3	-	35	6,5	11	15	verzögert
RFU - S4	-	-	6,4	11	-	"

TAB. 14. 3: RÜCKHALTEFAKTOREN FÜR JOD AUS VERSUCHEN MIT I₂

Versuch	302	304	306	307	308	
Direkt aus Messung						
RFD - S2	4,1 E04	3,3 E06	4,4 E05	1,0 E05	5,5 E04	instantan
RFD - S3	-	4,2 E05	1,7 E04	4,3 E04	5,2 E04	verzögert
RFD - S4	-	-	-	-	-	
Ausströmen auf 0,1 MPa						
RFA - S2	2,4 E04	2,5 E06	5,6 E05	7,0 E04	2,5 E04	instantan
RFA - S3	-	1,1 E06	*	9,0 E04	3,9 E06	verzögert
RFA - S4	-	-	-	-	-	
Gesamt-Covergas						
RFC - S2	5,4 E03	6,1 E05	6,4 E04	1,4 E04	8,0 E03	instantan
RFC - S3	-	8,2 E04	2,6 E03	6,2 E03	8,0 E03	verzögert
RFC - S4	-	-	-	-	-	
Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur						
RFU - S2	∞	∞	∞	5,5 E04	1,5 E04	instantan
RFU - S3	-	1,6 E05	2,8 E03	9,1 E03	1,5 E04	verzögert
RFU - S4	-	-	-	-	-	

TAB. 14.4: RÜCKHALTEFAKTOREN FÜR JOD AUS VERSUCHEN MIT NaI BZW. CsI

Anmerkung: Bei Versuch 306 war bei dem mit * bezeichneten Wert das Covergas bereits auf Unterdruck.

Versuch	302	304	305	306	307	308	313	
Direkt aus Messung								
RFD - S2	9,1 E04	6,7 E05	2,6 E04	3,2 E05	3,9 E05	1,1 E05	9,5 E05	instantan
RFD - S3	-	1,7 E05	3,0 E04	4,6 E04	4,4 E04	8,6 E04	2,4 E05	verzögert
RFD - S4	-	-	-	-	-	-	2,4 E06	"
Ausströmen auf 0,1 MPa								
RFA - S2	5,2 E04	5,0 E05	1,1 E04	4,0 E05	2,7 E05	5,1 E04	3,3 E05	instantan
RFA - S3	-	4,7 E05	2,1 E03	*	9,2 E04	6,4 E04	1,1 E05	verzögert
RFA - S4	-	-	-	-	-	-	1,6 E06	"
Gesamt-Covergas								
RFC - S2	1,2 E04	1,2 E05	4,1 E03	4,6 E04	5,4 E04	1,6 E04	1,8 E05	instantan
RFC - S3	-	3,4 E04	5,0 E02	7,0 E03	6,4 E03	1,3 E04	4,9 E04	verzögert
RFC - S4	-	-	-	-	-	-	4,8 E04	"
Gesamt-Covergas mit Untergrundkorrektur								
RFU - S2	1,3 E04	3,5 E05	4,2 E03	7,7 E04	1,1 E05	5,6 E04	∞	instantan
RFU - S3	-	4,1 E04	5,0 E02	7,4 E03	6,7 E03	2,8 E04	3,8 E05	verzögert
RFU - S4	-	-	-	-	-	-	3,7 E05	"

TAB. 14.5: RÜCKHALTEFAKTOREN FÜR STRONTIUM AUS VERSUCHEN MIT SrO

Anmerkung: Bei Versuch 306 war bei dem mit * bezeichneten Wert das Covergas bereits auf Unterdruck.

Exp. Nr.	Na-Konzentration im Covergas [g / m ³]	
	vorher	nachher
301	-	0,2
302	0,91	115,9
303	0,38	19,4
304	2,05	21,0
305	3,88	140,5
306	5,42	11,2
307	5,61	13,7
308	16,28	37,3
309	7,17	-
310	1,27	96,8
311	4,90	14,8
312	3,02	70,0
313	10,75	360,3
314	4,29	41,6

Tab. 14.6: Aus den Probenahmen S1 und S2 berechnete Natriumkonzentrationen im Covergas vor und kurz nach der Berstscheibenentladung.

Exp. Nr.	Berstdruck absolut [MPa]	Poolhöhe [m]	mittlere Schwingungsdauer [ms]	maximale Druckspitze absolut	
				P_b [MPa]	P_c [MPa]
302	1,03	0,73	79	0,38	0,15
303	2,02	0,73	77	0,60	0,21
304	1,03	0,73	76	0,47	0,17
305	1,94	0,73	78	0,65	0,22
307	0,93	0,60	71	0,32	0,14
313	3,81	0,73	64	0,77	0,43
314	3,12	0,40	63	0,50	0,28

Tab. 14.7: FAUST - 2B - VERSUCHE, ZUSAMMENSTELLUNG DER MITTLEREN SCHWINGUNGSDAUER UND DER MAXIMALEN DRUCKSPITZEN P_b AM BEHÄLTERRBODEN UND P_c IM COVERGAS

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Die Abbildungs-Nummer bezieht sich auf das jeweilige Kapitel, in dem die Abbildung behandelt wird.

- Abb. 1.1 Das Prinzip der FAUST-Versuche.
- Abb. 3.1 Prinzip des Wasserversuchsstandes FAUST-1B, des Natriumversuchsstandes FAUST-2B und der PAROGA-Rechnungen mit reaktorähnlicher Geometrie.
- Abb. 3.2 Aufnahmen vom Hochgeschwindigkeitsfilm zum Versuch 1B Nr. 103.
- Abb. 5.1 Versuchsaufbau FAUST-2A.
- Abb. 5.2 Die beiden Methoden zum Einbringen von Partikeln in den Gasstrom während der Entladung.
- Abb. 5.3 Die Methode zum Einbringen von Cäsium und Jod in den Gasstrom während der Entladung.
- Abb. 5.4 Foto: Versuchsstand FAUST-2A.
- Abb. 5.5 Foto: Detail von FAUST 2A: Doppelberstscheibe.
- Abb. 5.6 Foto: Berstscheiben, ungeöffnet und geöffnet.
- Abb. 5.7 Foto: Einsatzkorb für Quellbehälter.
- Abb. 8.1 Drucksignale, Versuch 216.
- Abb. 9.1 MOFA-Rechnung für FAUST-2A.
- Abb. 10.1 Gegenüberstellung FAUST-2A und -2B.
- Abb. 10.2 Versuchsstand FAUST-2B.
- Abb. 10.3 Foto: Versuchsstand FAUST-2B.
- Abb. 13.1 Aufgesammelte Natriummengen, Versuch 309.
- Abb. 14.1 Natriumkonzentration im Covergas vor der Entladung als Funktion der Pooltemperatur.
- Abb. 14.2 Natriumkonzentration im Covergas nach der Entladung als Funktion der Pooltemperatur.
- Abb. 14.3 Wie 14.2, aber als Funktion des Entladungsdrucks.
- Abb. 14.4 Wie 14.2, aber als Funktion des Zeitintervalls zwischen Entladung und Probenahme.

- Abb. 14.5 Instantane Rückhaltefaktoren RFC für Jod und Strontium aus CsI, NaI bzw. SrO.
- Abb. 14.6 Instantane Rückhaltefaktoren RFC für Jod aus dampfförmigem I₂.
- Abb. 14.7 Drucksignale, Versuch 304, 1,08 MPa.
- Abb. 14.8 Drucksignale, Versuch 313, 3,81 MPa.
- Abb. 15.1 PAROGA-Rechnung: Druckverlauf im Covergas.
- Abb. 15.2 PAROGA-Rechnung: Entrainment.
- Abb. 15.3 PAROGA-Rechnung: Höhe der Flüssigkeitssäule.
- Abb. 15.4 PAROGA-Rechnung: Partikelabscheidung.
- Abb. 15.5 BERTA-Rechnung: Druck in Blase und Covergas beim Versuch 304.
- Abb. 15.6 Vergleich der mittleren Schwingungsdauer: PAROGA / BERTA / Experiment.

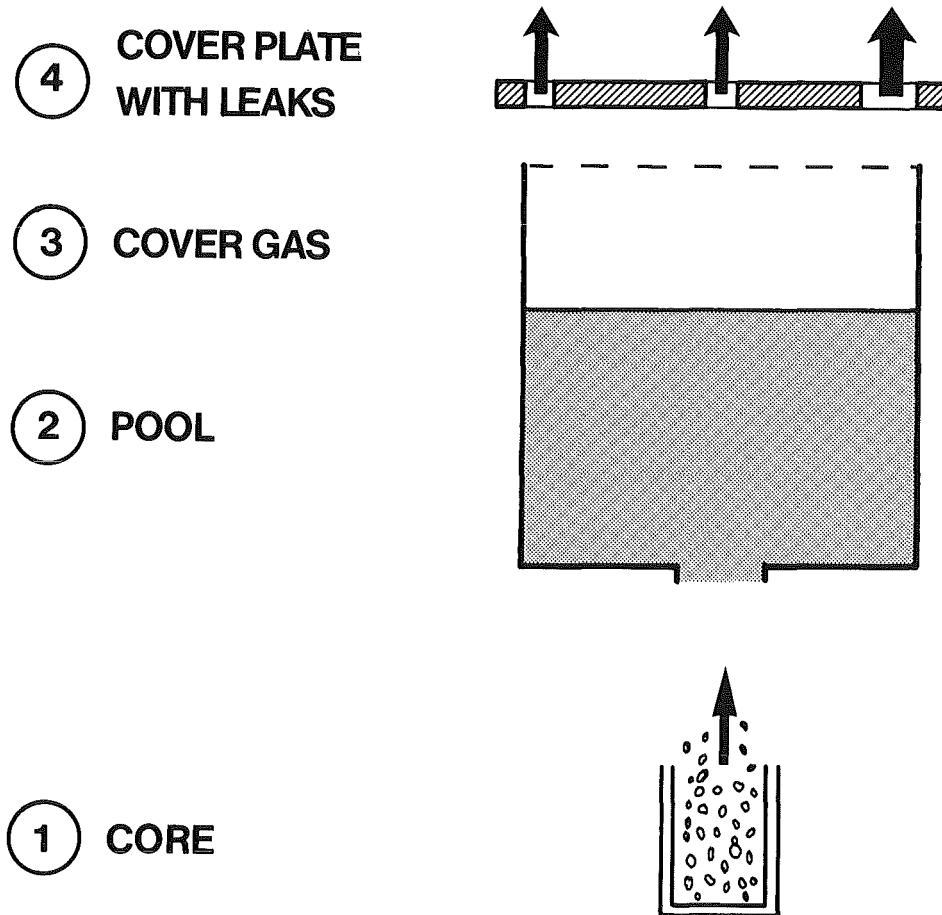


Abb. 1.1 Das Prinzip der FAUST - Versuche:

1. Quellbehälter mit Berstscheibe ("Core")
2. Kühlmittel - Pool
3. Covergas
4. Deckel mit Leckagen

FAUST - 1 - Versuche: Wasser - Pool
FAUST - 2 - Versuche: Natrium - Pool

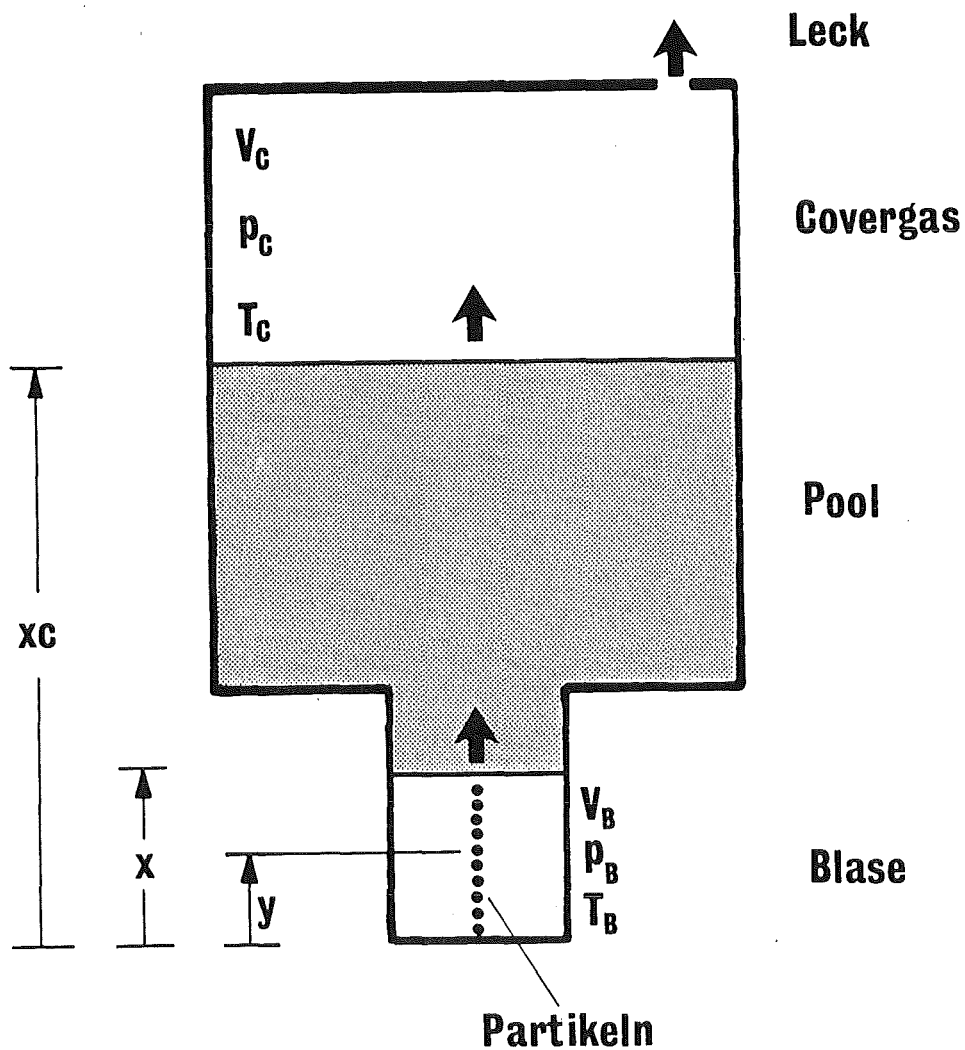


Abb. 3.1 Prinzip des Wasserversuchsstandes FAUST - 1B, des Natriumversuchsstandes FAUST - 2B und der PAROGA-Rechnungen mit reaktorähnlicher Geometrie.

