

KfK 4285  
BF-R65.523-13  
EIR-621  
GRS-A-1344  
KWU-R-917/87/112  
Juli 1987

# **DEMONA**

**Jahresbericht 1986**

**Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung  
Battelle Institut e. V.  
Kraftwerksunion AG  
Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH**

**zusammengestellt von W. Schöck  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KfK 4285  
BF-R65.523-13  
EIR-621  
GRS-A-1344  
KWU-R-917/87/112  
Juli 1987

# DEMONA

## Jahresbericht 1986

mit Beiträgen von  
H. Bunz, W. Schöck, KfK/LAF  
D. Haschke, A. Fromentin, R. Taubenberger, EIR-EU  
T. Kanzleiter, T. Schröder, Battelle Institut  
M. Peehs, H. Ruhmann, M. Fischer, KWU  
G. Weber, E. Schrödl, GRS  
zusammengestellt von:  
W. Schöck, KfK/LAF



**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH**

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

ISSN 0931-7562

DEMONA ist ein Versuchsprogramm, das gemeinschaftlich durchgeführt wird von:

- Kernforschungszentrum Karlsruhe,  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik I  
in Zusammenarbeit mit der Projektleitung des Projekts Nukleare Sicherheit
- Battelle-Institut e.V., Frankfurt
- Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
- Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Garching/Köln
- Kraftwerk Union, Erlangen

Finanziell unterstützt wird das DEMONA-Programm durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie, das Kernforschungszentrum Karlsruhe, das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung und den Schweizerischen Nationalen Energieforschungsfond.

Alle Arbeiten im DEMONA-Forschungsprogramm werden von der DEMONA-Arbeitsgruppe koordiniert. Die DEMONA-AG bewertet auch die erzielten Ergebnisse und führt den Vergleich mit den Voraus- und Nachrechnungen durch. Mitglieder der DEMONA-AG sind:

J.P.Hosemann, KfK/PNS  
H.Bunz, W.Schikarski, W.Schöck, KfK/LAF I  
D.Haschke, A.Fromentin, R.Taubenberger, EIR  
T.Kanzleiter, Th.Schröder, Battelle-Institut  
M.Fischer, M.Peehs, H.Ruhmann, KWU  
H.Erlenwein, G.Weber, E.Schrödl, GRS  
J.A.Gieseke, Battelle Columbus Laboratories

## Zusammenfassung

Das DEMONA-Programm dient der DEMOnstration Nuklearen Aerosolverhaltens durch Experimente im großen Maßstab. Es soll zeigen, daß der NAUA-Code als Gesamtmodell in der Lage ist, das typische störfallbedingte Aerosolverhalten im Containment eines Druckwasserreaktors realistisch und genügend genau zu beschreiben. Wegen der engen Kopplung von Thermodynamik und Aerosolverhalten werden im DEMONA-Programm auch Beiträge zur Verifikation von Thermodynamik-Codes (COCMEL, FIPLLOC) geleistet.

Die Experimente werden im Modellcontainment des Battelle-Instituts in Frankfurt durchgeführt. Das Modellcontainment ist eine Nachbildung von Biblis A im Maßstab 1:4 und zeichnet sich durch geometrische und thermodynamische Eigenschaften aus, die eine realistische Simulation der Bedingungen beim Kernschmelzunfall ermöglichen.

Im Berichtsjahr 1986 wurden die beiden letzten Hauptversuche der Testmatrix durchgeführt und ausgewertet. Dieser Bericht faßt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse zusammen.

Die DEMONA-AG als koordinierendes und bewertendes Gremium hat sich in ihrer 17. Sitzung am 26. 11. 1986 aufgelöst. Das DEMONA Programm ist damit abgeschlossen, verbleibende Restaktivitäten werden von KfK/LAF1 abgewickelt.

## DEMONA Annual Report 1986

### Abstract

The DEMONA program is conducted to DEMONstrate Nuclear Aerosol behavior in large scale experiments. It is to be shown that the NAUA aerosol code is capable of describing sufficiently well the typical aerosol behavior during accidents in pressurized water reactors. DEMONA will also contribute to the validation of the thermodynamics codes COCMEL and FIPLOC.

The experiments are carried out in the model containment facility at Battelle Frankfurt which is a quarter scale model of the Biblis A containment. The geometric and thermodynamic properties of the model containment allow a realistic simulation of the conditions during core melt accidents.

In 1986, the two remaining experiments of the test matrix were carried out and evaluated. In this report the work performed and the main results are summarized.

The DEMONA Working Group as a coordinating and valuating body dissolved in their 17th meeting on November 26, 1986. The DEMONA program was thus concluded. The remaining activities are being coordinated by KfK/LAF1.

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Überblick DEMONA 1986 (KfK/LAF1)	3
2.1. Durchgeführte Arbeiten	3
2.2. Ergebnisse	4
3. Modellcontainment und thermodynamische Messungen (Battelle)	11
3.1. Versuchsanlage	11
3.2. Versuchsablauf	12
3.3. Thermodynamische Messungen	15
4. Aerosolerzeugung (KWU)	25
5. Aerosolmessungen	29
5.1. Aerosolmeßtechnik (EIR)	29
5.2. Meßresultate (EIR)	29
5.3. Sonderinstrumentierung (KfK/LAF1)	51
6. Modelltheorie	55
6.1. Thermodynamische Rechnungen mit COCMEL (KWU)	55
6.2. Integrierte Mehrraumrechnungen (GRS)	61
6.3. Aerosolverhaltensrechnungen (KfK/LAF1)	70
7. Veröffentlichungen im Berichtsjahr	73

## 1. Einleitung

Das Verhalten nuklearer Aerosole nach schweren Störfällen in Kernkraftwerken ist seit nahezu zwei Jahrzehnten intensives Forschungsthema in der Bundesrepublik Deutschland, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten im Kernforschungszentrum (KfK) liegt. Die Untersuchungen zum nuklearen Aerosolverhalten bei schweren Störfällen in LWR-Kernkraftwerken begannen Anfang der 70er Jahre. Der internationale Stand der Kenntnis auf diesem wichtigen Gebiet der Reaktorsicherheit, das insbesondere den radiologischen Quellterm entscheidend beeinflusst, wurde in zwei Berichten /1, 2/ des Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) der OECD Nuclear Energy Agency (NEA) dargestellt.

Die früheren experimentellen Untersuchungen zum Aerosolverhalten im KfK wurden im Labor- bzw. Technikums-Maßstab durchgeführt. Für den Fall der schweren Störfälle bei LWR-Kernkraftwerken wurde der NAUA-Code entwickelt, der in einem PNS-Forschungsprogramm des Laboratoriums für Aerosolphysik und Filtertechnik I des KfK (NAUA-Programm) auch experimentell abgesichert wurde, wobei insbesondere der Einfluß des kondensierenden Wasserdampfes auf das Aerosolverhalten untersucht wurde. Die Version NAUA-Mod5 berücksichtigt alle wichtigen Aerosolprozesse (Sedimentation, Diffusion, Diffusiophorese, Brown'sche und Gravitationskoagulation, Kondensation).

Das DEMONA-Programm /3,4/ dient der Demonstration nuklearen Aerosolverhaltens durch Experimente im großen Maßstab. Es soll zeigen, daß der NAUA-Code als Gesamtmodell in der Lage ist, das typische störfallbedingte Aerosolverhalten im Containment eines DWR realistisch und genügend genau zu beschreiben. Wegen der engen Kopplung von Thermodynamik und Aerosolverhalten wird das DEMONA-Programm auch zur Verifikation der Thermodynamikcodes COCMEL und FIPLOC einen Beitrag leisten.

Die Experimente werden im Modellcontainment des Battelle Instituts in Frankfurt durchgeführt. Das Modellcontainment ist eine Nachbildung von Biblis A im Maßstab 1:4 und zeichnet sich durch geometrische und thermodynamische Eigenschaften aus, die eine sehr realistische Simulation der Bedingungen beim Kernschmelzunfall ermöglichen.

Folgende Institutionen leisten wissenschaftliche und technische Beiträge:

- Kernforschungszentrum Karlsruhe, Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik I in Zusammenarbeit mit der Projektleitung des Projektes Nukleare Sicherheit
- Battelle-Institut, Frankfurt
- Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
- Gesellschaft für Reaktorsicherheit, München
- Kraftwerk-Union, Erlangen

Finanziell unterstützt wird das DEMONA-Programm durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie, das Kernforschungszentrum Karlsruhe, das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung und den Schweizerischen Nationalen Energieforschungsfond.

Die Anlage, der Versuchsaufbau und die Zielsetzungen des DEMONA-Programms sind in /3,4/ beschrieben. Die Arbeiten bis Ende 1985 sind in /5, 6/ zusammenfassend dargestellt. Der vorliegende Bericht enthält eine Zusammenfassung der wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse aus dem Jahre 1986. Die Einzelheiten der Versuche werden jeweils in gesonderten Berichten dokumentiert.

- /1/: Nuclear Aerosols in Reactor Safety  
A State-of-the-Art Report  
OECD/NEA Hrsg., Paris 1979
- /2/: Nuclear Aerosols in Reactor Safety  
Supplementary Report  
OECD/NEA Hrsg., Paris 1985
- /3/: W.O. Schikarski Hrsg.; KfK 3636, EIR 502, 1983  
DEMONA, Forschungsprogramm zur Demonstration nuklearen  
Aerosolsverhaltens
- /4/: J.P. Hosemann, D. Haschke  
DEMONA, Aerosol Removal Experiments  
EIR Bericht 505, 1983
- /5/: W. Schöck, DEMONA Jahresbericht 1984, KfK 3942, BF-R 65.523-30-3,  
EIR 553, GRS-A-1078, KWU-R-917/85/103 (1985)
- /6/: W. Schöck, DEMONA Jahresbericht 1985, KfK 4182, BF-R65.523-12,  
EIR-592, GRS-A-1252, KWU-R-917/86/107 (1986)

## 2. Überblick DEMONA 1986

### 2.1. Durchgeführte Arbeiten

Nachdem im Vorjahr mit der Durchführung des Versuchs A7 die Aerosolgeneratoren für Eisenoxidaerosol erfolgreich eingesetzt worden waren, konnten im Berichtszeitraum die beiden verbliebenen Hauptversuche (A8 und A9) durchgeführt werden.

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten und die wesentlichen Ergebnisse kurz zusammengefaßt. Die nachfolgenden Kapitel enthalten ausführlichere Darstellungen zu den Einzelaufgaben.

#### Modellcontainment

Mit der vom Battelle-Institut betriebenen thermodynamischen Instrumentierung des Modellcontainments wird der Betrieb überwacht und die ablaufenden thermodynamischen Vorgänge gemessen. Die eingesetzten Sonden und Geräte waren im wesentlichen dieselben wie im Vorjahr, bis auf vereinzelte Ausfälle arbeiteten alle Systeme einwandfrei.

#### Aerosolgeneratoren

Die Entwicklung und der Betrieb der Aerosolgeneratoren wird von KWU durchgeführt. Die Methoden zur Erzeugung von Zinn- und Eisenoxidaerosol waren in den Vorjahren entwickelt worden. Im Berichtszeitraum wurden nur Versuche mit Mischaerosol durchgeführt, bei denen beiden Spezies eingesetzt wurden.

## Aerosolmeßtechnik

Die Aerosolmeßtechnik des EIR wurde wie im Vorjahr eingesetzt. Die Aerosolfotometer waren vollständig überholt und umgerüstet worden, wodurch eine drastische Verbesserung der Eigenschaften und der Betriebssicherheit erzielt werden konnte.

Die Kalorimeter arbeiteten nach dem Umbau im Vorjahr störungsfrei.

## 2.2. Ergebnisse

Die beiden durchgeführten Hauptversuche sind

- A8 (V55) Versuch mit Mischaerosol aus Zinnoxid und Eisenoxid  
sonst wie B3/B4
- A9 (V56) Mehrraumversuch mit komplexer Geometrie des  
Modellcontainments, sowie Mischaerosol und  
transienter Thermodynamik

Der Versuch A8 war eine Fortsetzung der Sequenz der Versuche mit unterschiedlichen Aerosolmaterialien. Nach der Durchführung der Versuche B3/B4 mit reinem Zinnoxidaerosol und A7 mit reinem Eisenoxidaerosol wurde der Versuch A8 mit Mischaerosol aus diesen beiden Komponenten durchgeführt. Damit ergibt sich, unter Einbeziehung des Versuchs B6 mit Silber-Magnesiumoxid-Mischaerosol, insgesamt eine recht umfassende Serie von Versuchen mit verschiedenen Aerosolen, um den Einfluß des Aerosolmaterials auf das Aerosolverhalten zu demonstrieren.

Der Versuch A9 schließlich wurde als 'echter' Mehrraumversuch durchgeführt, wobei das Modellcontainment durch Konstruktionsmaßnahmen in vier Raumgruppen aufgeteilt wurde. Dieser Versuch diente der Prüfung der Anwendbarkeit der Einraummodelle COCMEL und NAUA auf komplexere geometrische Situationen.

## Mischaerosolversuch A8

Der vorhergegangene Versuch A7 war der erste in der DEMONA Versuchsreihe, der mit Eisenoxidaerosol durchgeführt wurde. Die Verwendung verschiedener Aerosolsubstanzen soll zeigen, ob und wie stark der Aerosolabbau von dem Material der Partikeln abhängt. Physikalisch ist diese Frage leicht zu beantworten, die Partikeleigenschaften, die in die Abbauraten eingehen, sind in wesentlichen die Dichte und die Affinität zu Wasser. Sind diese Eigenschaften bekannt, kann das Aerosolverhalten berechnet werden. Der Versuch A7 mit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosol hatte damit im wesentlichen Demonstrationscharakter.

Ähnliches gilt für Mischaerosole. Bei den hohen Konzentrationen der Aerosole in DEMONA, und beim Kernschmelzen, besteht kein Zweifel daran, daß Koagulation für eine rasche Vermischung der Spezies in den Partikeln sorgt, so daß alle Partikeln gleich zusammengesetzt sind, und zwar unabhängig von ihrer Größe, und daß damit auch alle Komponenten gemeinsam abgebaut werden, wie in den Aerosolcodes berechnet. Der Versuch B6 hatte bereits, wenn auch unbeabsichtigt, diesen Beweis erbracht.

Ziel des Versuchs A8 war die Demonstration des Mischaerosolkonzepts unter den äußeren Randbedingungen der Basisversuche B3 und B4, d.h. mit stationärer Thermodynamik und mit hoher Aerosolkonzentration.

Als Aerosolmaterialien wurden  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{SnO}_2$  ausgewählt. Zwei Generatoren wurden mit  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  und einer mit Zinnpulver betrieben. Die  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosolgeneratoren wurden zuerst gestartet und versagten beide nach zehn Minuten, ehe noch der  $\text{SnO}_2$ -Aerosolgenerator gestartet war. Es gelang, die Generatoren zu reparieren und nach 90 Minuten neu zu starten.

Die Massenbilanzen sind nur für beide Erzeugungsphasen gemeinsam verfügbar, es wurden 12.6 kg  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  und 1.9 kg  $\text{SnO}_2$  verbraucht. Mit dem Gesamtwirkungsgrad von 90% für die  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosolgeneratoren und von 80% für den  $\text{SnO}_2$ -Aerosolgenerator ergeben sich insgesamt 4.3 kg  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosol und 1.9 kg  $\text{SnO}_2$ -Aerosol. Das Maximum der gemessenen Aerosolmassenkonzentration lag bei  $5 \text{ g/m}^3$ . Alle mit den Filtern und dem Beta-Staubmeter gemessenen Massenkonzentrationen sind in Abb.2.2.1 dargestellt.

Zur Untersuchung der Zusammensetzung des Aerosols wurden alle Filterproben nach der Massenbestimmung auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Nach dem ersten Start der Aerosolgeneratoren, bei dem nur  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosol erzeugt wurde, besteht das Aerosol nur aus  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Nach dem zweiten Start fällt der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Anteil innerhalb einer Stunde auf einen Wert von ca. 30% und bleibt dann konstant. Diese zeitliche Auflösung wurde durch die zwei Generatorbetriebsphasen mit unterschiedlicher Aerosolzusammensetzung möglich. Es ist keine Abweichung vom Mischungskonzept erkennbar. Darüberhinaus zeigt die Analyse der Impaktorproben, daß auch keine Abhängigkeit der Partikelzusammensetzung von der Partikelgröße besteht.

Die Gesamtabseiderate, die sich aus Abb.2.2.1 ergibt, ist innerhalb der Meßfehler gleich der der Versuche B3 und B4. Beim Versuch A7 war eine etwas höhere Abscheiderate gefunden worden. Die Nachrechnung mit dem NAUA-Code, die in der Abbildung ebenfalls eingezeichnet ist, ergibt wieder die bekannte Abweichung zur konservativen Seite. Die geringe Volumenkondensationsrate, die von COCMEL berechnet wird, führt dazu, daß durch Kondensation kaum ein Beitrag zur Gesamtabseidung verursacht wird. Tatsächlich sind jedoch die beobachteten Effekte (Tröpfchenpeak in den Fotometerkurven und Kalorimetermessungen) so groß, daß sie nicht von einer so geringen Kondensationsrate verursacht werden können.

Der Vergleich der berechneten und aus den Messungen abgeleiteten akkumulierten Leckage ergibt einen konservativen Faktor von 2.3.

#### Mehrraumversuch A9

Der Versuch A9 war von Anfang an als Mehrraumversuch geplant. Nachdem alle anderen Versuche in angenäherter Einraumgeometrie durchgeführt worden waren, sollte der Mehrraumversuch als Testfall für die Anwendbarkeit der Einraummodelle COCMEL und NAUA auf tatsächliche komplexe Geometrien dienen. Das Ziel des Versuchs war, die durch das Mißverhältnis Mehrraumgeometrie zu Einraummodell verursachten Abweichungen zu bestimmen.

Die wesentlichen Änderungen in der Containmentstruktur sind folgende (vgl. z.B. Abb.5.2.10): Eine Zwischendecke aus Stahl wurde zwischen R1 und R2

eingezogen und alle Öffnungen von R1+3 nach R4 und R6 wurden geschlossen. Ebenfalls geschlossen wurden alle Öffnungen von R9 nach R6 und R8. R6 wurde fast völlig isoliert, die Öffnungen nach R8 und R5 wurden im Querschnitt erheblich reduziert. Die Dampfeinspeiseleitungen blieben unverändert, damit erfolgte die Dampfeinspeisung in zwei verschiedene Raumgruppen: nach R2 am Anfang der Aufheizphase und nach R1 während der anderen Phasen.

Der Versuch A9 wurde zusätzlich zur Mehrraumgeometrie mit Mischaerosol und mit nicht-stationärer Thermodynamik durchgeführt. Dies sind drei Änderungen auf einmal, was dem Konzept des DEMONA-Programms widerspricht, nur eine wesentliche Änderung zwischen zwei Versuchen vorzunehmen. Der generelle Zeitdruck und die Absicht, den letzten Versuch so kompliziert wie möglich durchzuführen, führten jedoch zu der Festlegung von: Vier-Zonen-Geometrie, nicht-stationärer Thermodynamik wie im Versuch B6 und Mischaerosol aus Eisen- und Zinnoxid wie in Versuch A8.

Zwei Aerosolgeneratoren wurden mit Eisenpentacarbonyl und einer mit Zinnpulver betrieben, der Gesamtverbrauch war 19.8 kg Eisenpentacarbonyl und 3.9 kg Zinnpulver. Mit den Gesamtwirkungsgraden von 90% für den Eisenoxidaerosolgenerator und von 80% für den Zinnoxidaerosolgenerator ergeben sich gemittelte Aerosolerzeugungsraten von 218 g/min  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosol und 96 g/min  $\text{SnO}_2$ -Aerosol. Das gemessene Maximum der Gesamtmassenkonzentration im Containment war 7 g/m<sup>3</sup>.

Schon während des Versuchs konnten die Auswirkungen der vorgenommenen Geometrieänderungen beobachtet werden. Diese sind insbesondere auf die Unterdrückung der großen Konvektionswalze zurückzuführen, die sich in allen bisherigen Aerosolversuchen ausgebildet hatte. So wurde eine Luftanreicherung in dem äußeren Ring von R9 beobachtet, die nur während der Aufheizphase durch Abblasen über die Sumpfventile abgebaut werden konnte. Ferner wurde während der Aerosolmeßphase in R1+R3 eine Dampfanreicherung (keine reine Dampfatosphäre wie erwartet) gefunden.

Alle mit den Filtern und mit dem Beta-Staubmeter gemessenen Massenkonzentrationswerte sind in der Abb.2.2.2 gezeigt. Die Abnahme der Massenkonzentration während der trockenen (bis 52.5 h) und der kondensierenden (ab 52.5 h) Phase erfolgt mit fast gleichen Raten wie im Versuch B6.

Gravierende lokale Unterschiede in der Aerosolkonzentration sind in der Abb.2.2.2 nicht zu erkennen. Aus den Fotometermessungen lassen sich jedoch mehr Einzelheiten ablesen. In den zentralen Räumen R1+R3 wurden während der Aerosoleinspeisung und der trockenen Phase die höchsten Konzentrationen aller Versuche insgesamt gefunden. Die Ausbreitung der Aerosolfront durch das Containment ist ebenfalls gut zu verfolgen. Insbesondere sind die Ankunftszeiten wegen der verlängerten Ausbreitungswege und der schwächeren Konvektion stärker gespreizt als bei den vorherigen Versuchen. Unter dem Dach von R9 wurde die längste Verzögerung mit mehr als 40 Minuten beobachtet.

Interessant ist, daß nach der Wiederaufnahme der Dampfeinspeisung in R1+R3 diese Räume nicht wie erwartet freigespült wurden, sondern daß die gemessenen Massenkonzentrationen sich nicht erkennbar von denen an den anderen Meßorten unterscheiden. Dieses Phänomen konnte erst erklärt werden, nachdem die FIPLOC-Nachrechnungen vorlagen. Dabei ergab sich, daß sich zwei gekoppelte Konvektionswalzen ausgebildet hatten: eine innere von R2 nach R1, R8 und zurück und eine äußere von R8 nach R7, R9, R5, R6 und zurück nach R8. Beide Walzen gehen durch den gemeinsamen Raum R8, wo die Vermischung von Dampf und Aerosol stattfindet. Dieses Konvektionsmuster erfaßt alle Räume des Containments mit Ausnahme des äußeren Rings von R9. Die auch in diesen Versuch beobachtete Homogenisierung, sobald der Dampf wieder eingespeist wurde, ist durch diese FIPLOC-Rechnung erklärt.