- V, p, T = Volumen, Druck, Temperatur
- x = Koordinate der Trennfläche Blase / Pool
- x_C = Koordinate der Trennfläche Pool / Covergas
- y = Koordinate der Partikelbewegung

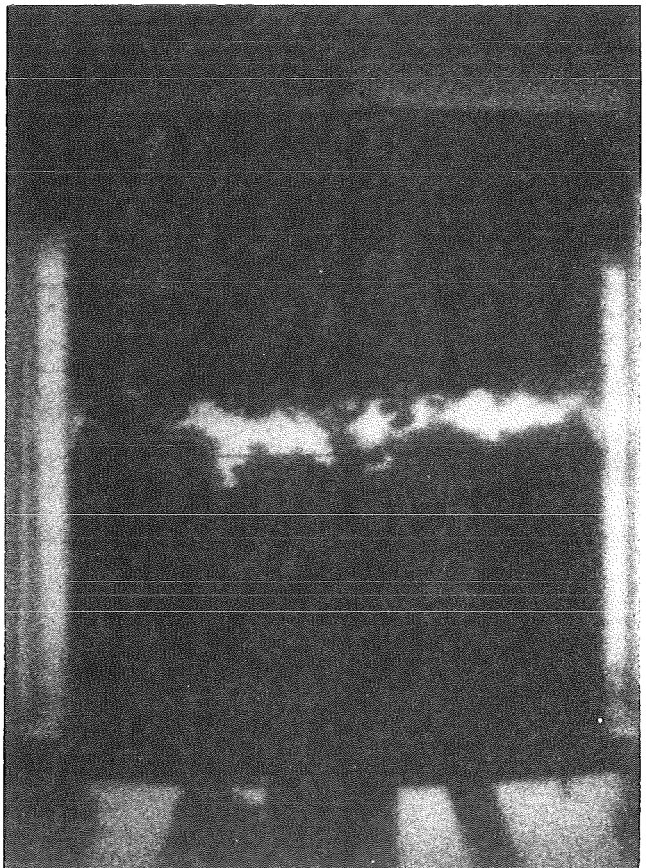
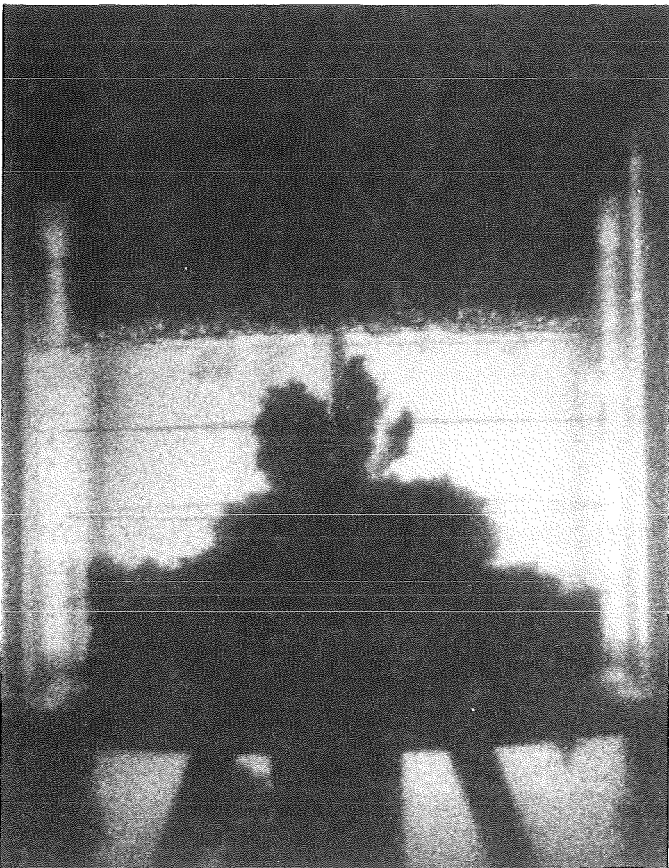
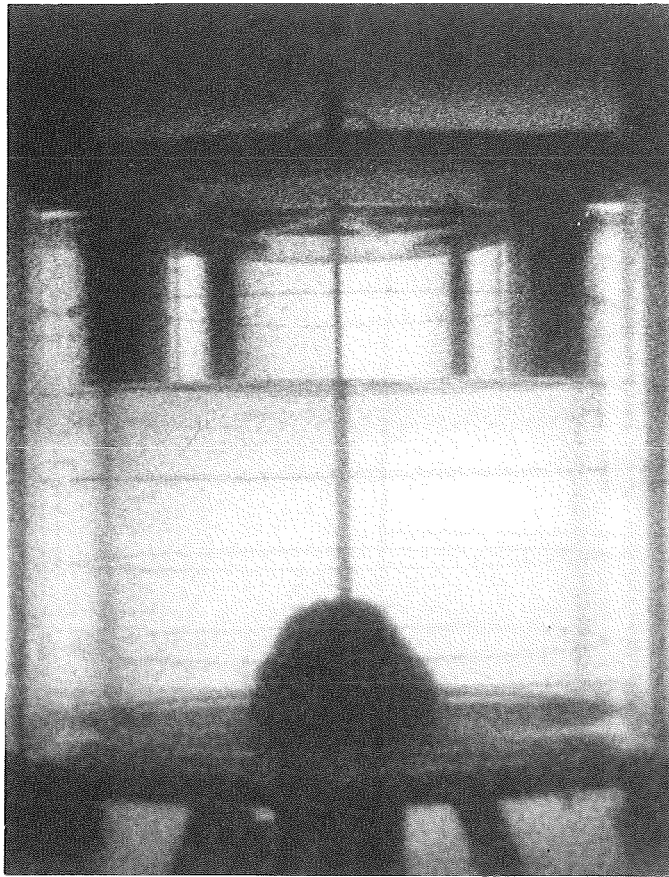


Abb. 3.2 Erläuterungen siehe nächste Seite

Abb. 3.2

Vier ausgewählte Bilder aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm (200 Bilder / sec) zum Wasserversuch FAUST - 1B Nr. 103 (Berstscheibentladung von 30 g Nickel-Partikeln, Größe 1 μm , mit 2 MPa in einen 40 cm hohen Wasserpool).

Obere Reihe, Bild 1:

5 msec nach Öffnung der Berstscheibe. Hemisphärische Entladung mit Entrainment in die "Blase".

Obere Reihe, Bild 2:

50 msec. Die Blase hat den Punkt der maximalen Ausdehnung überschritten und wird wieder komprimiert. Die typische Übergangsform ist ein Torus mit Sockel, der am Boden zerfließt. Die Partikeln werden als "Jet" im Wasser abgeschieden. Im Covergas kann man den Beginn der Entrainmentprozesse beobachten.

Untere Reihe, Bild 3:

80 msec. Die Kolbenform ist fast erreicht. Die Wassersäule schwingt zwischen zwei Gaspolstern. Das Covergas hat sich mit dem Flüssigkeitseintrag vollständig vermischt.

Untere Reihe, Bild 4:

350 msec. Die aufsteigende Blasenfront hat das Covergas fast erreicht.

Genauere Beschreibung siehe [1.10].

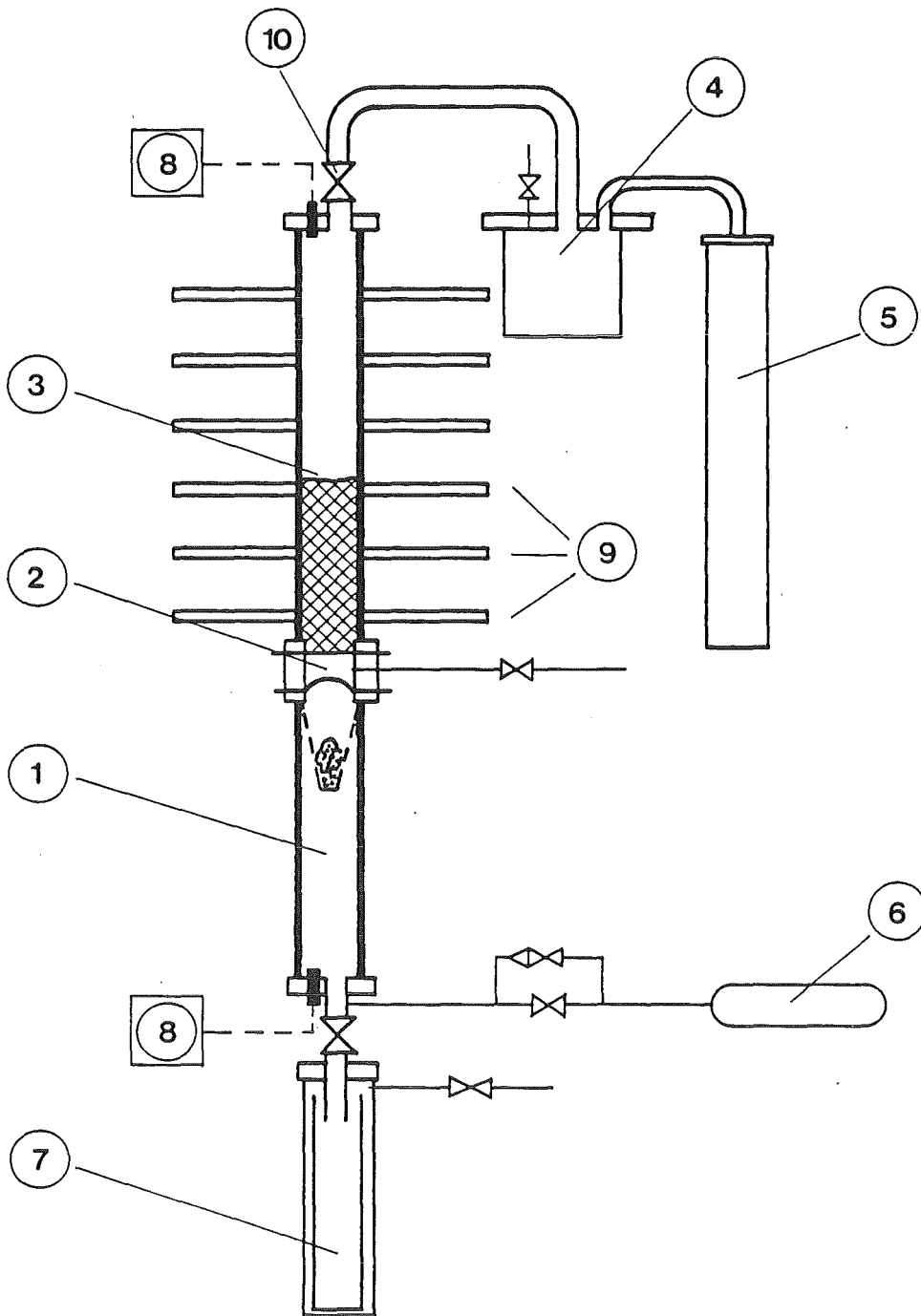


Abb. 5.1 Versuchsaufbau FAUST - 2A im Endzustand mit Doppelberstscheibe und erweitertem Entspannungsvolumen.

- | | | | |
|---|---------------------------------|----|-------------------------|
| 1 | Quellbehälter | 6 | Argon-Vorrat |
| 2 | Doppelberstscheibe | 7 | Natrium-Ablabbehälter |
| 3 | Poolzylinder mit Natrium | 8 | Druckaufnehmer |
| 4 | Entspannungsgefäß 6,6 l | 9 | Ultraschall-Koppelstäbe |
| 5 | Zusatz-Entspannungsgefäß 16,9 l | 10 | Pneumat. Klappenventil |

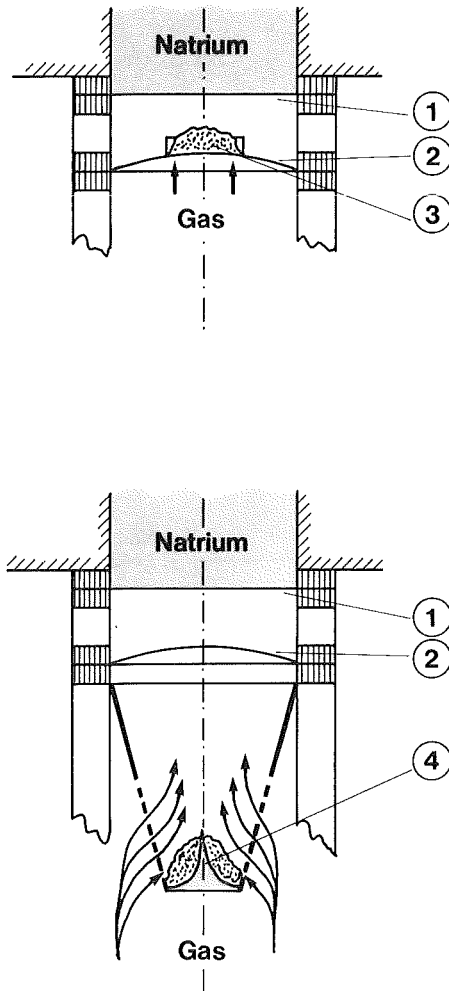


Abb. 5.2 Die beiden Methoden zum Einbringen von Partikeln in den Gasstrom während der Entladung.

- 1 Edelfstahlfolie 20 μm
- 2 Inconel - Berstscheibe
- 3 Partikeln mit Stützring auf Berstscheibe
- 4 Partikeln im 'Korb' innerhalb des Quellbehälters

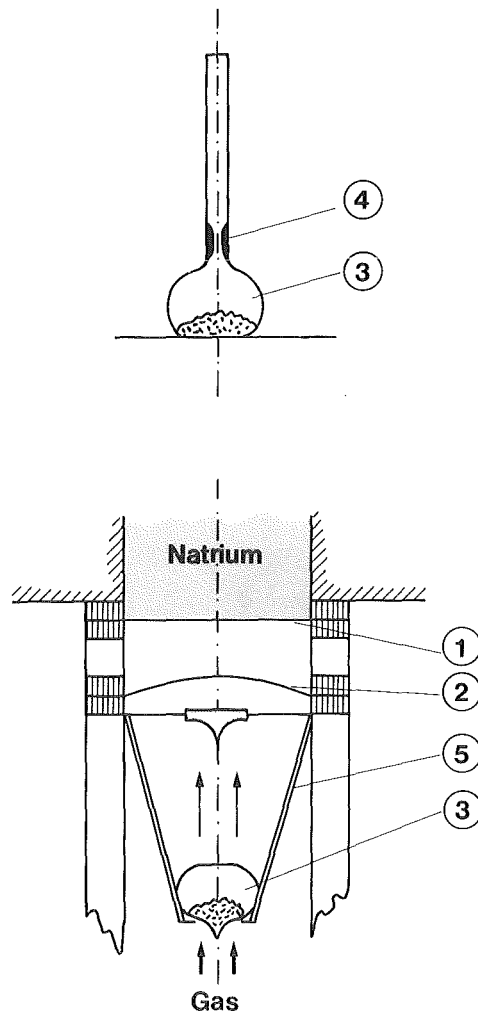


Abb. 5.3 Die Methode zum Einbringen von Caesium und Jod in den Gasstrom während der Entladung.