Das Einsetzen der Kondensation am Aerosol kann in den Fotometerkurven der Messungen außerhalb der zentralen Räume deutlich erkannt werden. Die Verzögerung beträgt weniger als 30 Minuten.

In der Abb.2.2.2 ist auch das Ergebnis der Nachrechnung mit NAUA eingezeichnet (ausgezogene Linie). Der Unterschied zwischen Messung und Rechnung ist von der gleichen Art und Größenordnung wie in allen vorherigen Fällen. Die geringe Volumenkondensationsrate, die von COCMEL berechnet wird führt dazu, daß kaum ein Effekt durch Kondensation verursacht wird. Man sieht das deutlich daran, daß die berechnete Kurve keinen Knick an der Stelle des Übergangs zu kondensierenden Verhältnissen zeigt. Tatsächlich sind jedoch die beobachteten Effekte (Tröpfchenpeak in den Fotometerkurven und Kalori-

metermessungen) so groß, daß sie nicht von einer so geringen Kondensationsrate verursacht werden können.

Der integrale Vergleich von Messung und Rechnung, die akkumulierte Leckage, ergibt einen Unterschied um einen Faktor 2.4 auf der konservativen Seite. Dieser Wert ist überraschenderweise unauffällig unter denen aller Versuche, die zwischen 1.7 und 3.0 liegen. Das bedeutet, daß der Mehrraumversuch A9 mit den Einraummodellen COCMEL und NAUA ebenso gut nachgerechnet werden konnte wie die vorhergegangenen Einraumversuche. Die Erklärung dafür wurde allerdings erst möglich durch thermodynamische Mehrraumrechnungen, die zeigten, wie der konvektive Transport durch alle Räume des Containments für einen ausreichend schnellen Ausgleich lokaler Konzentrationsunterschiede sorgt (vgl. Abschnitt 6.2.2).

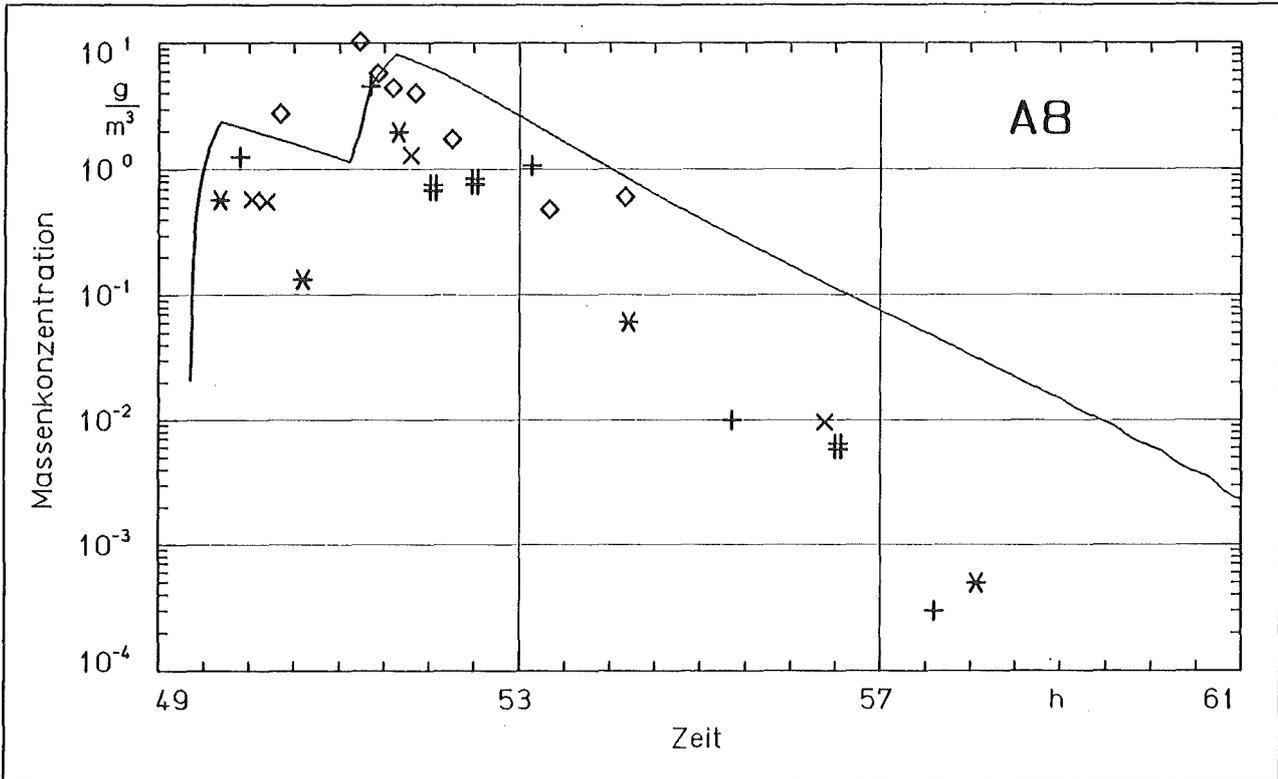


Abb.2.2.1: Vergleich der Meßdaten mit NAUA-Nachrechnung

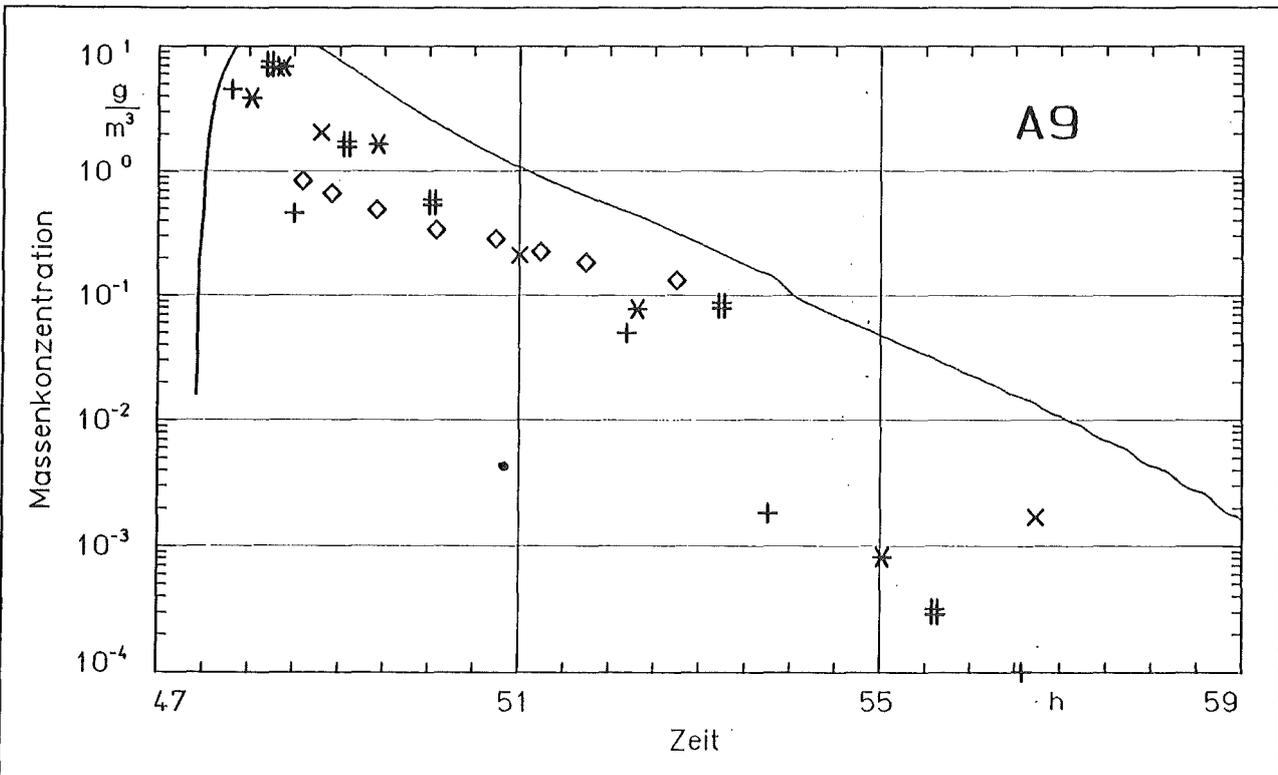


Abb.2.2.2: Vergleich der Meßdaten mit NAUA-Nachrechnung

### 3 Modellcontainment und thermodynamische Messungen

#### 3.1 Versuchsanlage

Die wichtigsten Daten des aus konventionellem Stahlbeton erstellten Modellcontainments sind in Bild 3.1.1 zusammengefaßt.

Wie bei den vorhergehenden DEMONA-Versuchen wurde auch beim Versuch A8 eine Quasi-Einraum-Geometrie dadurch angenähert, daß sämtliche Überströmöffnungen in den nicht demontierbaren Innenwänden vollständig geöffnet wurden. Außerdem sorgte eine kontinuierliche Dampfeinspeisung an der tiefsten Stelle des Modellcontainments ( $H = + 0,1\text{m}$ ) für eine gute konvektive Durchmischung des gesamten Containmentvolumens.

Beim Mehrraum-Versuch A9 wurde dagegen das Containmentvolumen durch

- Einziehen einer horizontalen Trennwand in den zylindrischen Innenraum und durch
- ganzes oder teilweises Verschließen von Überströmöffnungen in den übrigen Zwischenwänden

in vier Raumzonen unterteilt. Die Zonenvolumen und die freien Überströmflächen zwischen den Zonen sind zur DWR-Anlage Biblis B etwa im Verhältnis 1:112 skaliert, siehe Bild 3.1.2.

Die in Raum R2 (Zone 4, Bild 3.1.2) gelegene "obere" Dampfeinspeisestelle ( $H = 3,2\text{ m}$ ) wurde nur während der Phase der Containmentvorheizung betrieben. Während der eigentlichen Aerosolversuchsphase wurden dagegen der Dampf auf Höhe  $H = + 0,1\text{ m}$  und das Aerosol in Höhe  $H = 1,7\text{ m}$  der Raumzone 1 (R1 + R3) zugeführt.

### 3.2 Versuchsablauf

#### Versuch A8 (= V55)

Dieser Einraum-Versuch mit Zinnoxid-Eisenoxid-Mischaerosol wurde in folgenden Versuchsphasen abgewickelt:

Phase 1 - Ausspülen der Luft:

Der in Containment-Mitte auf  $H = 3\text{m}$  ("obere" Dampfeinspeisestelle) zugeführte Dampf füllt das Containmentvolumen von oben her auf; die anfangs vorhandene Luft strömt über geöffnete Ventile am Containmentboden ab. Dauer 6,7 h.

Phase 2 - Aufheizen der Containmentstruktur:

Durch eine kondensierende Sattedampf-Atmosphäre von  $115\text{ °C} / 1,7\text{ bar}$  (Druck durch geregelte Dampfnachspeisung konstant gehalten) werden die inneren und äußeren Betonstrukturen des Modellcontainments bis zum Erreichen stationärer Temperaturverhältnisse aufgeheizt. Dauer 44,1 h. Etwa 3,6 h vor dem Ende dieser Phase wurde von der "oberen" auf die "untere" Dampfeinspeisestelle umgeschaltet.

Phase 3 - Aerosoleinspeisung:

Das in Luft suspendierte Modellaerosol wurde in zwei Schüben auf Höhe  $H = + 1,7\text{m}$  zugeführt: Zunächst wurde nur Eisenoxid-aerosol, nach einer Zwischenpause dann das gewünschte Zinnoxid-Eisenoxid-Mischaerosol eingespeist.

Die Dampfzufuhr ( $H = + 0,1\text{m}$ ) wurde während der beiden Aerosoleinspeisephasen in der Menge etwas reduziert, aber nicht unterbrochen. In der Zwischenphase wurde die zugeführte Dampfmenge so geregelt, daß der Containmentdruck konstant auf 2,18 bar blieb. In dieser Zwischenphase ist Nebelbildung in der Containmentatmosphäre beobachtet worden.

#### Phase 4 - Aerosolabbau:

Durch eine geregelte Dampfnachspeisung ( $H = 0,1\text{m}$ ) werden annähernd stationäre thermodynamische Bedingungen in der Containmentatmosphäre eingestellt. Zu Beginn der Phase 4 ist Nebelbildung in der Containmentatmosphäre beobachtet worden, für die restliche Zeit der Phase 4 kann man einen annähernd gesättigten Zustand der Dampf-Luft-Atmosphäre annehmen.

#### Versuch A9 (= V56)

Der Mehrraum-Versuch A9 mit Zinnoxid-Eisenoxid-Mischaerosol unterteilt sich in folgende Phasen:

##### Phase 1 - Ausspülen der Luft:

Ähnlich wie beim Versuch A8. Dauer 6,9h

##### Phase 2 - Aufheizen der Containmentstruktur:

Beim Mehrraumversuch ist der Ringraum zwischen dem Trümmer-schutzzyylinder und der Containment-Außenwand an seiner Unterseite verschlossen. Die im Containment enthaltene Restluft kann sich deshalb dort ansammeln und die Aufheizung der angrenzenden Strukturen behindern. Als Gegenmaßnahme wurde zweimal während der Phase 2 lufthaltige Atmosphäre aus dem Ringraum abgezogen und durch zusätzlich zugeführten Dampf ersetzt. Dauer der Phase 2: 41,0h.

##### Phase 3.1 - Stopp der Dampfeinspeisung:

Durch fortdauernde Kondensation an den wärmeabführenden Außenwänden sinken Dampfpartialdruck und Gesamtdruck der Containmentatmosphäre langsam ab. Sobald die Atmosphären-temperatur absinkt, strömt jedoch von den noch unverändert heißen Innenstrukturen "trockene" Wärme zu und führt zu einer leicht überhitzten (ungesättigten, "trockenen") Dampf-Luft-Atmosphäre. Dauer: 0,8h.

### Phase 3.2 - Aerosoleinspeisung:

Auf Höhe  $H = 1,7\text{m}$  wird in heißer Luft suspendiertes Zinnoxid-Eisenoxid-Mischaerosol in die Raumzone 1 eingespeist, und der Containmentdruck steigt an. Es zeigt sich, daß sich die Temperatur des eingespeisten Aerosols rasch (d.h. spätestens bis zum Übertritt in die Raumzone 2) an die vorhandenen Strukturtemperaturen angleicht. Dadurch steigt die spezifische Dichte des luftgetragenen Aerosols über die der vorhandenen Dampf-atmosphäre an, bevor das eingespeiste Aerosol - wie bei den vorhergegangenen Quasi-Einraum-Versuchen - eine Dichtekonvektionsströmung erzeugen kann, die zu einer homogenen Mischung von Aerosol und Containmentatmosphäre führt. Deshalb breitet sich beim Mehrraumvorversuch das eingespeiste Aerosol nur langsam und zonenweise aus (Bild 3.3.1), und die Dampf-Luft-Verteilung wie auch die Anfang-Aerosolkonzentrations-Verteilung für die anschließende Aerosol-Abbauphase sind inhomogen. Dauer der Phase 3.2: 1,2h.

### Phase 3.3 - Aerosolabbau, Teil 1 (Dauer 3,7h):

Das Containmentvolumen ist abgeschlossen, ohne Luft- oder Dampfzufuhr. Dampfkondensation an den Außenwänden führt zu einem langsamen Absinken von Dampfpartial- und Gesamtdruck. Im Gegensatz zu den Beobachtungen bei vergleichbaren Quasi-Einraum-Versuchen (B5, B6) stellte sich jedoch keine einheitlich "trockene" Containmentatmosphäre ein, vielmehr ergaben sich zonenweise unterschiedliche Verhältnisse: In den Innenräumen mit hohem Luft- und Aerosolgehalt ist die Atmosphäre stark ungesättigt ("trocken"), während im Kuppelraum (hoher Dampfgehalt) sich rasch Sättigung einstellt und Nebeltröpfchen ausfallen ("Volumenkondensation", beschleunigt den lokalen Aerosolabbau).

Phase 3.4 - Aerosolabbau, Teil 2 (Dauer 0,9h):

Die Dampfzufuhr nach Zone 1 wird wieder aufgenommen. Der zugeführte Dampf schob jedoch die vorhandene aerosolreiche Luftatmosphäre in Zone 1 bis 3 nicht - wie erwartet - nach Zone 4 aus, vielmehr traten Rückmischeffekte auf. Das Auftreten von Nebeltröpfchen kann für den Kuppelraum (Teil von Zone 4) durch EIR-Fotometer- und LAF-Kalorimetermessungen nachgewiesen werden, für die Innenräume liegen dagegen dazu keine gesicherte Meßergebnisse vor.

Phase 4 - Aerosolabbau, Teil 3 (Dauer 17,4h):

Nach Wiederaufnahme der Dampfzufuhr steigt der Containmentdruck während der Phase 3.4 bis auf 3,0 bar an und wird während der Phase 4 über einen Dampfmenge­regler auf diesem Wert konstant gehalten.

### **Zusammenfassende Übersicht:**

Die Versuchsabläufe des "stationären" Einraum-Versuchs A8 und des "instationären" Mehrraum-Versuchs A9 sind in Bild 3.2.1 und Tabelle 3.2.2 in der bereits vom DEMONA-Jahresbericht 1985 bekannten Form zusammengefaßt. Weitere Einzelheiten sind in den Battelle-Versuchsberichten dokumentiert.

### **3.3 Thermodynamische Messungen**

Pro Versuch liegen Meßkurven von rund 80 thermodynamischen Meßsystemen für die Meßgrößen Durchsatz, Druck, Temperatur, rel. Feuchte, Sumpfwasserstand, Leckrate, Wärmestrom und Wärmeübergangszahl vor. Diese Meßdaten sind im einzelnen in den Battelle-Versuchsberichten in Plotform dargestellt

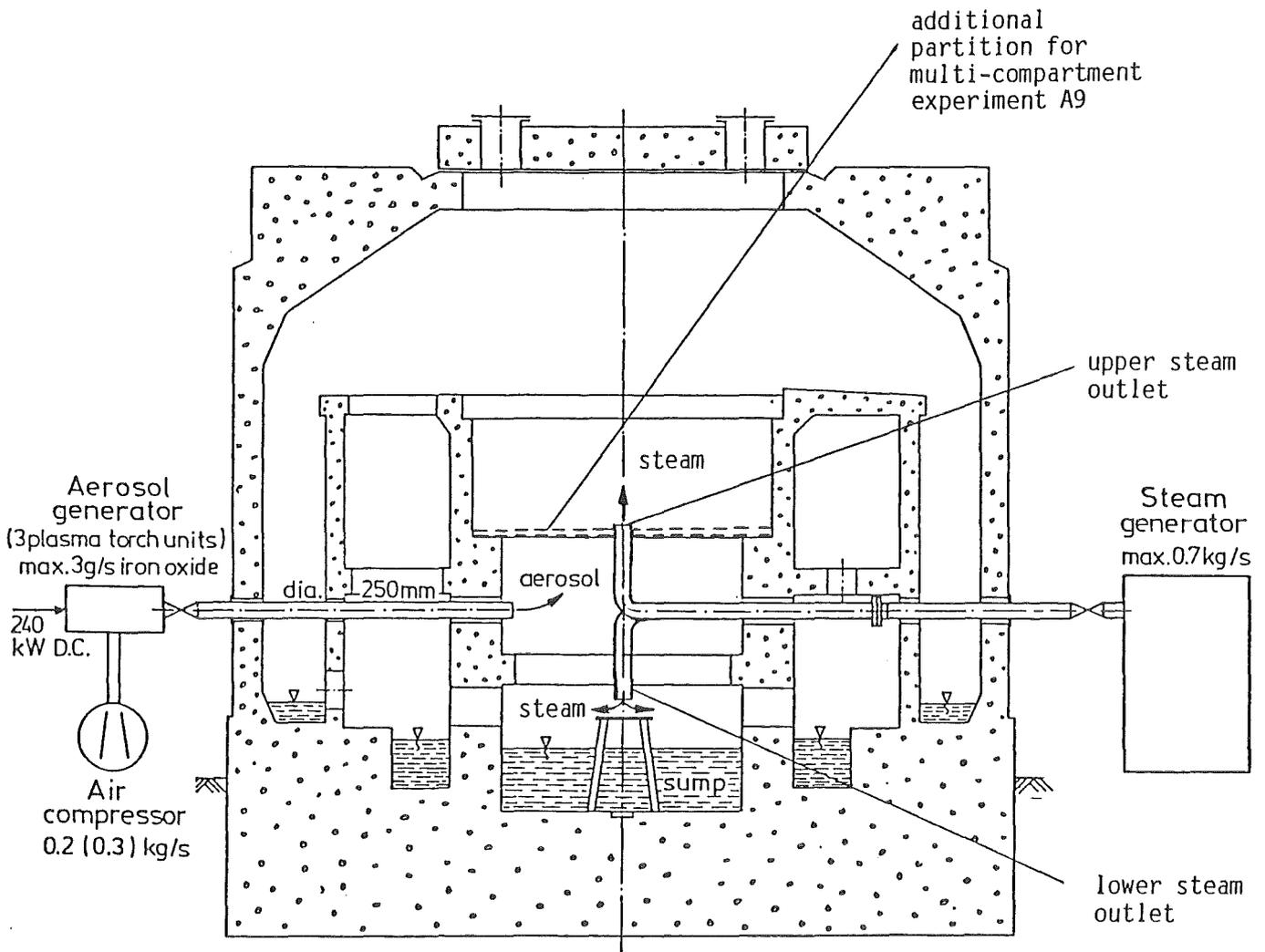
und ausführlich kommentiert. Außerdem sind die Meßdaten auch über das PHDR-ZAW-Datensystem verfügbar. Weitere thermodynamische Daten (insbes. zur Nebelbildung) ergeben sich aus den EIR-Fotometer- und KfK-Kalorimeter-Messungen.

Während sich die Ergebnisse der thermodynamischen Messungen beim Versuch A8 im Rahmen derjenigen aus den vorhergehenden Quasi-Einraum-Versuchen bewegen, brachte der Mehrraum-Versuch A9 eine deutliche Erweiterung des Kenntnisstands.