- 1 Edelstahlfolie
- 2 Inconel - Berstscheibe
- 3 Glasgefäß mit Cs bzw. I_2
- 4 Abschmelzstelle
- 5 Umgebauter 'Korb' innerhalb des Quellbehälters

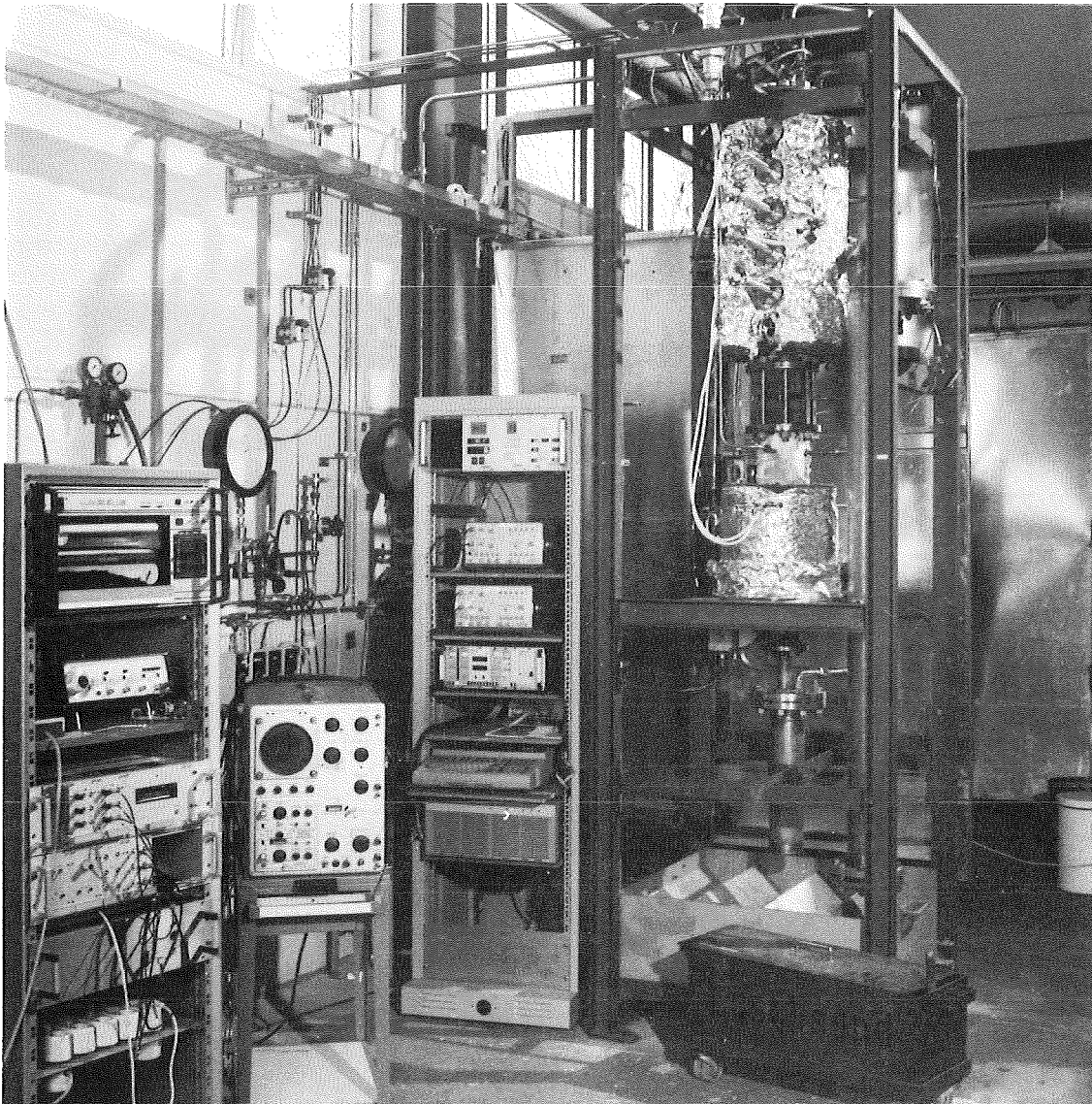


Abb. 5.4 Versuchsstand FAUST - 2A

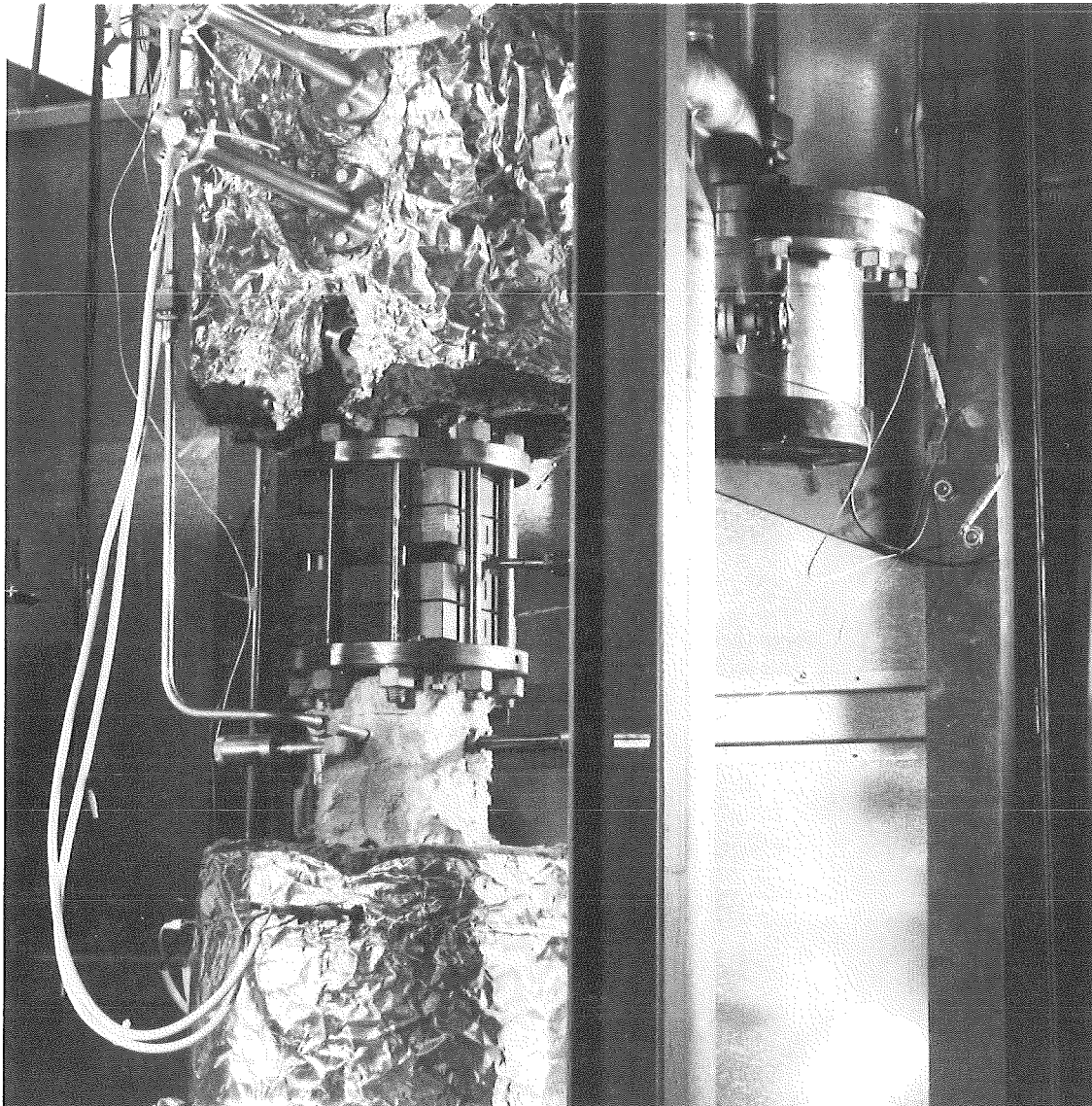


Abb. 5.5 Detailaufnahme vom Versuchsstand FAUST - 2A: Quellbehälter (unten), Haltevorrichtung für Doppelberstscheibe (Mitte), Poolbehälter (oben).



Abb. 5.6 Inconel - Berstscheiben mit 10 cm Öffnungsdurchmesser in geschlossenem, teilweise geöffnetem und völlig geöffnetem Zustand.



Abb. 5.7 Einsatzkorb für den Quellbehälter zur Aufnahme von partikelförmigem Material.

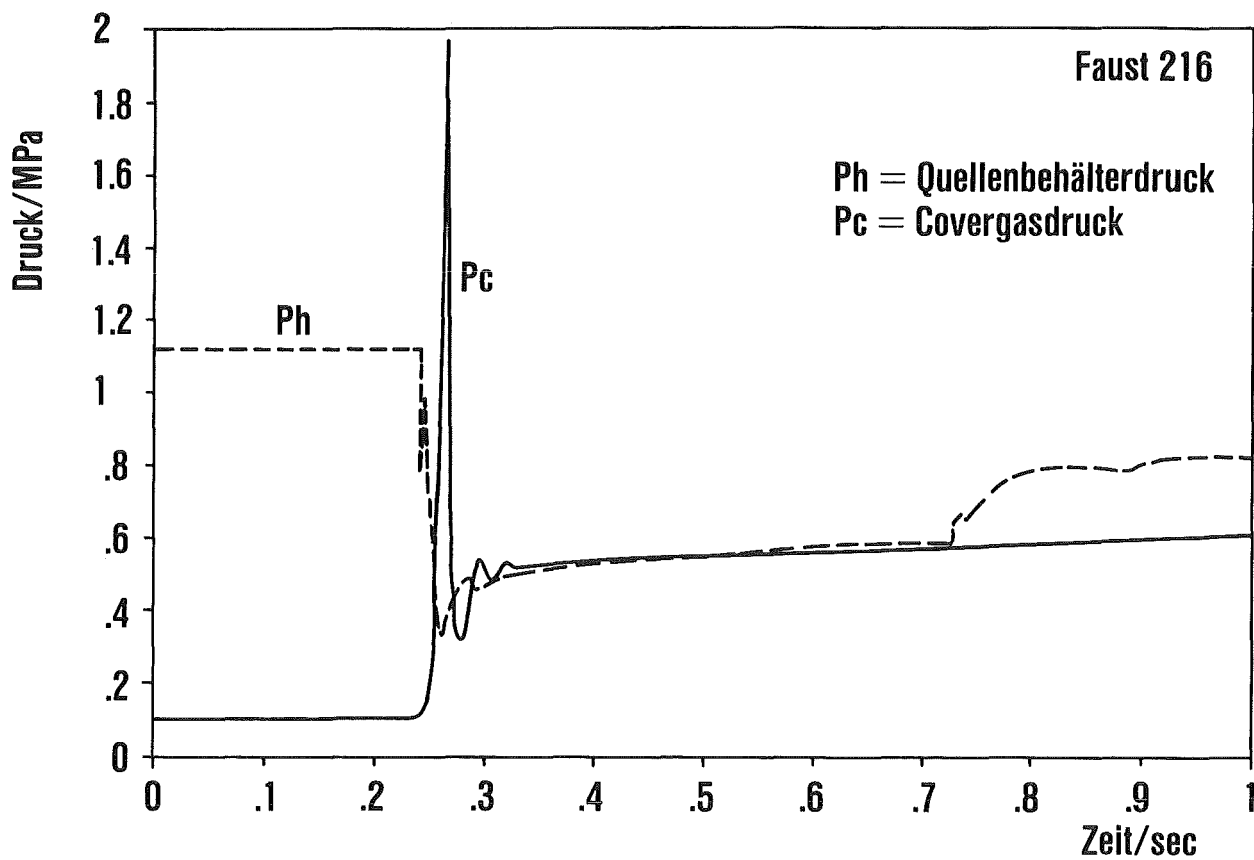


Abb. 8.1 Drucksignale, gemessen im Quellbehälter und im Covergas, beim Versuch Nr. 216.

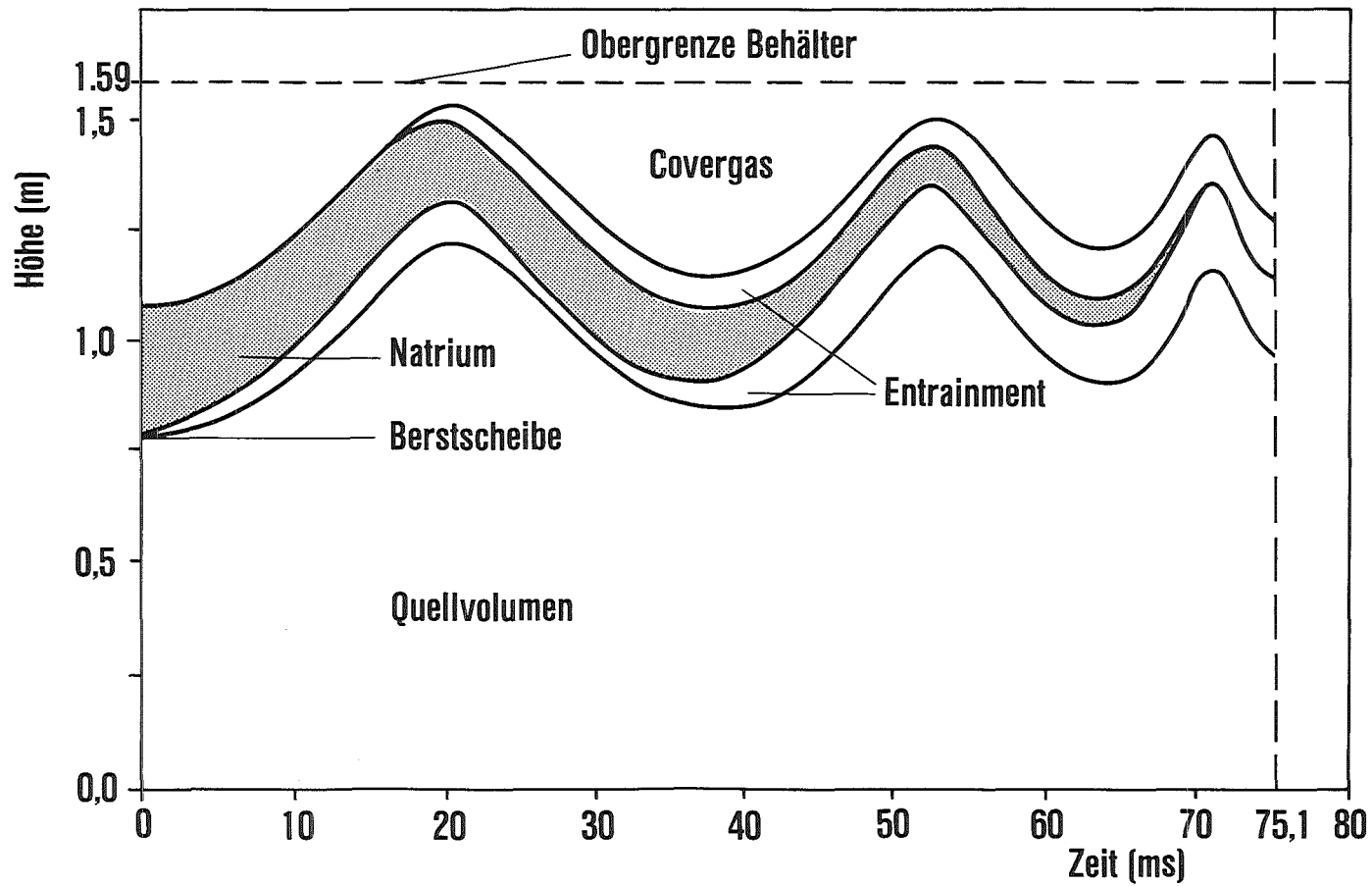
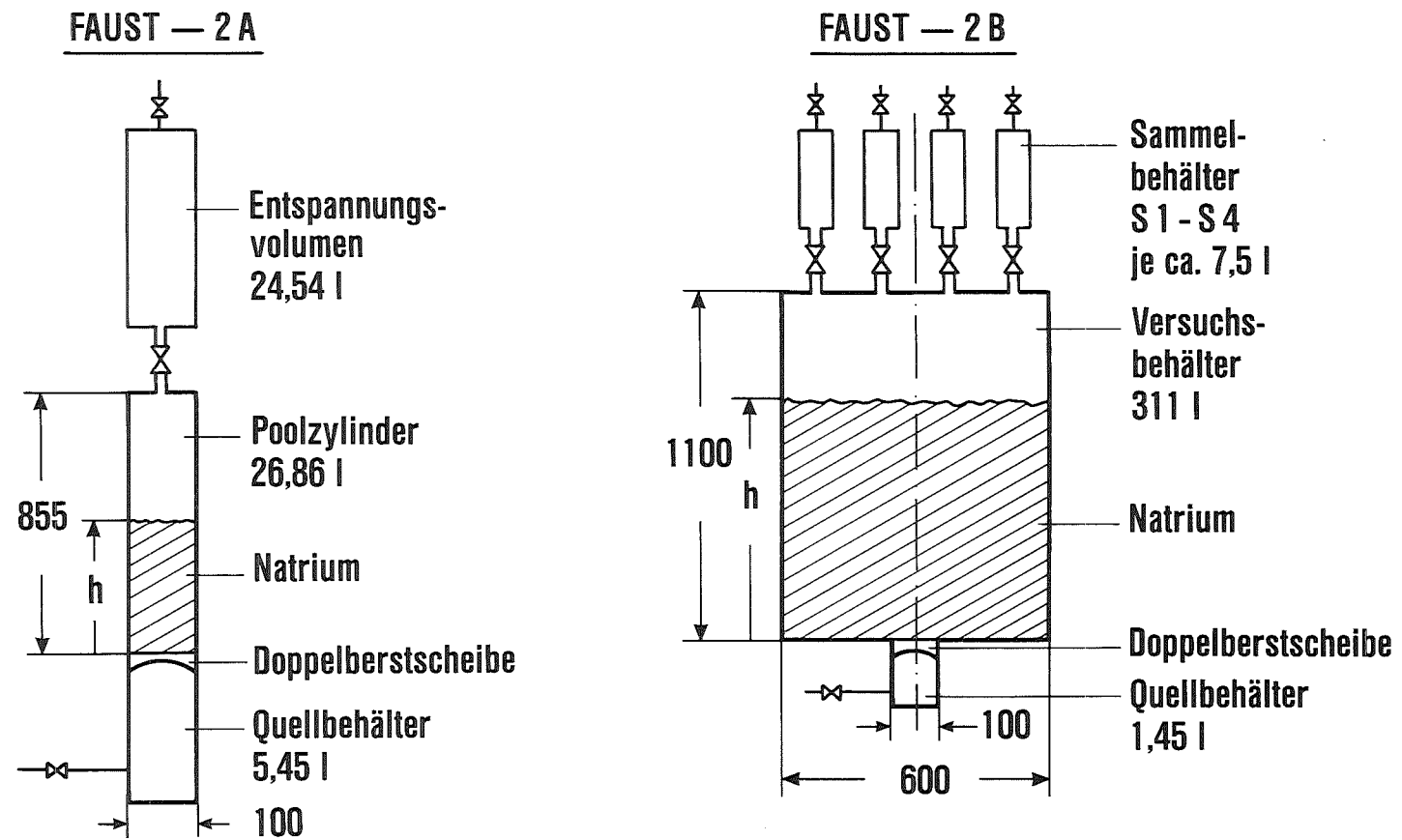