Bild 3.3.1 und 3.3.2 geben einen Überblick über die beim Versuch A9 beobachteten thermodynamischen und Verteilungsvorgänge. Zusammenfassend kann man zum Mehrraum-Versuch A9 feststellen:

- Die Strömungs- und Verteilungsvorgänge in der Mehrraum-Geometrie sind generell viel komplexer als bei den früheren Quasi-Einraum-Versuchen, da die inneren Containmentwände konzentrationsausgleichende Konvektionsströmungen stark behindern.
- Die Dampf-Luft-Zusammensetzung und die Aerosolkonzentration sind in den verschiedenen Containmentzonen in der Regel uneinheitlich. Zwischen benachbarten Zonen können jedoch auch ausgleichende Konvektionsströmungen auftreten und eine mehrere Zonen umfassende Homogenisierung herbeiführen (Beispiel: Innenraum-Zonen während der Versuchsphase 3.3 sowie - mit Einschränkungen - 3.4 und 4). Andererseits können aber auch innerhalb großer Zonen beträchtliche Stratifikationseffekte auftreten (Beispiel: Außen-Zone 4).

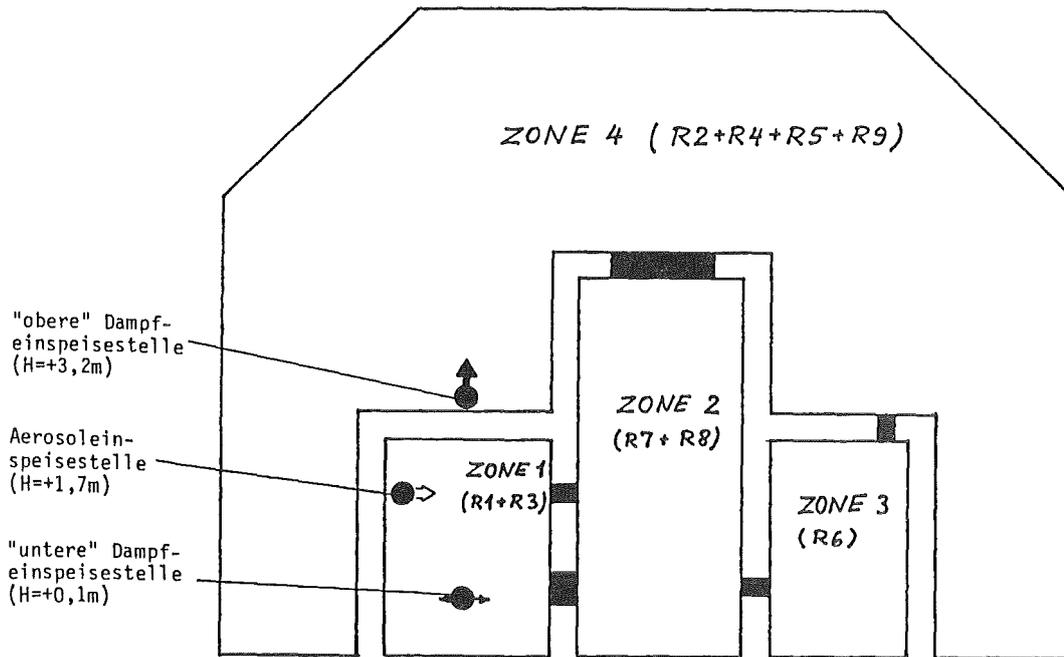
- Im unten geschlossenen Ringraum zwischen Trümmerschutzzylinder und Außenhülle bewirken diffusiophoretische Effekte eine starke Anreicherung nichtkondensierbarer Gase (Luft, Methan-Tracer, ähnliches gilt auch für Wasserstoff).
  
- Die zonenweise unterschiedliche Dampf-Luft-Verteilung führt auch dazu, daß Nebelbildung nicht gleichmäßig, sondern eher zonenweise auftritt. Außerdem wurde beobachtet, daß die Nebelbildung im Mehrraumversuch in anderen Zeitbereichen (z.B. auch in der vermeintlich "trockenen" Versuchsphase 3.3) auftreten kann als bei Quasi-Einraum-Versuchen (z.B. Versuch B6) mit vergleichbarem Zeitablauf und vergleichbaren zugeführten Massen- und Energieströmen.  
Dies bedeutet: In Ein- und Mehrraumcontainments können bei gleichen äußeren Randbedingungen unterschiedliche thermodynamische Vorgänge (z.B. Nebelbildung / keine Nebelbildung) auftreten, die dann auch unterschiedliche Auswirkungen auf das Aerosolverhalten haben. Entsprechende Divergenzen sind auch zu erwarten, wenn Einraum-Rechenmodelle auf eine Mehrraum-Situation angewendet werden.



Model containment :

outer diameter		12.1 m
total volume		640 m <sup>3</sup>
pool surface areas	28 m <sup>2</sup>	} total 1056 m <sup>2</sup>
other horiz. ground surface areas	145 m <sup>2</sup>	
ceiling surface areas	165 m <sup>2</sup>	
vertical wall surface areas	718 m	
operational abs. pressure		3 bar
average temperature of cont. atm.		115 °C
maximum aerosol concentration		12 g/m <sup>3</sup>

Abb. 3.1.1: DEMONA-Versuchsanlage



RAUMVOLUMINA (1/112 Biblis B)

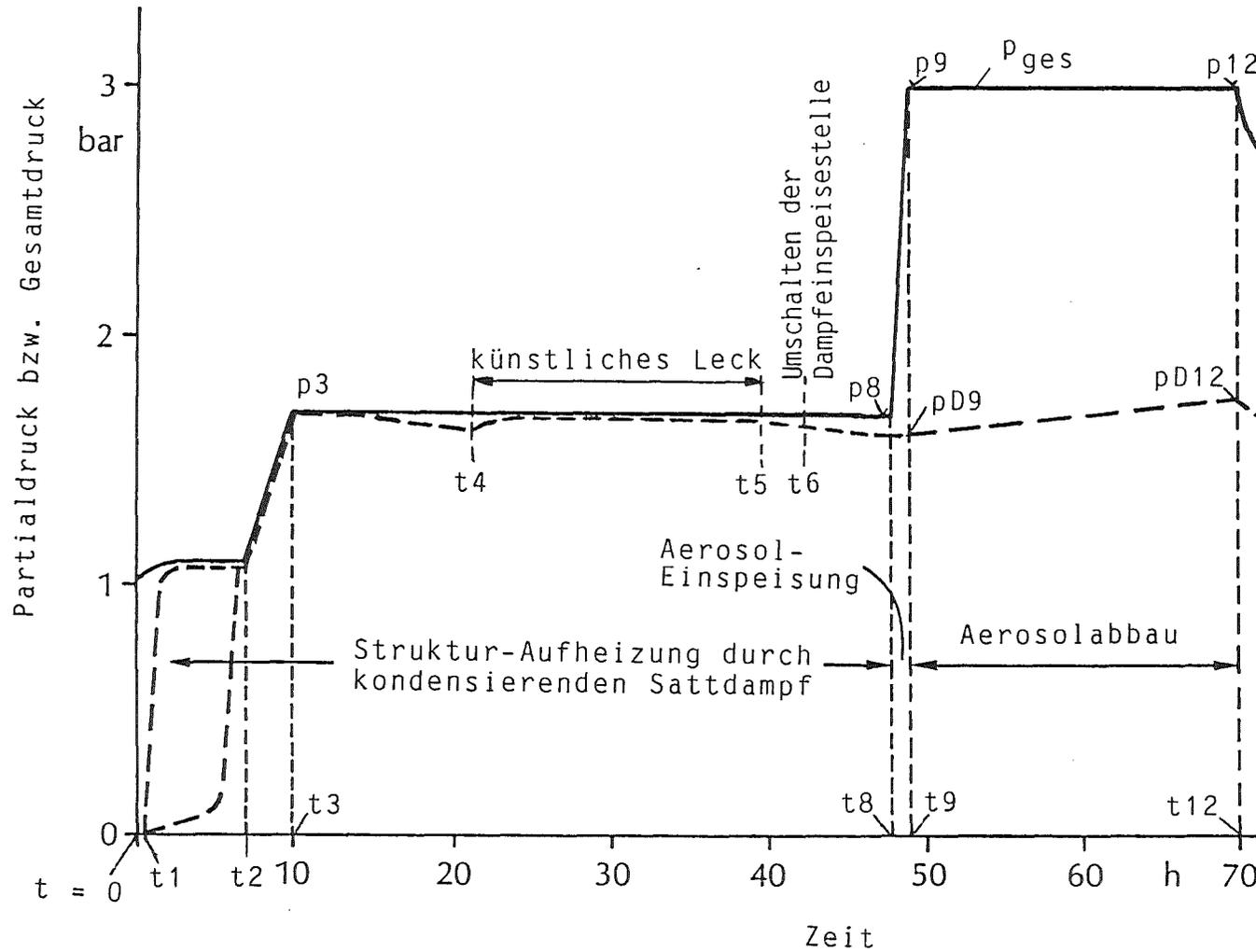
Zone	simulierte Raum-gruppe in Biblis B	Volumen m <sup>3</sup>		Raum-Nr. im BMC
		Biblis B	1/112 Biblis B	
1	Reaktorgrube + DE-Räume unten	4830	43	R1, R3
2	DE-Räume Mitte + oben	8376	75	R8, R7
3	Nebenräume	5745	51	R6
4	Kuppel	53000	471	R9, R2, R4, R5
Summe:		71951	640	640

ÜBERSTRÖMQUERSCHNITTE:

Zonen	Überströmflächen m <sup>2</sup>			Üö-Nr. im BMC
	Biblis B	1/112 Biblis B	BMC	
1-2	100	0,89	0,89	Ü38 B, C, Einstieg
2-4	203	1,81	1,81	Ü79 A, Ü79 B teilw.
2-3	30	0,27	0,28	Ü68
3-4	38	0,34	0,33	Ü59 B teilw.