Abb. 9.1 Nachrechnung eines FAUST - 2A - Versuches mit dem Rechenprogramm MOFA: Aufgetragen ist die Bewegung der Natriumsäule zwischen Quellvolumen und Covergas bei 1,1 MPa Entladungsdruck, 30 cm Poolhöhe und 500 °C unter Berücksichtigung des Entrainments.



KIK

Abb. 10.1 Gegenüberstellung FAUST - 2A und FAUST - 2B. Abmessungen in mm.

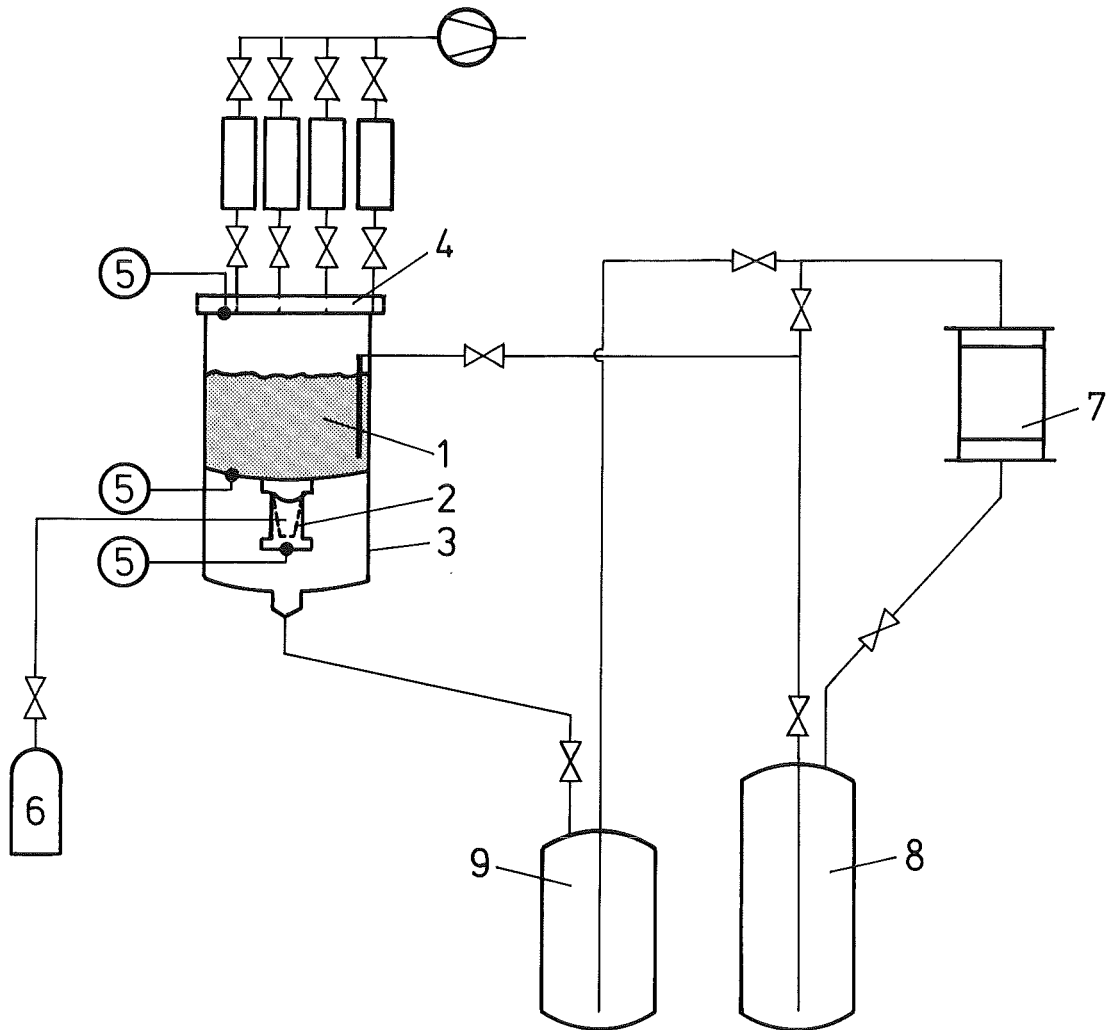


Abb. 10.2 Versuchsstand FAUST - 2 B

- 1 Versuchsbehälter (\varnothing 0,6 m; h = 1,1 m) mit Natrium
- 2 Quellbehälter 1450 cm³ mit Inconel-Berstscheibe, max. 4 MPa
- 3 Sicherheitsglocke
- 4 Deckel mit pneumat. Ventilen und Probenahmebehältern
- 5 Druckaufnehmer
- 6 Argon-Vorrat
- 7 Natrium-Einschmelzanlage
- 8 Lagerbehälter 500 Liter
- 9 Sicherheits-Auffangbehälter

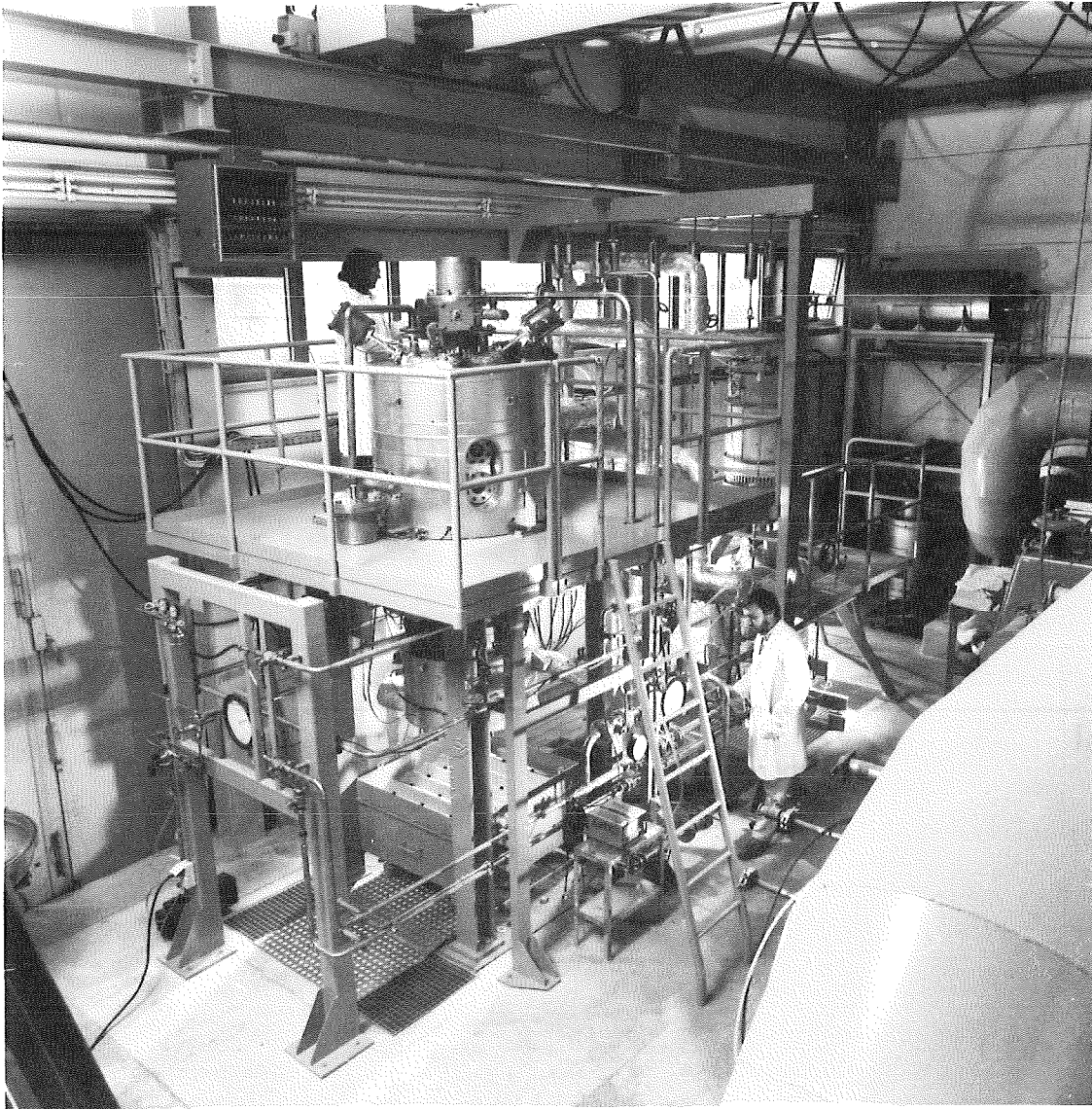


Abb. 10.3 Versuchsstand FAUST - 2B

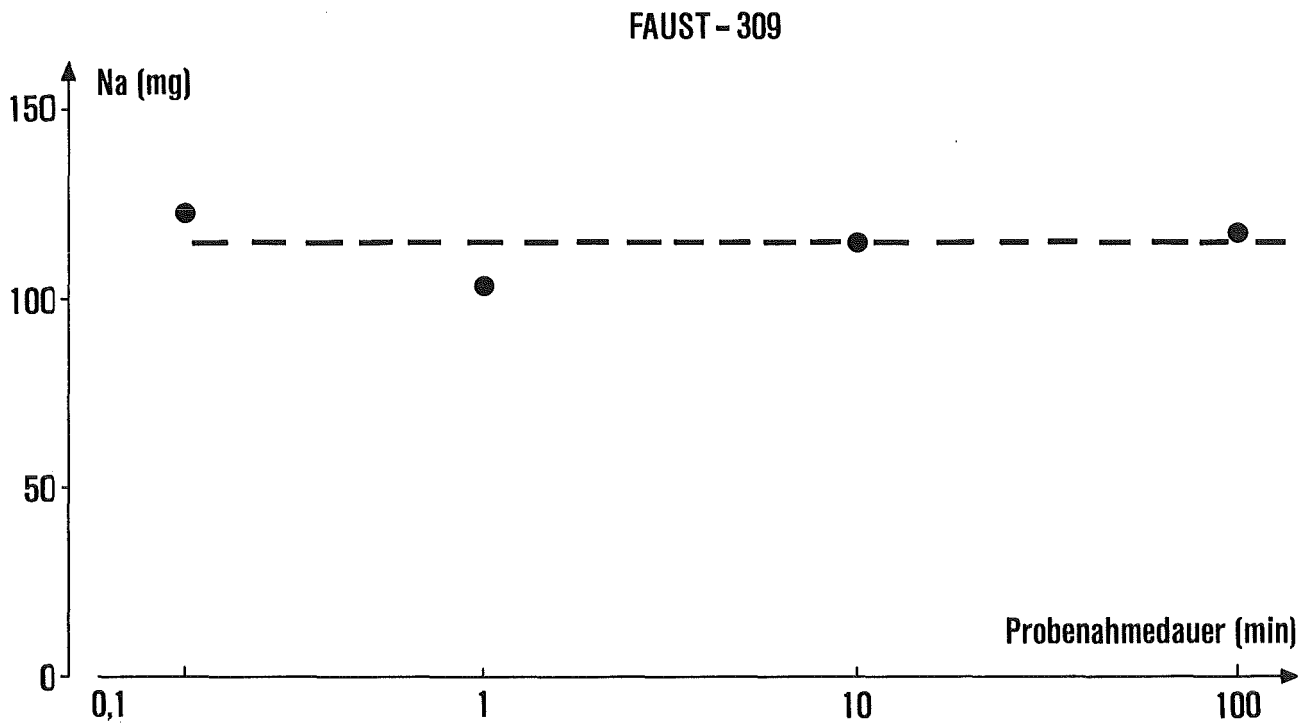


Abb. 13.1

Aufgesammelte Natriummengen in den Sammelbehältern S1 bis S4 in Abhängigkeit von der Probenahmedauer.