Abb. 3.1.2: Schema der Mehrraum-Geometrie beim DEMONA-Versuch A9 und Bezug zu den Verhältnissen bei Biblis B

"Stationäre" Fahrweise



Variation:  
"Transiente" Fahrweise

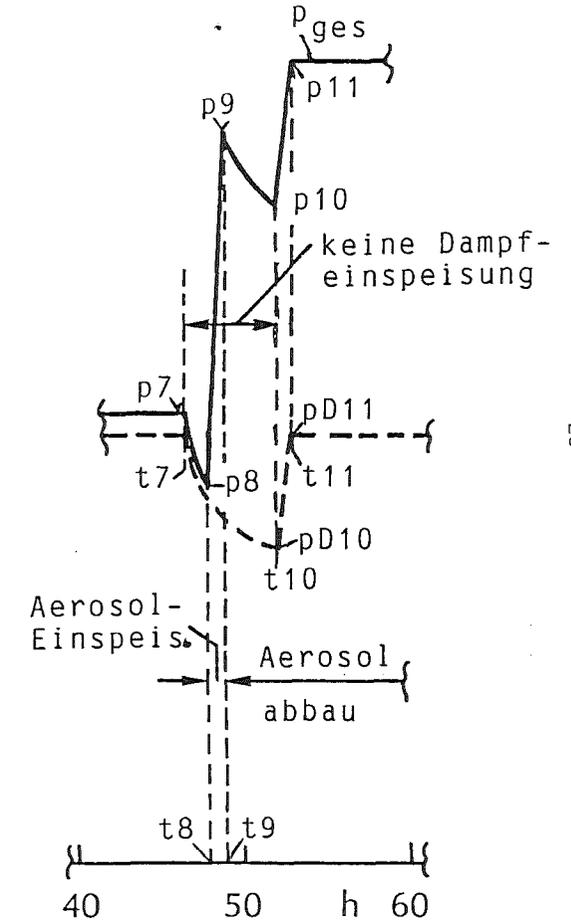


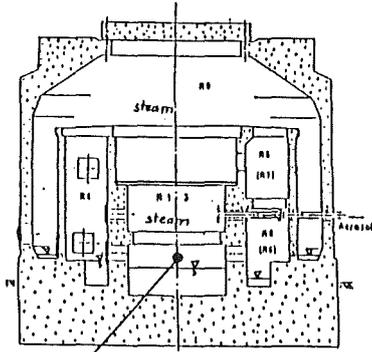
Abb. 3.2.1: DEMONA-Versuchsablauf bei "stationärer" und "transienter" Fahrweise der Anlage (Zahlenwerte siehe Tabelle 3.2.2)

Versuch Nr.	A8 (V55)	A9 (V56)
Versuchsbeginn Datum (t = 0) Uhrzeit	10.03.86 15.00	12.05.86 15.15
Phase 1 (Luftausspülen) Beginn t1 h	0,6	0,1
Phase 2 (Aufheizen) Beginn t2 h t3 h p3 bar künstl. Leck Beginn t4 h Ende t5 h Umschalten D'einsp.o/u t6 h	7,5 10,0 1,7 - - 41,6	5,5 7,2 1,68 26,4   43,0 29,4   44,3 18,3
Phase 3 (transiente bzw. Aerosoleinsp.-Phase) Stopp Dampf einspeis. t7 h p7 bar pD7 bar ca. Start Aerosoleinspeis. Datum Uhrzeit t8 h p8 bar pD8 bar ca. Ende Aerosoleinspeis. t9 h p9 bar pD9 bar ca. Start Dampf einspeis. t10 h p10 bar pD10 bar ca.	- - - 12.03.86 16.15   17.52 49,3   50,9 1,68   2,18 1,6   1,57 49,8   51,6 2,20   3,0 1,6-   1,6 2,05+ - - -	46,5 1,68 1,45-1,64+ 14.05.86 14.32 47,3 1,49 1,17-1,45+ 48,5 2,80 0,7-2,55+ 52,3 2,42 0,8-1,17+
Phase 4 (station. Aerosol- abbau) Beginn t11 h p11 bar pD11 bar ca. Ende t12 h p12 bar pD12 bar ca.	51,6 3,0 1,6 71,3 3,0 1,97	53,2 2,97 0,85-1,94+ 70,6 2,96 0,81-2,72+

+ inhomogen

Tabelle 3.2.2: Versuchsablauf A8 und A9, siehe Abb. 3.1.2

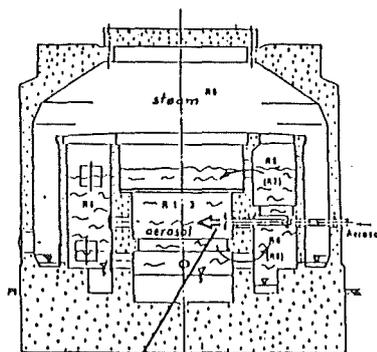
t = 47 h



steam injection stopped at t = 46.5 h

- p=ca. 1.6 bar, slowly decreasing
- inner zones and dome: steam atmosphere
- annulus: stratified steam-air atmosphere (air enrichment by steam condensation at outer wall)

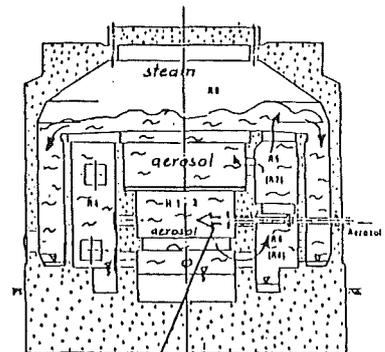
t = 47.6 h



injection of airborne aerosol ( t = 47.4-48.4 h)

- p=ca. 1.8 bar, increasing
- inner zones: filled up by airborne aerosols, steam displaced to dome
- dome: steam atmosphere
- annulus: stratified steam-air atmosphere

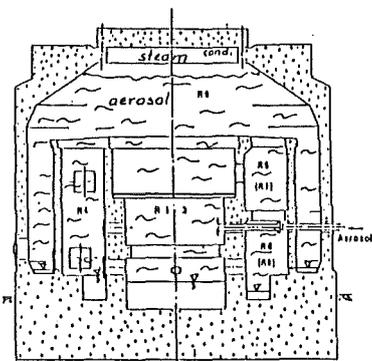
t = 48.2 h



continuing injection of airborne aerosol

- p= 2.5 bar, increasing (max. = 2.8 bar)
- inner zones: air-aerosol atmosphere ( ca. 7g/m<sup>3</sup> a. conc.), intensive aerosol removal
- lower dome and annulus: formation of steam-air-aerosol atmosphere, aerosol removal
- upper dome: pure-steam atmosphere, intensive wall condensation,

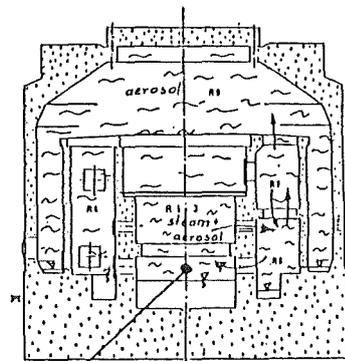
t = 50 h



aerosol and steam injection stopped

- p= 2.6 bar, slowly decreasing
- inner zones: "dry" air-aerosol atmosphere, aerosol removal.
- lower dome and annulus: slightly stratified steam-air-aer. atmosphere, close to saturation or oversaturated (possibly fog formation in dome)
- upper dome: residual steam zone, decreasing because of intensive condensation at structures

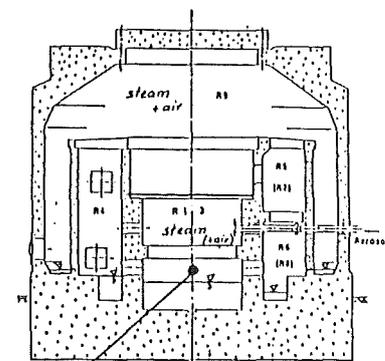
t = 53 h



steam injection, re-started at t = 52.3 h

- p= 2.9 bar, increasing
- inner zones: formation of steam-air-aerosol atmosphere, probably fog formation, intensive aerosol removal
- dome and annulus: stratified steam-air-aerosol atmosphere, air and aerosol supply from inner zones, fog formation, intensive aerosol removal

t = 65 h



continuous steam injection

- p= 3.0 bar, constant
- inner zones and dome: steam-air atmosphere with increasing steam content
- annulus: stratified steam-air-aerosol atmosphere with high air content, aerosol removal

Abb. 3.3.1: Mehrraum-Versuch A9 (= V56): zeitlicher Ablauf der Vorgänge in den verschiedenen Containment-zonen während Aerosoleinspeisung und -abbau

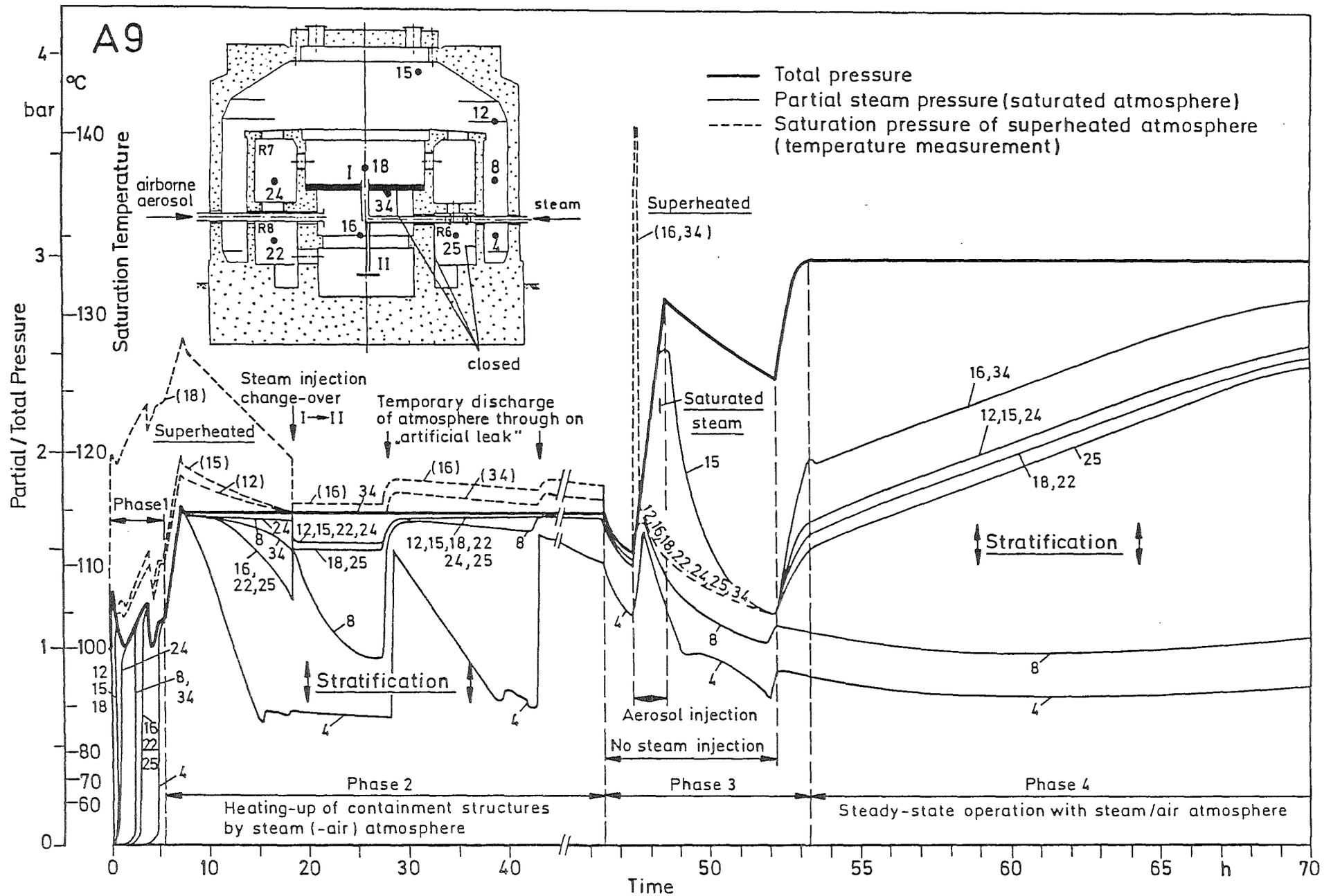
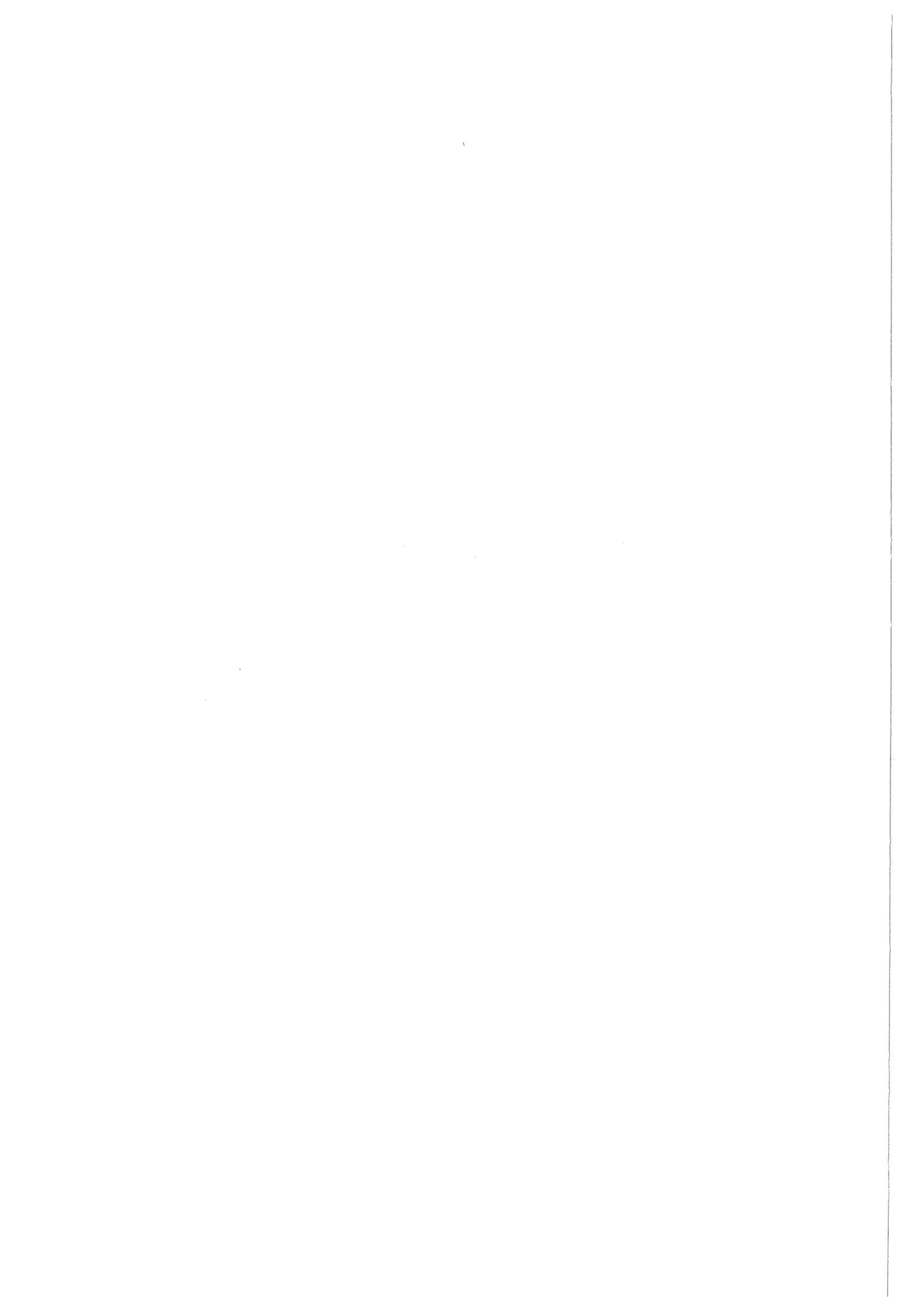