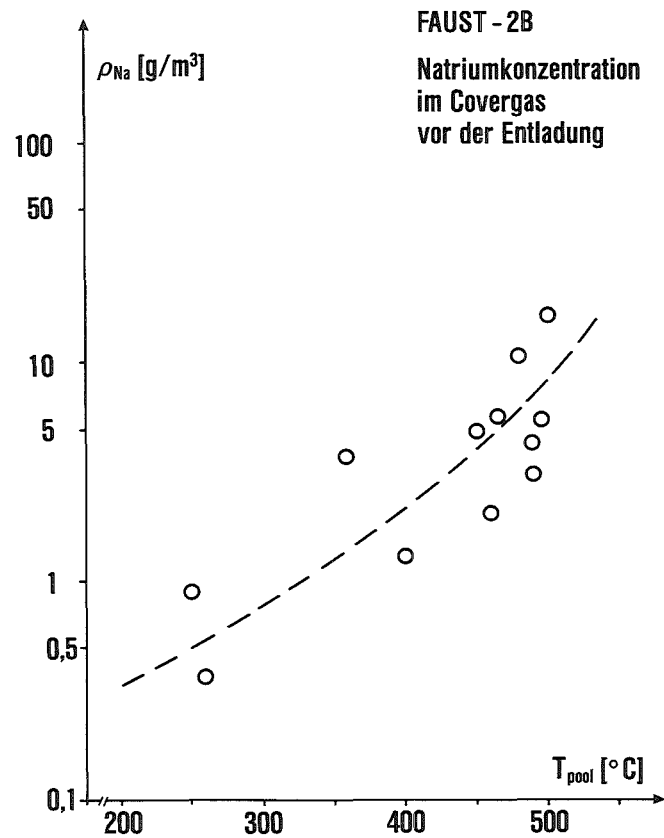


Abb. 14.1 Natriumkonzentration im Covergas vor der Entladung, ermittelt aus den jeweiligen Probenahmen S1, als Funktion der Pooltemperatur. Kurve siehe 14.3

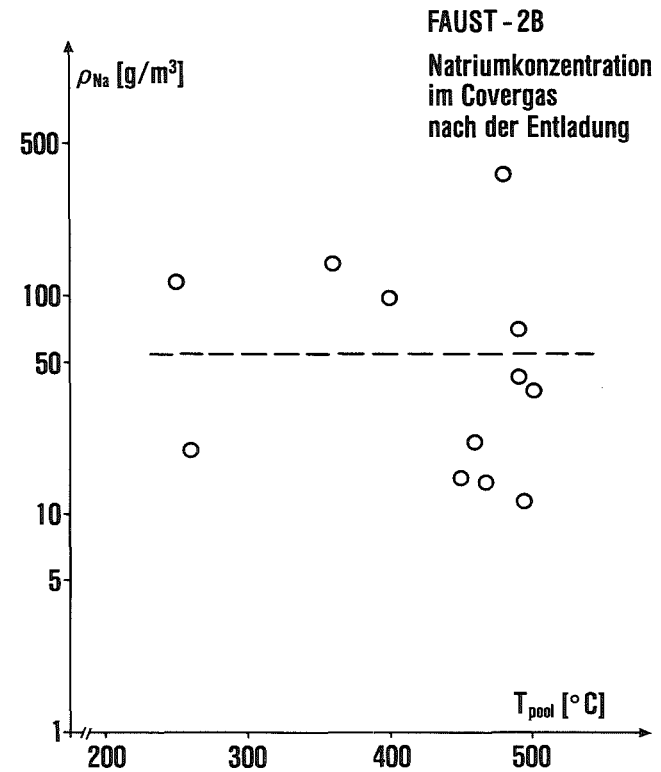


Abb. 14.2 Natriumkonzentration im Covergas nach der Entladung, ermittelt aus den jeweiligen Probenahmen S2, als Funktion der Pooltemperatur. Kurve siehe 14.3

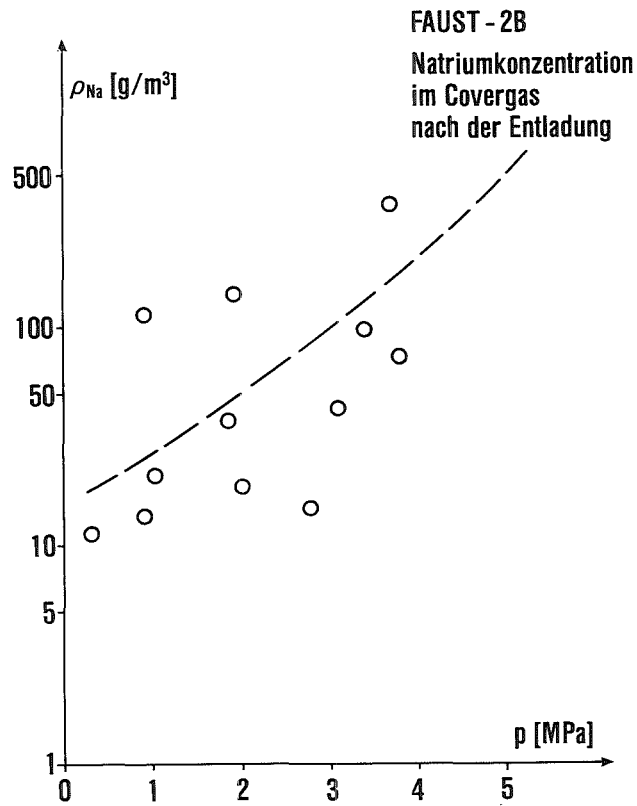


Abb. 14.3 Natriumkonzentration im Covergas nach der Entladung, ermittelt aus den jeweiligen Probenahmen S2, als Funktion des Entladungsdruckes. Die eingezeichnete Kurve ist keine rechnerische Anpassung, sondern nur eine "Handskizze" zur Andeutung des Trends.

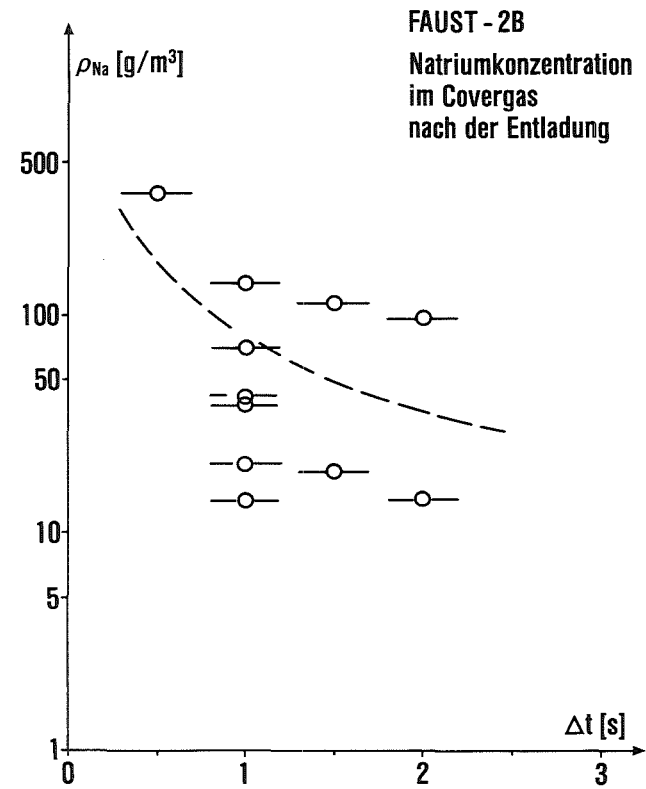


Abb. 14.4 Natriumkonzentration im Covergas nach der Entladung, ermittelt aus den jeweiligen Probenahmen S2, als Funktion des Zeitintervalls zwischen dem Ansprechen der Berstscheibe und dem Öffnen des Ventils zum Sammelbehälter S2. Kurve siehe 14.3

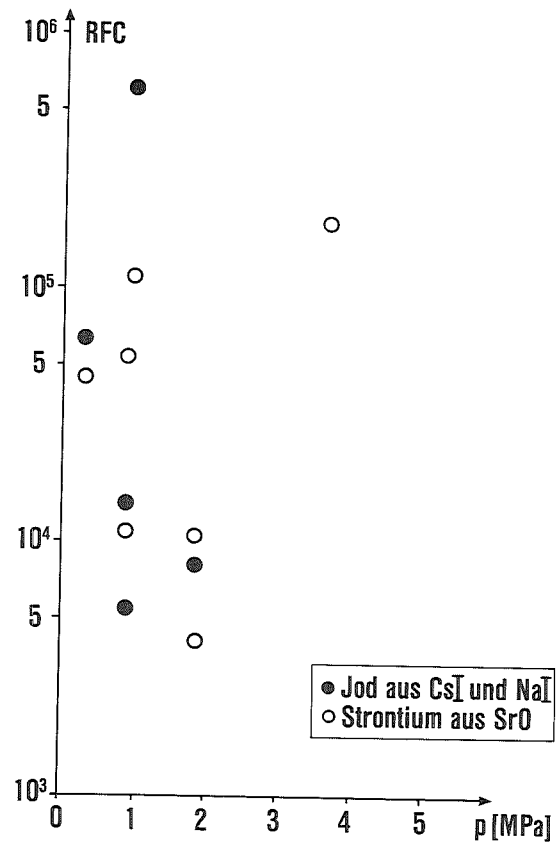


Abb. 14.5 Instantane Rückhaltefaktoren RFC für Jod und Strontium aus den partikelförmigen Ausgangssubstanzen CsI, NaI und SrO (jeweils aus Probenahme S2).

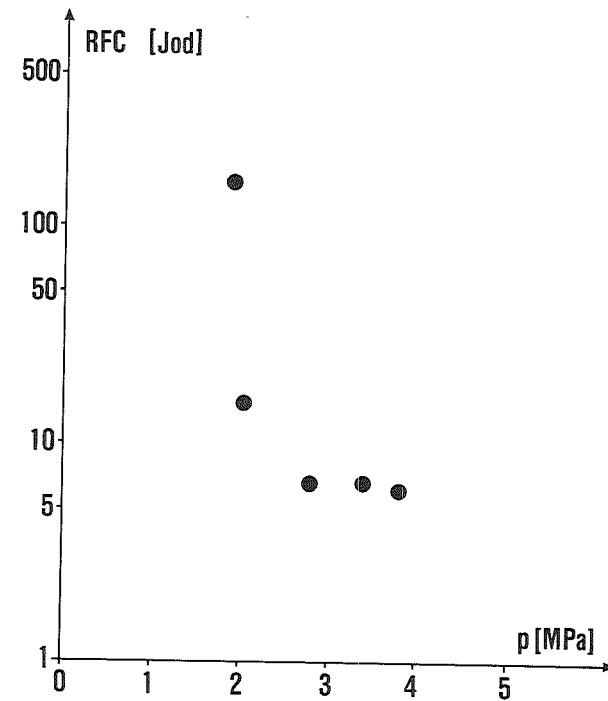


Abb. 14.6 Instantane Rückhaltefaktoren RFC für Jod aus der dampfförmigen Ausgangssubstanz I₂ (jeweils aus Probenahme S2).

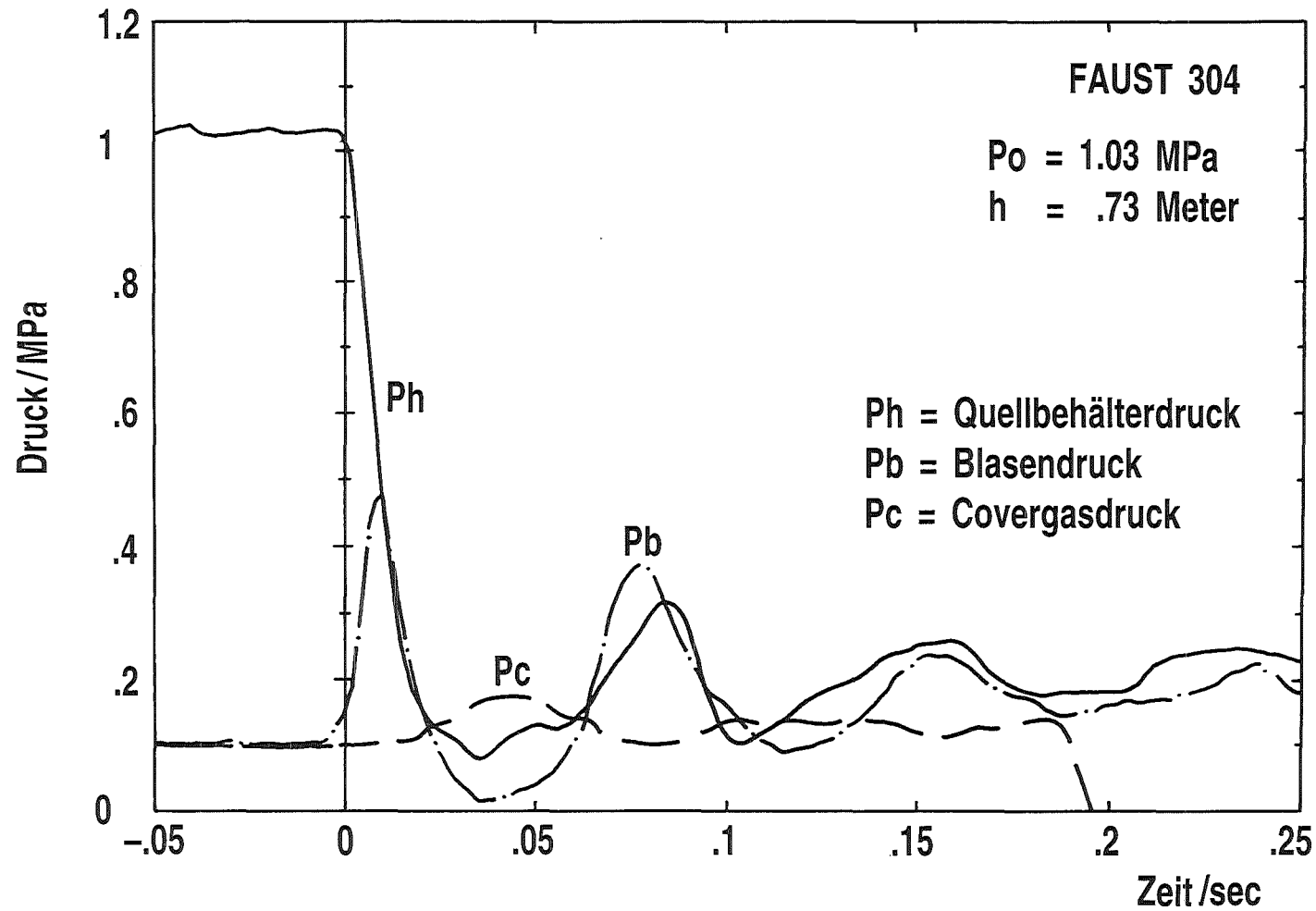


Abb. 14.7 Gemessene Drucksignale beim FAUST-2B-Versuch Nr. 304: Ph = Druckmessung am Boden des Quellbehälters, Pb = Druckmessung am Boden des Versuchsbehälters, Pc = Druckmessung am Deckel des Versuchsbehälters (siehe auch Abb. 10.2). Das Meßsignal für Pc bricht durch auftreffendes Natrium vorzeitig ab.

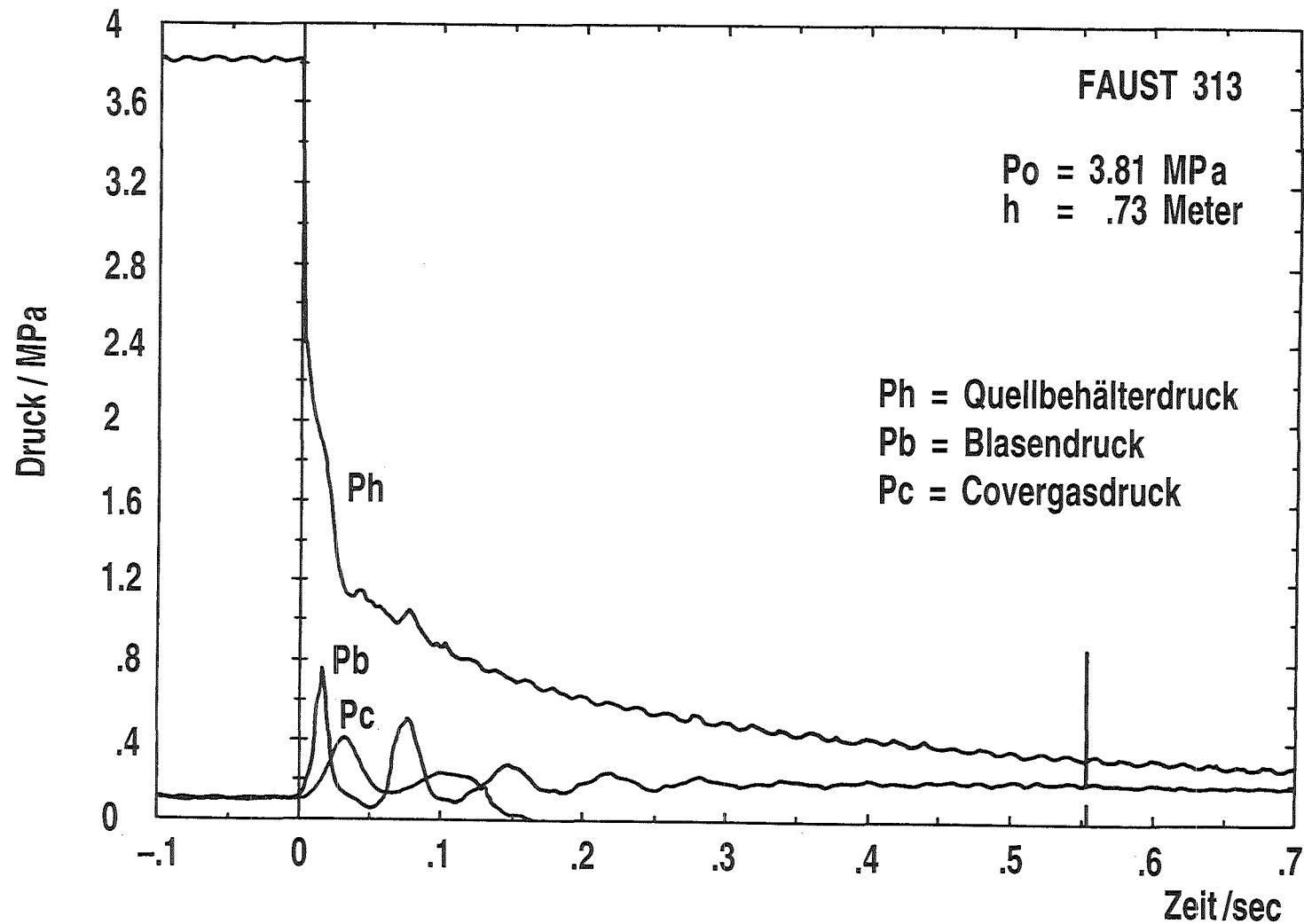


Abb. 14.8

Gemessene Drucksignale beim FAUST-2B-Versuch Nr. 313: Ph = Druckmessung am Boden des Quellbehälters, Pb = Druckmessung am Boden des Versuchsbehälters, Pc = Druckmessung am Deckel des Versuchsbehälters (siehe auch Abb. 10.2). Die Störung im Meßsignal bei 0.55 sec kommt vom Öffnen des Ventils zum Sammelbehälter S2.

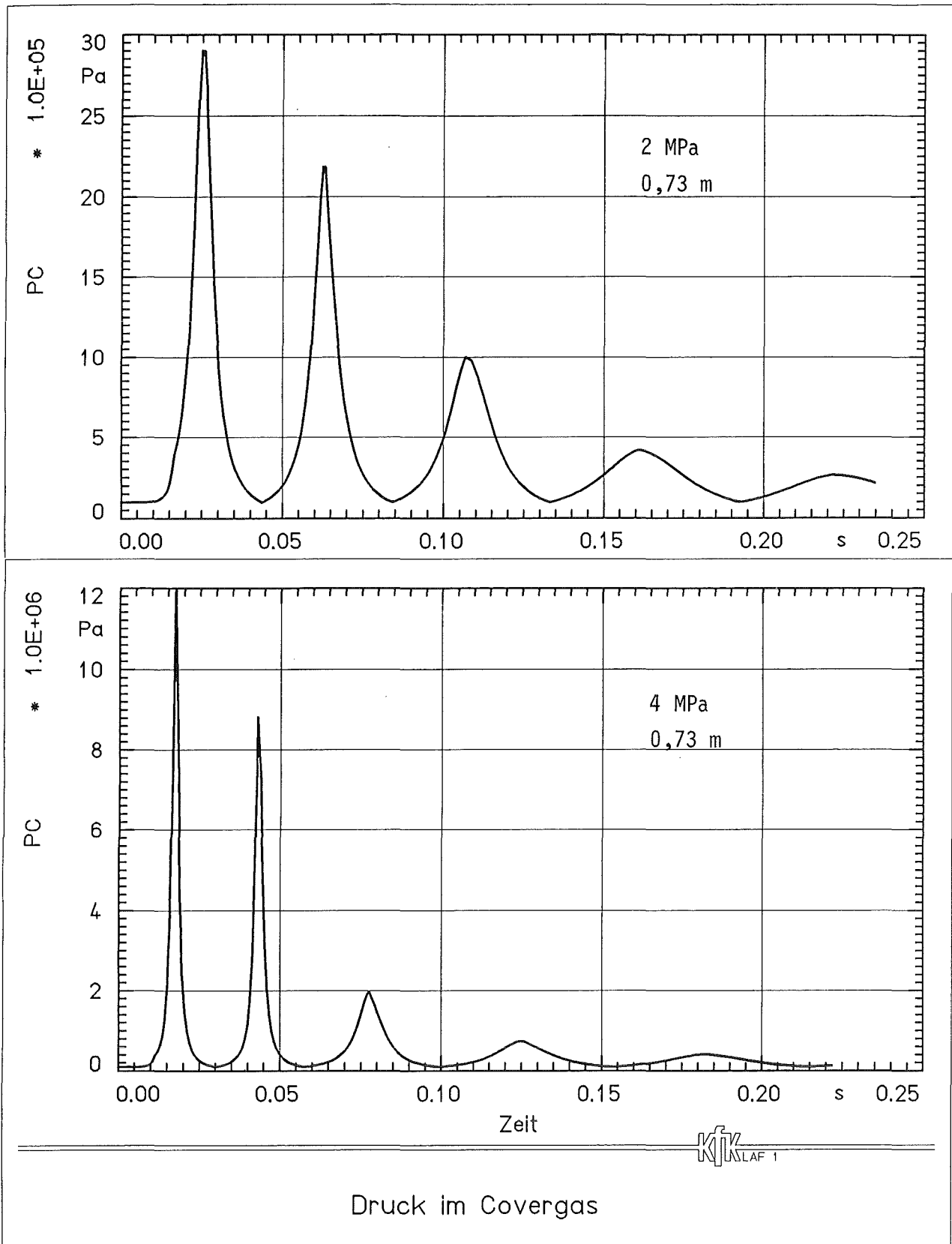


Abb. 15.1 PAROGA - Rechnung
Druckverlauf im Covergas bei 2 MPa- und
4 MPa-Entladung und 0,73 m Poolhöhe.