Abb. 3.3.2: Mehrraum-Versuch A9 (= V56): Gemessener Druck- und Sättigungsdampfdruck-Verlauf. (Die Sättigungsdampfdrücke wurden über Temperaturmessungen ermittelt. Bei gesättigter Atmosphäre - durchgezogene dünne Linien - ist der Sättigungsdampfdruck gleich dem Dampfpartialdruck)



#### 4 Aerosolerzeugung

Es wurden folgende Versuche am Versuchscontainment des Battelle Instituts Frankfurt/Main durchgeführt:

- V54 Versuch zur Erzeugung von Zinnoxid-Aerosol unter den Bedingungen der Erzeugung von Misch-aerosol. Überprüfung der Funktionsweise der für Metallpulver weiterentwickelten Einspeisesonde.

Versuchsergebnis: Ein sicherer Betrieb der Generatoren mit Zinnpulver wurde bestätigt. Es wurde eine Einspeisezeit von 60 min erzielt, ohne daß eine Unterbrechung der Pulverzufuhr eintrat. Nach dem Abschalten des Aerosolgenerators war ein erneuter Start problemlos möglich. Die Aerosolerzeugung wurde für weitere 30 min mit Erfolg fortgesetzt.

- V55 Hauptversuch der Versuchsmatrix A8. Einspeisung von Misch-aerosol. Zwei Generatoren wurden mit Eisenpentacarbonyl zur Erzeugung von Eisenoxidaerosol, ein Brenner mit Zinnpulver zur Erzeugung von Zinnoxidaerosol betrieben. Die Aerosolerzeugung erfolgte in zwei Phasen. Die Einspeisezeiten und die Menge der zugeführten Ausgangsstoffe sind in Tabelle 1 angegeben.

- V56 Hauptversuch der Versuchsmatrix A9. Einspeisung von Misch-aerosol in das Modellcontainment mit Mehrraumgeometrie. Konfiguration und Betriebsweise der Aerosolgeneratoren wie bei Versuch V55. Die Einspeisezeiten und die Mengen der eingespeisten Ausgangssubstanzen sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Der Aufbau der Aerosolgeneratoren, ihre Betriebsweise und Leistungsdaten werden an anderer Stelle berichtet /1/ und /2/.

Mit A9 wurde der experimentelle Teil des DEMONA-Programmes erfolgreich beendet.

#### Literatur:

- [1] T.F.Kanzleiter, Th.Schröder, H.Ruhmann, M.Peehs  
DEMONA experiments - Results from aerosol generation  
and long term thermal-hydraulics  
Transactions of the 4th International ENS/ANS Conference,  
Genf, 1.-6. 6. 1986, Vol.3, S. 443-448
- [2] H.Ruhmann, M.Peehs  
A high efficiency aerosol generator for DEMONA  
Aerosols - Formation and reactivity, Proceedings of the Second  
International Aerosol Conference, Berlin, September 22-26, 1986  
Pergamon Oxford, 1986, S. 1070-1073

Aerosol-Generator-Daten

Versuch A8 (V55)

Einspeisematerial: Eisenpentacarbonyl : Brenner 2 + 3  
Zinn Ecka AS 51/011 : Brenner 1

Einspeisezeiten: 12.03.86

1. Start

Brenner 2 : 16.30 - 16.41 11 min

Brenner 3 : 16.21 - 16.30 9 min

2. Start:

Brenner 1 : 18.03 - 18.27 24 min

Brenner 2 : 18.02 - 18.27 25 min

Brenner 3 : 17.56 - 18.10 14 min

Eingespeiste Masse : (Start 1 + 2)

Brenner 1 : 1885 g Sn

Brenner 2 : 7270 g Fe(CO)<sub>5</sub>

Brenner 3 : 4320 g Fe(CO)<sub>5</sub>

mittlere Aerosol-  
erzeugungsraten:

Brenner 3+2 : 80,5 g/min Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (100 % Ausb.)

Brenner 1 : 80 g/min SnO<sub>2</sub> ( 80 % Ausb.)

---

Tabelle 1 : Aerosol-Generator-Daten  
Versuch A8 (V55)

Aerosol-Generator-Daten

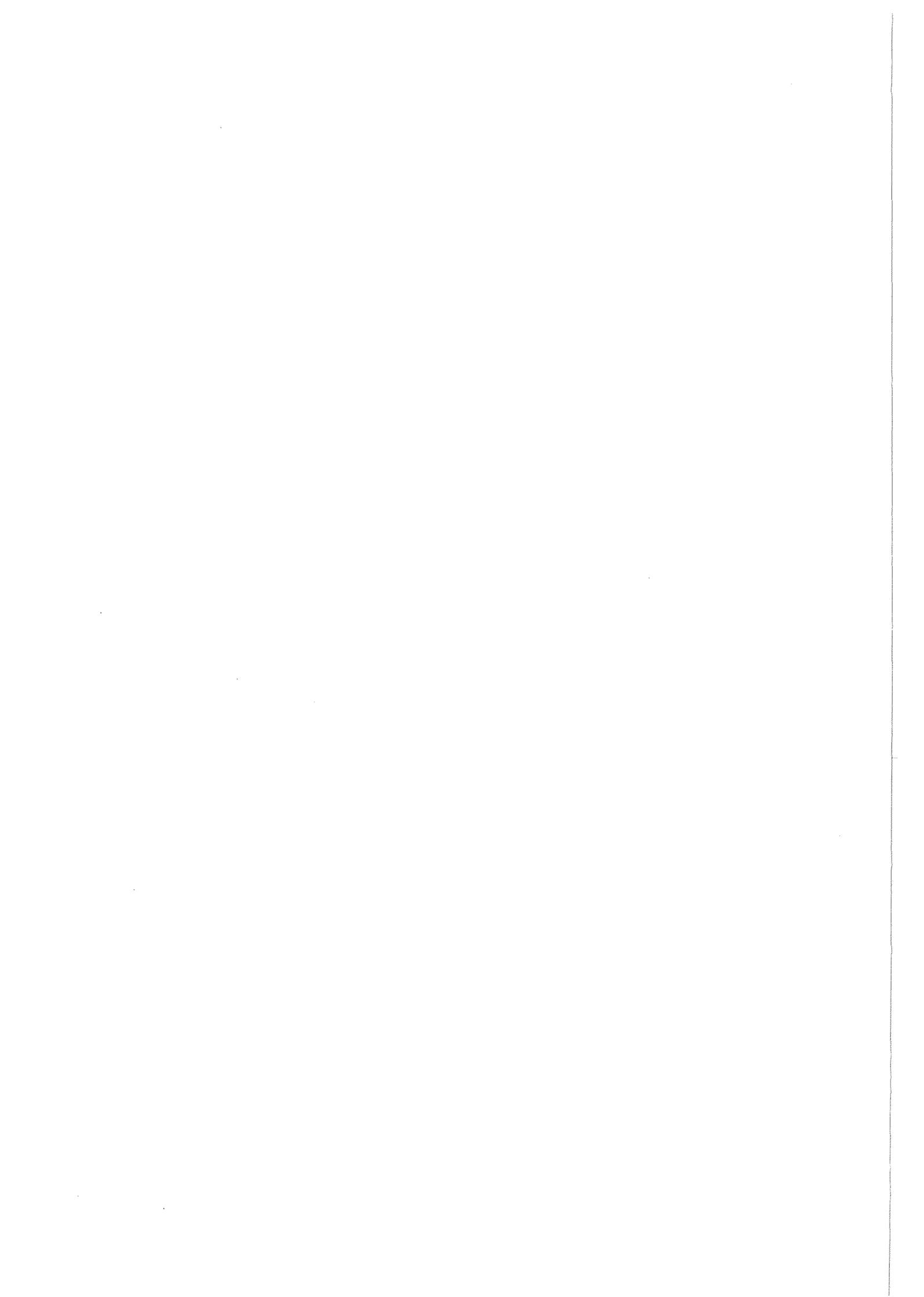
Versuch A9 (V56)

Einspeisematerial :	Brenner 1	Zinn Ecka AS 51/011
	Brenner 2+3	Eisenpentacarbonyl
Einspeisezeiten :	14.05.86	
	Brenner 1	14.45 - 15.37 52 min <sup>2)</sup>
	Brenner 2	14.43 - 15.20 37 min <sup>1)</sup>
	Brenner 3	14.39 - 15.04 25 min
Eingespeiste Masse :	Brenner 1	3921 g Zinn
	Brenner 2	15,6 kg Carbonyl
	Brenner 3	4,2 kg Carbonyl

mittlere Aerosolerzeugungsraten:

Brenner 1	96 g SnO <sub>2</sub> /min (80 % Ausb.)
Brenner 2	156 g Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /min (90 % Ausb.)
Brenner 3	62 g Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /min (90 % Ausb.)