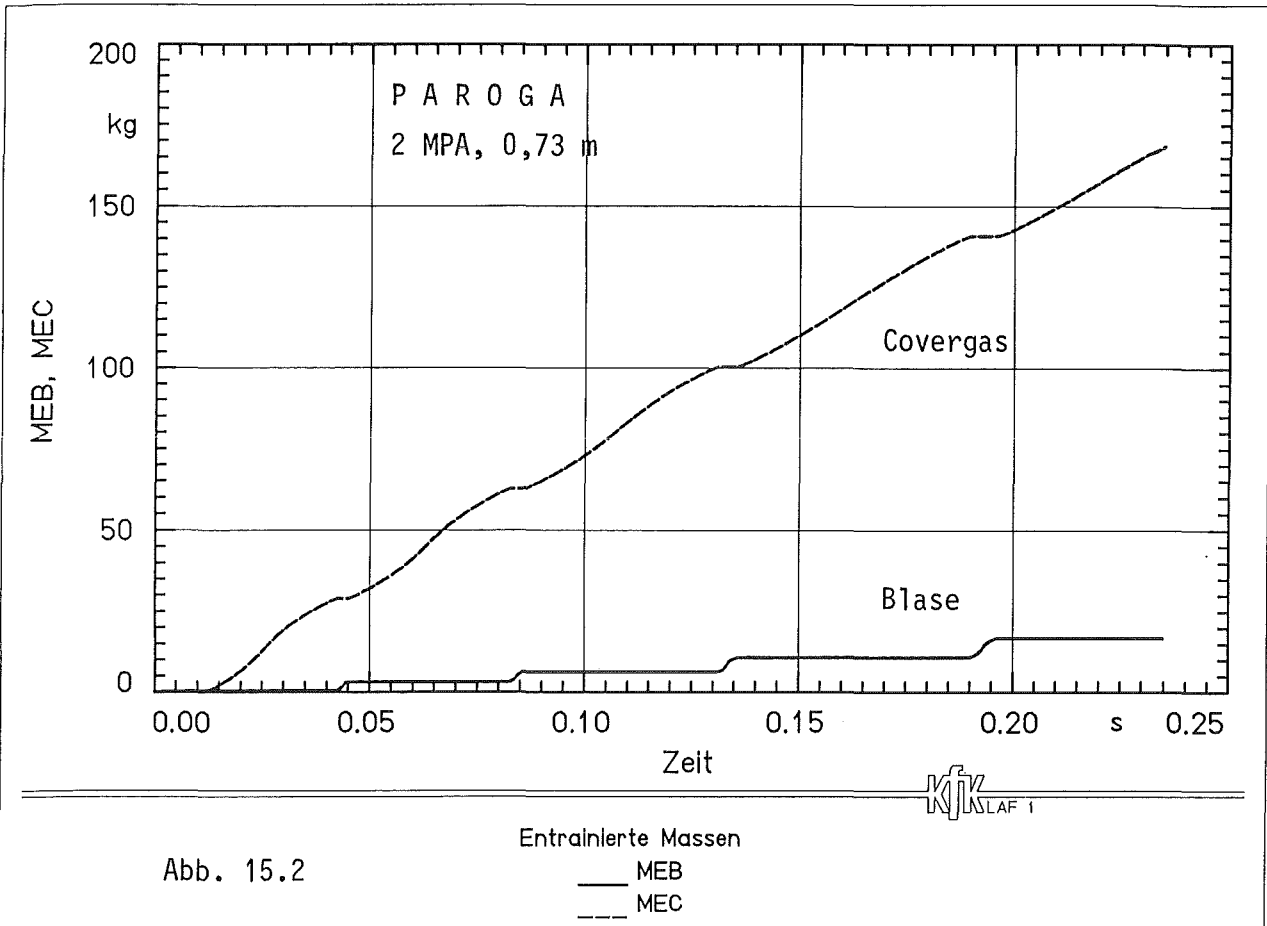


Abb. 15.2

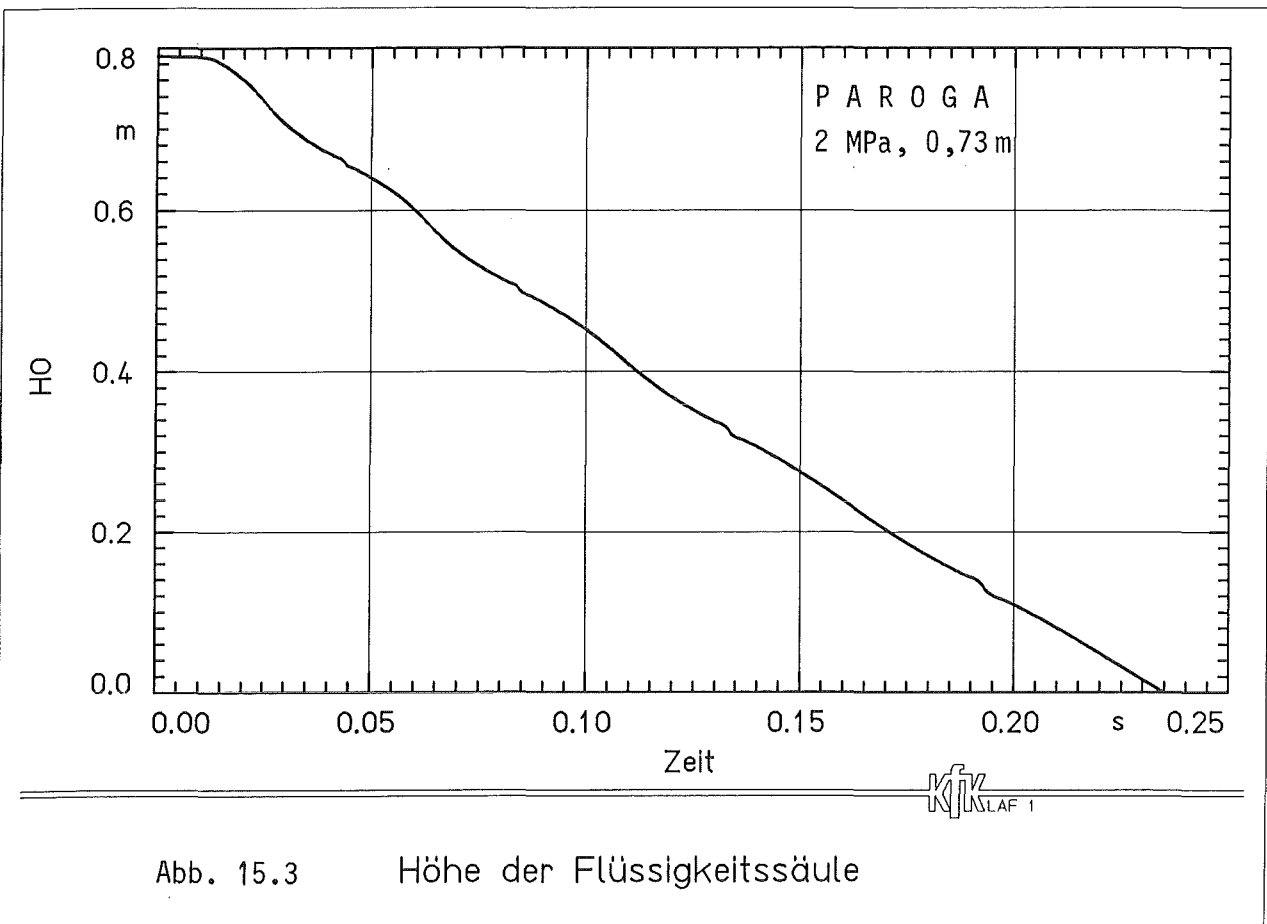


Abb. 15.3 Höhe der Flüssigkeitssäule

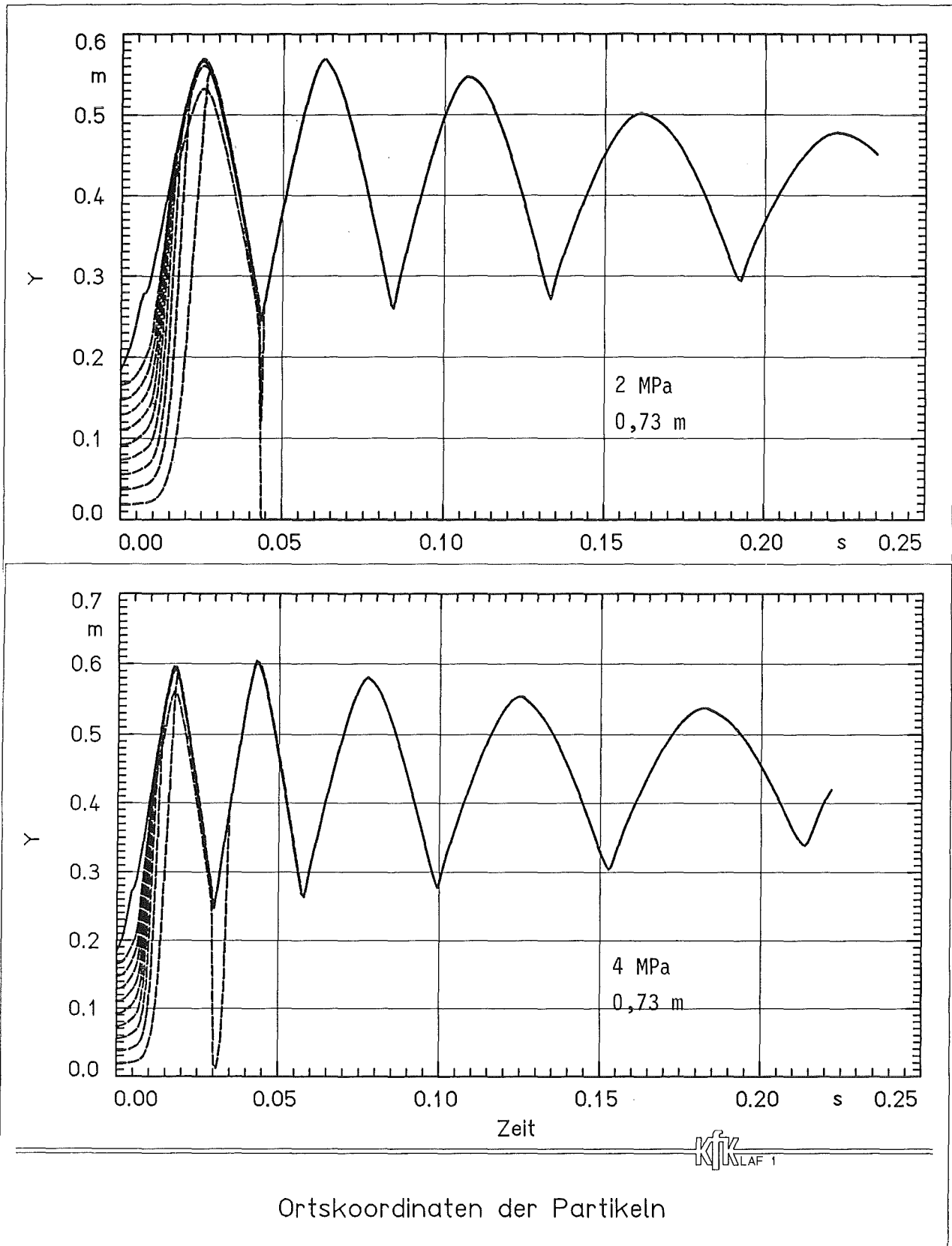


Abb. 15.4 PAROGA - Rechnung: Bewegung der Trennfläche Blase / Natrium sowie von 10 Partikeln ($20 \mu\text{m Fe}$), die vor der Entladung linear und äquidistant im Quellbehälter verteilt sind.

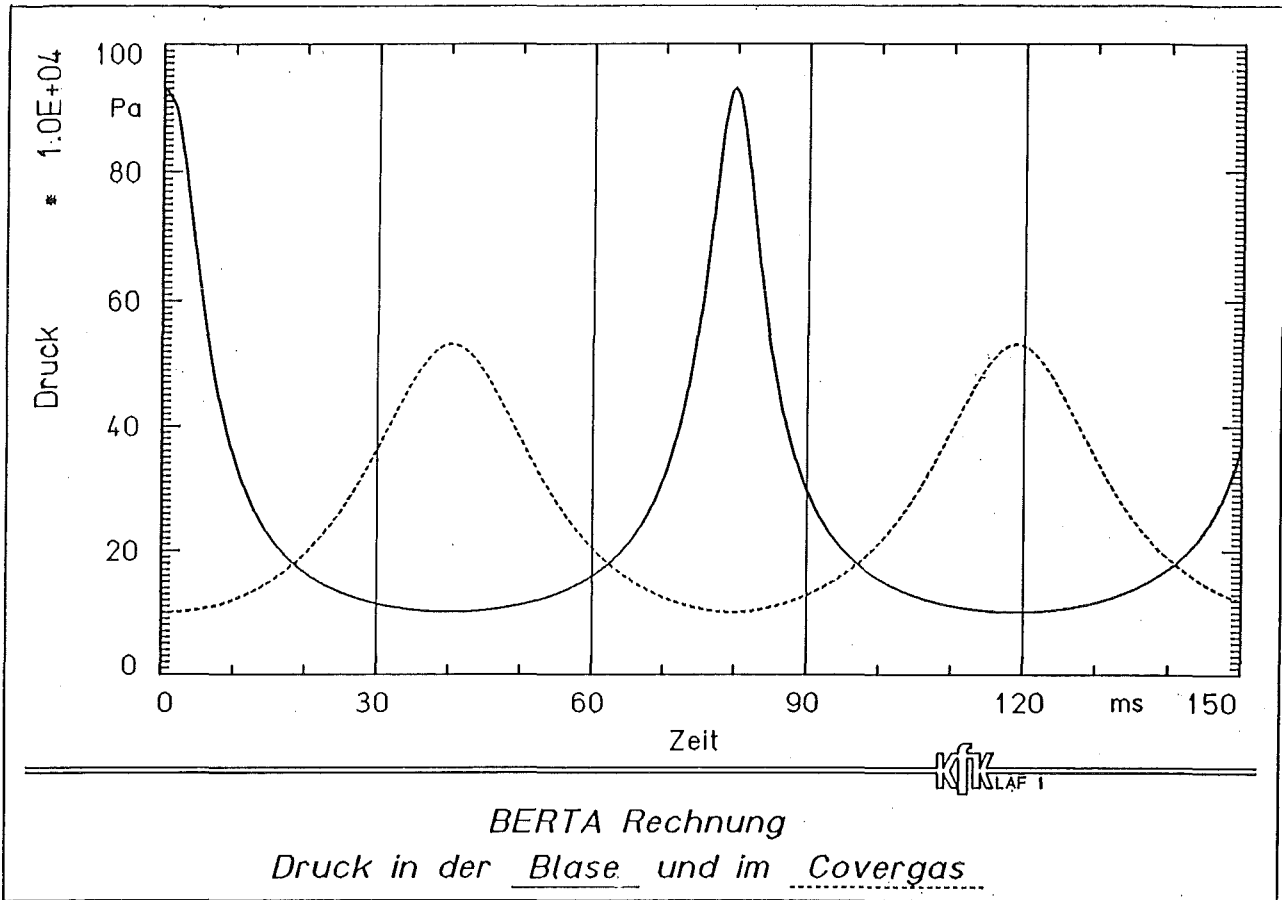


Abb. 15.5 BERTA - Rechnung für die Bedingungen des
FAUST - 2B - Versuches Nr. 304 (1 MPa;
0,73 m).
Erläuterungen siehe Kap. 15.2

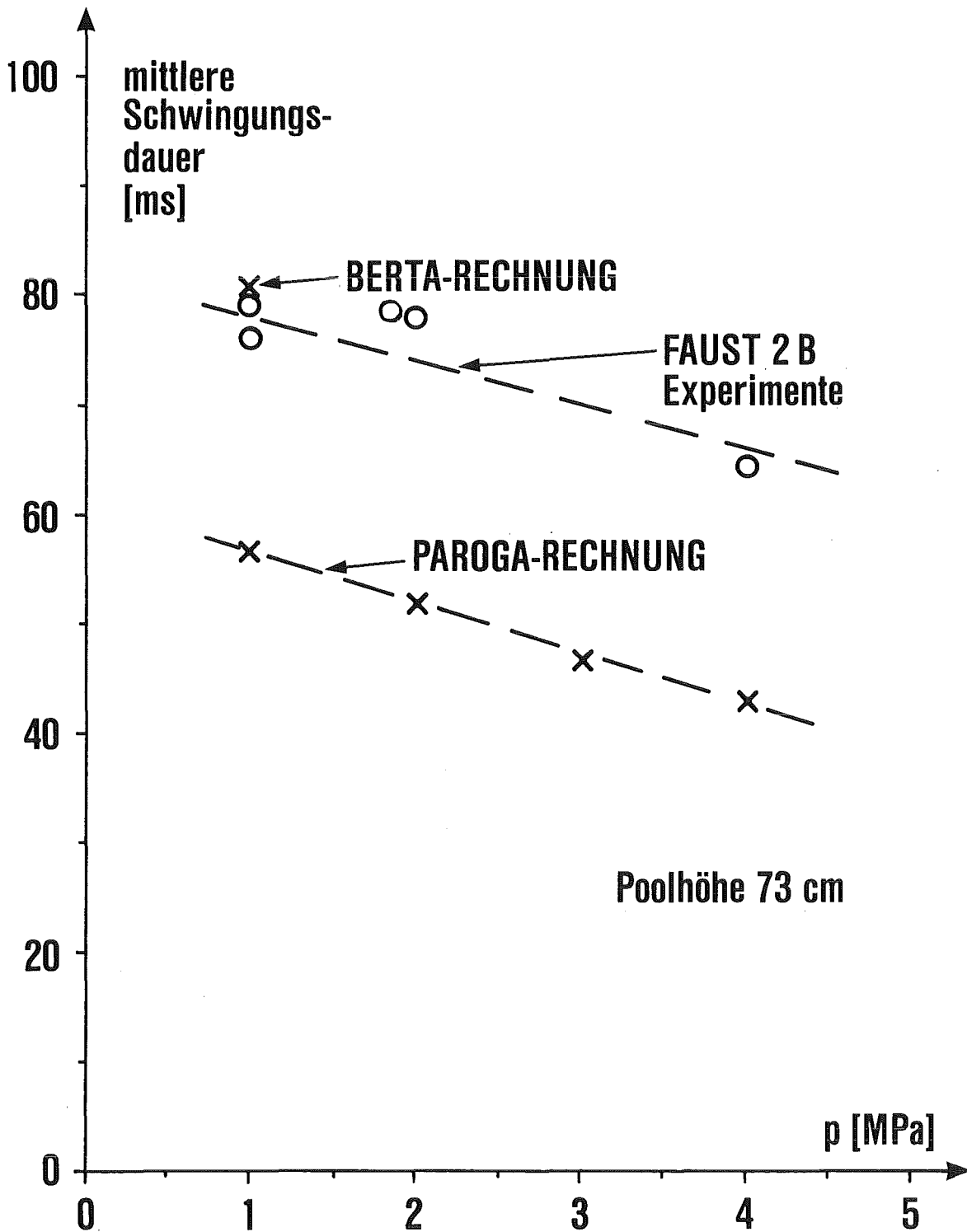


Abb. 15.6 Vergleich der mit BERTA und PAROGA berechneten mittleren Schwingungsdauer mit den experimentellen Werten aus den FAUST - 2B - Versuchen 302, 303, 304, 305 und 313 (73 cm Poolhöhe).

ANHANG I:

Zusammenstellung wichtiger Gleichungen zur Behandlung aufsteigender Blasen, expandierender Blasen, Entrainment und Partikelverhalten als Grundlage der PAROGA - Rechnungen.

A. PARTIKELN IN EINER AUFSTEIGENDEN BLASE

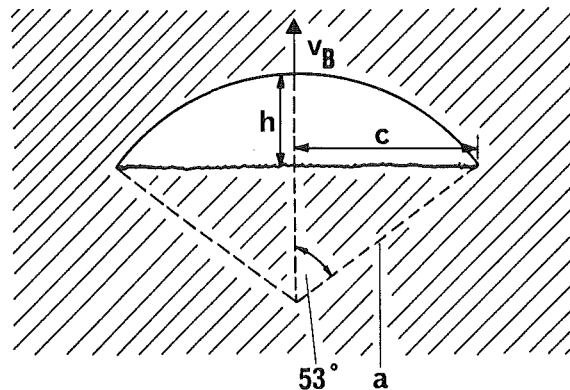
Die analytische Behandlung des Blasenaufstiegs geht auf Davies und Taylor [2.6] zurück. Eine in einem großen Pool (Einfluß der Tankwände nicht spürbar) aufsteigende Gasblase ändert ihre ursprüngliche Kugelform sehr schnell in eine Kugelkappe ("cap bubble"), charakterisiert durch die Parameter a und θ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

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

Bezogen auf das Blasenvolumen ergab sich näherungsweise

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

wobei v_B in m/sec und V in m^3 angegeben wird. Die Aufstiegsgeschwindigkeit 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 Pfropfens ("slug bubble") annimmt. Die Aufstiegsgeschwindigkeit hängt dann vom Zylinderradius ab und ist gegeben durch $v_B = 0,5 \sqrt{g \cdot b}$. Hieraus ergibt sich für die FAUST-2B-Geometrie ($b = 0,3$ m), daß $v_B = 0,86$ m/sec beträgt.

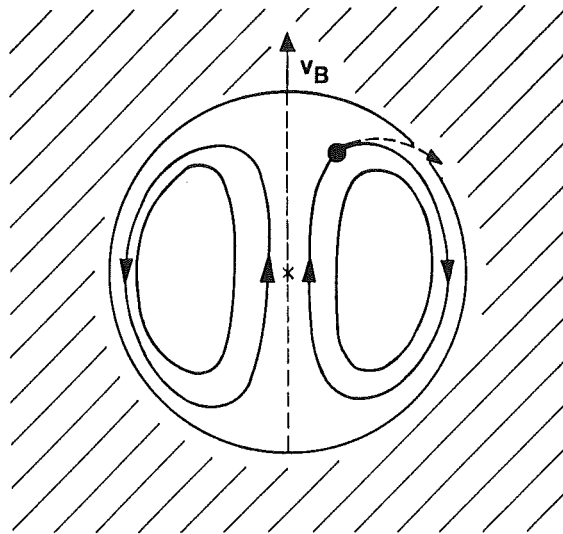
Einen Ansatz zur Berechnung der Partikelabscheidung in einer aufsteigenden Blase findet man bei Fuchs [2.7]. Zur Vereinfachung wird hier allerdings angenommen, daß die Blase kugelförmig ist. Verantwortliche Mechanismen für die Partikelabscheidung sind Trägheitsdeposition, Sedimentation und Diffusion.

Den absorbierten Anteil der Partikelkonzentration c als Funktion der Steighöhe 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, $u = v_B$ = Aufstiegsgeschwindigkeit, $\tau = m/B$, $B = 3 \pi \eta d$ (Beweglichkeit) und m, d = Partikelmasse bzw. -durchmesser. Für die Blasenauftstiegsgeschwindigkeit kann man die Näherungsformel $v_B = 2,4 \cdot V^{1/6}$ benutzen, mit V = Blasenvolumen. Für Partikeln $< 1 \mu\text{m}$ und Blasenradien $> 1 \text{cm}$ sind die Absorptionskoeffizienten relativ klein, und die Wahrscheinlichkeit für das Verbleiben der Partikeln in der Blase bis zur Freisetzung in das Covergas ist entsprechend groß. Wie in [2.14] gezeigt wird, gibt es sogar ein Absorptionsminimum, das bei Partikelgrößen im Bereich von $0,1 \mu\text{m}$ liegt.

B. PARTIKELN IN EINER EXPANDIERENDEN BLASE

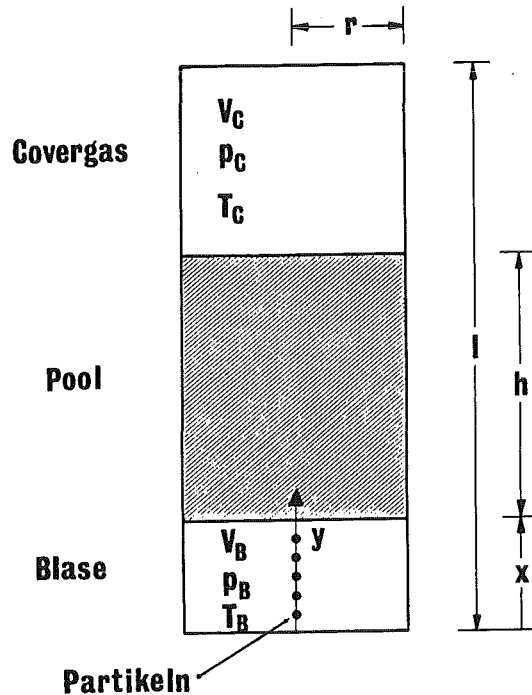
B.1 Ebene Expansion

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

Der inkompressible Flüssigkeitskolben wird, wie in der Abbildung skizziert, von dem bei $x = x_0$ expandierenden Gasvolumen nach oben beschleunigt durch die

Kraft $K = P_B \cdot F$, mit $P_B =$ Gasdruck und $F =$ Grundfläche. Das komprimierte Covergas (Druck P_C) und die Gravitation erzeugen eine Gegenkraft $K_2 = P_C \cdot F - g \cdot \rho \cdot h \cdot F$ ($\rho =$ Dichte der Flüssigkeit, $h =$ Höhe des Kolbens). Hieraus erhält man die Bewegungsgleichung für die Flüssigkeitskolben bzw. für die Trennfläche zwischen Gas und Flüssigkeit:

$$\ddot{x} = \frac{P_B(x) - P_C(x)}{\rho \cdot h} - g$$



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

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

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 ($P_1(x) \sim P_0(x^\gamma)$), z.B. anwendbar auf Stickstoffentladungen in Wasser oder Argonentladungen in flüssiges Natrium, während beim realitätsbezogenen Fall der Brennstoffexpansion Wärme-, Phasen- und Massenübergänge berücksichtigt werden müssen.

Aus der ebenen Darstellung kann man qualitativ folgende Phänomene erkennen:

- In der Anfangsphase ($P_B \gg P_C$) wird der Flüssigkeitskolben nach oben beschleunigt. Die Folge ist eine Kompression des Covergases und eine mechanische Belastung des Deckels.

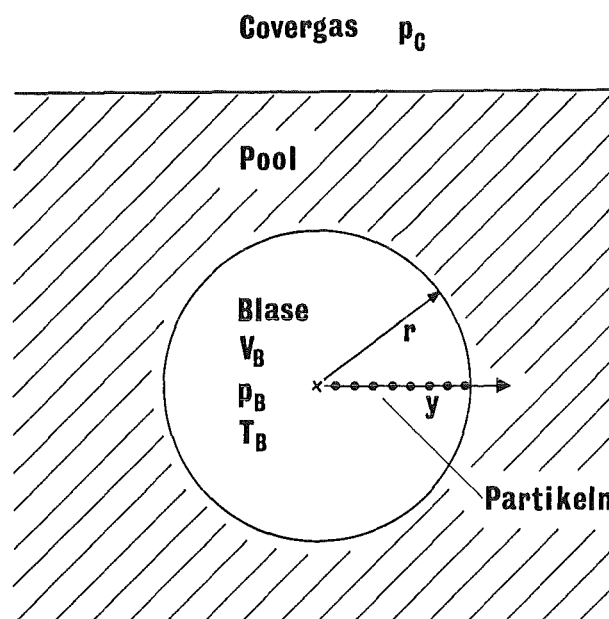
- Die Massenträgheit des Kolbens kann zu einer Überexpansion führen, d.h. der Druck in der Blase kann unter den Umgebungsdruck absinken.
- Im Falle von $P_C > P_B$ kommt es zu einer Rückwärtsbeschleunigung des Kolbens und zu einer erneuten Kompression des Blasenvolumens.
- Nach der Kompression beginnt 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.

B.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

$$\ddot{r} = \frac{P_B - P_C}{\rho \cdot r} - \frac{3 r^2}{2 \dot{r}}$$

Die Geometrie ist in der Abbildung skizziert. P_C ist der Covergasdruck, P_B der Druck in der Blase, ρ 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 Expansionsvorgangs steckt wieder in P_B . Über $P_C(t)$ können Annahmen gemacht werden, z.B. adiabatische Kompression. Der Expansionsvorgang läuft analog zur ebenen Darstellung ab: Die Flüssigkeit wird nach oben beschleunigt.

nigt, 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.

B.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 [2.8]. 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 [2.8] 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 [2.9] 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 σ = Oberflächenspannung Gas / Wasser

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

ρ = 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:

$$d_e = \lambda \cdot \sqrt{3}$$

B.4 Partikelverhalten bei Expansion und Oszillationen

Die beschriebenen Expansionen führen bei der FAUST-Geometrie zu Schwingungen mit Perioden von typischerweise 50 msec. Luftgetragene Partikel, 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 ein weiterer Abscheidemechanismus.

Im Rahmen des PAROGA-Rechenprogramms [2.12] 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

$$\ddot{y} = \frac{\pi}{8 m} \rho_g \cdot C_D \cdot d^2 (v_g - \dot{y}_i) \cdot |v_g - \dot{y}_i| - g \quad (A)$$

(quadratisches Widerstandsgesetz)

mit den Variablen

- x = Koordinate der Trennfläche Gas / Wasser
- y_i = Koordinate der Partikel Nr. i
- v_{g, i} = y_i / x · \dot{x} , Gasgeschwindigkeit am Ort y_i
- ρ_g = Gasdichte
- η_g = Gas-Zähigkeit
- Re = |v_{g, i} - \dot{y}_i | · 2r · ρ_g / η_g, Reynoldszahl
- m, d = Masse bzw. Durchmesser der Partikel
- C_D = Widerstandsbeiwert

Für C_D wurden, entsprechend der Reynoldszahl, unterschiedliche Relationen eingesetzt [2.13]:

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

$$C_D = 24 / Re + 0,5 \quad \text{für } Re > 4000$$

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

$$\ddot{y}_i = 3 \pi \eta_g \cdot d \cdot (v_g - \dot{y}_i) - g$$

Mit PAROGA kann die ebene Expansion, die radiale Expansion und eine Kombination (reaktorähnliche Geometrie) berechnet werden. Das Prinzip der reaktorähnlichen Geometrie wird in Abb. 3.1 gezeigt.

B.5 Partikeln und Entrainment

Die Entrainment-Tröpfchengrößen hängen von der Beschleunigung der Trennfläche ab. Im aerosolphysikalischen Sinne sind die Tropfen normalerweise sehr groß (einige 100 μm 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.

ANHANG II:

FAUST - 2B - Versuche: Versuchsparameter und aufgesammelte Mengen in den Sammelbehältern bei den Versuchen 301 - 314 (Ausdrucke des FAUST - Auswerteprogramms).

VERSUCHSNUMMER : 301
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 1.120E+06 PA
POOLHOEHE : 0.730 M
TEMPERATUR NATRIUM : 495.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 1
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

KEINE

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 2.700E-06 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

KEINE

VERSUCHSNUMMER : 302
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 1.030E+06 PA
POOLHOEHE : 0.730 M
TEMPERATUR NATRIUM : 523.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 2
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 5.250E-03 KG STRONTIUMOXID SR
SPQ(2) = 8.210E-03 KG NATRIUMJODID J

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 1.130E-05 KG
NA(2) = 1.450E-03 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 5.100E-09 KG STRONTIUMOXID SR
SP(2,1) = 3.000E-07 KG NATRIUMJODID J
SP(1,2) = 5.796E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(2,2) = 2.000E-07 KG NATRIUMJODID J

VERSUCHSNUMMER : 303
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 2.020E+06 PA
POOLHOEHE : 0.730 M
TEMPERATUR NATRIUM : 533.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 2
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 5.600E-04 KG JOD

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 4.830E-06 KG
NA(2) = 2.471E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 8.000E-10 KG JOD
SP(1,2) = 4.960E-06 KG JOD

VERSUCHSNUMMER : 304
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 1.030E+06 PA
POOLHOEHE : 0.730 M
TEMPERATUR NATRIUM : 733.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 3
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 8.467E-03 KG NATRIUMJODID J
SPQ(2) = 8.462E-03 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 3.410E-05 KG
NA(2) = 3.520E-04 KG
NA(3) = 9.900E-05 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 9.600E-09 KG NATRIUMJODID J
SP(2,1) = 8.230E-09 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,2) = 2.550E-09 KG NATRIUMJODID J
SP(2,2) = 1.270E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,3) = 2.000E-08 KG NATRIUMJODID J
SP(2,3) = 4.800E-08 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSNUMMER : 305
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 1.940E+06 PA
POOLHOEHE : 0.730 M
TEMPERATUR NATRIUM : 633.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 3
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 2.020E-03 KG JOD
SPQ(2) = 8.460E-03 KG STRONTIUMOXID

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 5.700E-05 KG
NA(2) = 2.076E-03 KG
NA(3) = 9.800E-05 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 1.720E-07 KG JOD
SP(2,1) = 1.030E-08 KG STRONTIUMOXID
SP(1,2) = 1.476E-06 KG JOD
SP(2,2) = 3.300E-07 KG STRONTIUMOXID
SP(1,3) = 9.802E-06 KG JOD
SP(2,3) = 2.856E-06 KG STRONTIUMOXID

VERSUCHSNUMMER : 306
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 3.000E+05 PA
POOLHOEHE : 0.600 M
TEMPERATUR NATRIUM : 768.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 3
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 8.470E-03 KG NATRIUMJODID J
SPQ(2) = 8.460E-03 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 9.800E-05 KG
NA(2) = 2.030E-04 KG
NA(3) = 4.610E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 3.800E-08 KG NATRIUMJODID J
SP(2,1) = 1.100E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,2) = 1.920E-08 KG NATRIUMJODID J
SP(2,2) = 2.680E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,3) = 4.980E-07 KG NATRIUMJODID J
SP(2,3) = 1.830E-07 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSNUMMER : 307
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 9.300E+05 PA
POOLHOEHE : 0.600 M
TEMPERATUR NATRIUM : 738.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 3
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 5.320E-03 KG CAESIUMJODID CS
SPQ(2) = 5.110E-03 KG CAESIUMJODID J
SPQ(3) = 8.656E-03 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 9.800E-05 KG
NA(2) = 2.410E-04 KG
NA(3) = 2.810E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 1.400E-08 KG CAESIUMJODID CS
SP(2,1) = 3.800E-08 KG CAESIUMJODID J
SP(3,1) = 1.100E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,2) = 5.700E-08 KG CAESIUMJODID CS
SP(2,2) = 5.100E-08 KG CAESIUMJODID J
SP(3,2) = 2.200E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,3) = 4.400E-08 KG CAESIUMJODID CS
SP(2,3) = 1.200E-07 KG CAESIUMJODID J
SP(3,3) = 1.980E-07 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSNUMMER : 308
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 1.850E+06 PA
POOLHOEHE : 0.600 M
TEMPERATUR NATRIUM : 773.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 3
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 5.080E-03 KG CAESIUMJODID CS
SPQ(2) = 4.870E-03 KG CAESIUMJODID J
SPQ(3) = 8.410E-03 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 2.960E-04 KG
NA(2) = 6.820E-04 KG
NA(3) = 5.280E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 2.170E-08 KG CAESIUMJODID CS
SP(2,1) = 4.210E-08 KG CAESIUMJODID J
SP(3,1) = 5.240E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,2) = 8.240E-08 KG CAESIUMJODID CS
SP(2,2) = 8.870E-08 KG CAESIUMJODID J
SP(3,2) = 7.430E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,3) = 1.250E-07 KG CAESIUMJODID CS
SP(2,3) = 9.320E-08 KG CAESIUMJODID J
SP(3,3) = 9.820E-08 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSNUMMER : 309
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 0.000E+06 PA
POOLHOEHE : 0.760 M
TEMPERATUR NATRIUM : 773.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 4
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 0.000

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 1.230E-04 KG
NA(2) = 1.040E-04 KG
NA(3) = 1.160E-04 KG
NA(4) = 1.190E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 0.000
SP(1,2) = 0.000
SP(1,3) = 0.000
SP(1,4) = 0.000

VERSUCHSNUMMER : 310
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 3.400E+06 PA
POOLHOEHE : 0.600 M
TEMPERATUR NATRIUM : 673.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.090E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 4
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 4.560E-04 KG JOD

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 2.050E-05 KG
NA(2) = 1.565E-03 KG
NA(3) = 1.012E-03 KG
NA(4) = 3.270E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 0.000E+00 KG JOD
SP(1,2) = 9.070E-06 KG JOD
SP(1,3) = 9.350E-06 KG JOD
SP(1,4) = 1.310E-06 KG JOD

VERSUCHSNUMMER : 311
VERSUCHSPARAMETER :
 DRUCK QUELLBEHAELTER : 2.810E+06 PA
 POOLHOEHE : 0.810 M
 TEMPERATUR NATRIUM : 723.000 K
 DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
 ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 4
 DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
 TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
 EINWAAGE :

SPQ(1) = 9.850E-04 KG JOD

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 7.730E-05 KG
 NA(2) = 2.350E-04 KG
 NA(3) = 1.050E-03 KG
 NA(4) = 4.870E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 4.000E-08 KG JOD
 SP(1,2) = 3.500E-05 KG JOD
 SP(1,3) = 2.100E-05 KG JOD
 SP(1,4) = 4.500E-07 KG JOD

VERSUCHSNUMMER : 312
VERSUCHSPARAMETER :
 DRUCK QUELLBEHAELTER : 3.800E+06 PA
 POOLHOEHE : 0.730 M
 TEMPERATUR NATRIUM : 763.000 K
 DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
 ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 3
 DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
 TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
 EINWAAGE :

SPQ(1) = 5.140E-04 KG JOD

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 1.040E-04 KG
 NA(2) = 1.261E-03 KG
 NA(3) = 1.046E-03 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 1.000E-08 KG JOD
 SP(1,2) = 1.740E-05 KG JOD
 SP(1,3) = 6.430E-06 KG JOD

VERSUCHSNUMMER : 313
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 3.810E+06 PA
POOLHOEHE : 0.730 M
TEMPERATUR NATRIUM : 753.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 4
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 9.500E-03 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 3.660E-04 KG
NA(2) = 6.171E-03 KG
NA(3) = 9.260E-04 KG
NA(4) = 1.615E-03 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 3.400E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,2) = 1.000E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,3) = 3.900E-08 KG STRONTIUMOXID SR
SP(1,4) = 4.000E-09 KG STRONTIUMOXID SR

VERSUCHSNUMMER : 314
VERSUCHSPARAMETER :
DRUCK QUELLBEHAELTER : 3.120E+06 PA
POOLHOEHE : 0.400 M
TEMPERATUR NATRIUM : 763.000 K
DRUCK COVERGAS : 1.080E+05 PA
ANZAHL SAMMELBEHAELTER : 4
DRUCK SAMMELBEHAELTER : 0.000E+00 PA
TEMPERATUR SAMMELBEHAELTER : 293.000 K

SPALTPRODUKTE IM QUELLBEHAELTER :
EINWAAGE :

SPQ(1) = 4.500E-03 KG CAESIUM CS

VERSUCHSERGEBNISSE :

NATRIUM IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

NA(1) = 1.600E-04 KG
NA(2) = 7.790E-04 KG
NA(3) = 5.340E-04 KG
NA(4) = 2.490E-04 KG

SPALTPRODUKTE IN DEN SAMMELBEHAELTERN :

SP(1,1) = 4.000E-09 KG CAESIUM CS
SP(1,2) = 6.300E-08 KG CAESIUM CS
SP(1,3) = 6.000E-08 KG CAESIUM CS
SP(1,4) = 4.200E-08 KG CAESIUM CS