- 1) Carbonylvorrat verbraucht
- 2) Containmentdruck von 3 bar erreicht



## 5. Aerosolmessungen

### 5.1. Aerosolmesstechnik EIR:

Die Aerosolmesstechnik wurde für die zwei im Berichtsjahr durchgeführten Versuche unverändert beibehalten. Änderungen wurden lediglich in der Positionierung einzelner Instrumente durchgeführt, soweit es die speziellen Versuchsziele erforderten.

### 5.2. Messresultate EIR

#### 5.2.1. DEMONA-Versuch V55

Dieser Versuch wurde wieder mit denselben thermodynamischen Bedingungen wie V34 und V53 durchgeführt. Als Modellaerosol wurde ein aus  $\text{SnO}_2$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bestehendes Misch-aerosol verwendet. Dabei wurde mit einem Plasmabrenner  $\text{SnO}_2$ -Aerosol erzeugt, in zwei weiteren Plasmabrennern wurde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosol hergestellt. Technische Schwierigkeiten beim Betrieb der Plasmabrenner bedingten einen zweimaligen Start der Aerosolerzeugung: eine erste, ca. 10 Min dauernde Phase mit zwei Plasmabrennern und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosolproduktion, gefolgt von einer Aerosolabbauphase von ca. 140 Min. Dann eine zweite Aerosolerzeugungsphase von ca. 25 Min., während der sowohl  $\text{SnO}_2$  als auch  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosol in das Containment eingespeist wurde. Die gemessenen Aerosolkonzentrationen auf Abbildung 5.2.1 zeigen deutlich die Betriebsweise der Generatoren. Das erste Konzentrationsmaximum liegt bei  $2.5 \text{ g/m}^3$ , das zweite bei  $4.9 \text{ g/m}^3$ . Dazwischen erfolgt Aerosolabbau bis auf ca.  $0.1 \text{ g/m}^3$ . Der nach dem zweiten Aerosolmaximum einsetzende Aerosolabbau erfolgt, wie erwartet, wie bei V34 resp. V53 und ca. 6 h nach dem zweiten Maximum ist die Aerosolkonzentration unter  $10^{-3} \text{ g/m}^3$  gesunken.

Anhand der zeitlichen Verläufe der Extinktionskoeffizienten  $k$  der Fotometer III auf Kotenhöhe 3.6 m und Fotometer I auf Kotenhöhe 7.4 m ist auf Abbildung 5.2.2 zu erkennen (vergl. auch Abb. 5.2.3. bezüglich Fotometerpositionen), dass sich aus der ersten Aerosolerzeugungsphase eine Aerosolwolke vom Zentralraum des Modellcontainments ausbreitete, das tiefergelegene Fotometer III 20 Min nach Start der Lufteinspeisung erreichte, während sie im oberen Containmentplenum bei Fotometer I erst nach 36 Min angelangt war.

Beim zweiten Start der Aerosolerzeugung wurde mit dem zusätzlichen Betrieb des  $\text{SnO}_2$ -Generators wesentlich mehr Energie in das Containment eingetragen, sodass die zweite Aerosolwolke bereits nach 8 Minuten bei Fotometer III und nach 10 Min bei Fotometer I angelangt ist und nach etwa 20 Min vor Ende der zweiten Einspeisephase bereits homogene Durchmischung erreicht war.

Abbildung 5.2.4 zeigt noch den Extinktionsverlauf für Fotometer VI in R7 ( $z = 3.2 \text{ m}$ ) nahe der Filterstation 3 für die gesamte Registrierzeit von etwa 22 Stunden. Neun Minuten vor Ende der zweiten Einspeisephase ergab eine  $\beta$ -Absorptionsmessung die Konzentration  $5.6 \text{ g/m}^3$ , während gleichzeitig Fotometer VI  $k = 4.9 \text{ m}^{-1}$  registrierte. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt schon guten Homogenität kann also der Wert  $c/k = 1.1 \text{ g/m}^2$  als Mass für die optische Absorptivität angegeben werden. Etwa 50 Min. nach Ende der ersten, aber schon 20 Min nach Ende der zweiten Einspeiseperiode erkennt man das Einsetzen von Volumenkondensation des Dampfes an den starken Signalfluktuationen und der stark verzögerten Extinktionsabnahme. Die beiden Konzentrationsmessungen der Filterstation 3 um 19.02 h und 19.30 h im Bereich des zweiten Nebelpeaks mit  $c = 0.71$  bzw.  $0.79 \text{ g/m}^3$  zeigten denn auch mit  $c/k$ -Werten um  $0.4 \text{ g/m}^3$  dominierenden Wassertröpfchenanteil des Aerosols an. Die ab etwa 9 Stunden nach der ersten Einspeisung praktisch konstante Extinktion von  $0.35 \text{ m}^{-1}$  ist denn auch vom Calorimeter 2 gemessenen Wassertröpfchen zuzuschreiben.

Teilchengrößenverteilungen sind zu vier Zeitpunkten vorhanden, nämlich um 17.20 h und 19.20 h durch Auswertung von Andersen-Impaktoren, sowie um 21.00 h und 22.20 h durch Auszählung von Filtern. Die Ergebnisse sind auf den Abbildungen 5.2.5, 5.2.6, 5.2.7 und 5.2.8 zusammengefasst. Zu beachten ist, dass die mit den Impaktoren gemessene Größenverteilung und die durch Filterauswertung gewonnene nicht direkt vergleichbar sind. Die Impaktoren liefern einen unter Annahme einer Teilchendichte  $g = 4 \text{ g/cm}^3$  gebildeten MMD, während aus den Filterauswertungen ein CMD unter Annahme eines Formfaktors  $S = 1$  gewonnen wird.

Auf der Abbildung 5.2.9 sind zwei REM-Aufnahmen gezeigt. Links sind Aerosole nach dem ersten Brennerstart, d.h.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Aerosole, rechts nach dem zweiten Start, d.h.  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ -Aerosole gezeigt.

### 5.2.2 DEMONA-Versuch V56

Dieser den Abschluss der DEMONA-Testmatrix bildende Versuch hat zum Ziel, den Abbau eines Misch-aerosols (zwei Komponenten:  $\text{SnO}_2$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in einem in mehrere Räume unterteilten Containment zu messen. Dazu wurden im wesentlichen der zentrale Raum sowie drei weitere Räume isoliert und durch definierte Überströmquerschnitte miteinander verbunden. Die so erhaltene Raumaufteilung ist auf Abbildung 5.2.10 dargestellt. Die Aerosolinstrumentierung wurde entsprechend den geänderten Raumverhältnissen umgebaut. Insbesondere wurde Filterstation 4 in die Zone 1 versetzt und die Ansaugleitungen für Filterstation 2 wurden so geändert, dass damit ebenfalls Aerosolkonzentrationen in Zone 1 gemessen werden konnten.

Die thermodynamischen Bedingungen dieses Versuchs wurden gegenüber den vorangegangenen ebenfalls modifiziert. Die durch die Aerosolerzeugung bedingte Austrocknung bis auf eine relative Feuchte von ca. 80 % wurde während ca. 3.5 h aufrechterhalten und erst dann wurde durch Wiederaufnahme der Dampfzufuhr Sättigung erreicht. Der gemessene Aerosolabbau ist auf Abbildung 5.2.11 gezeigt und entspricht im wesentlichen dem auch bei früheren Versuchen beobachteten Verhalten: relativ langsamer Aerosolabbau in der "trockenen Phase", schneller Abbau bei gesättigter Atmosphäre. Die maximale Aerosolkonzentration ist ca.  $7 \text{ g/m}^3$ , die nach ca. 5 h in der "trockenen" Versuchsphase auf ca.  $0.1 \text{ g/m}^3$  abnimmt. Dann tritt durch Wiederaufnahme der Dampfeinspeisung in das Containment Wasserkondensation an Aerosolpartikeln auf und die Aerosolkonzentration sinkt innerhalb von weiteren 2 Stunden unter  $10^{-3} \text{ g/m}^3$ .

Die Fotometer geben die beste Information über die räumliche Verteilung der Aerosole, wobei der feste vom flüssigen Anteil allerdings nur bedingt unterscheidbar ist. Die Anordnung der 10 eingebauten Fotometer - wovon 3 in Zone 1 und 5 in der Zone 4 sind - ist in Abbildung 5.2.12 gezeigt.

Die zeitlichen Verläufe der Aerosolkonzentrationen in den einzelnen Zonen des Containments sind bei diesem Mehrraumversuch komplizierter als bei den früheren Versuchen. Nach erreichtem Extinktionsmaxima sind die Hochkonzentrationsräume der Zonen 1, 2 und 3 mit den grössten je in DEMONA-Versuchen registrierten Werten von  $17 - 34 \text{ m}^{-1}$  in Zone 1 von den wesentlich niedrigeren Maxima der Zone 4 mit Werten von  $1.5 - 5 \text{ m}^{-1}$  sehr deutlich zu unterscheiden.

Die Abbildungen 5.2.13 - 5.2.15 illustrieren das raumzeitliche Verhalten der Aerosolkonzentrationen ab Ende Dampfeinspeisung (Zeitmarke 4) anhand der Absorptionssignale von Fotometer IV in Zone 1 (nur 2.4 m vom Aerosol-Einspeiserohr entfernt), von Fotometer VI in Zone 2 sowie in Zone 4 der Fotometer II auf Höhe  $z = 5.9 \text{ m}$  und Fotometer I mit  $z = 7.4 \text{ m}$ , wenig unter dem Kuppeldach. Dies zeigt sich in der Reihenfolge der Ankunftszeiten der Aerosolwolke, gegeben durch die Zeitdifferenzen 10, 16, 38 und 66 Minuten zwischen Start Lufteinspeisung (Zeitmarke 5) und den Anstiegsflanken von  $k$  (siehe auf jeder Abbildung die Einschübe  $\log(k(t))$ ), jeweils für die Fotometer IV, VI, II und I.

Die Verzögerung bei Fotometer I beträgt also 56 Min gegenüber Fotometer IV. Die entsprechenden Maxima der Extinktion für den  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ -Aerosolanteil von resp.  $k = 17, 11; 1.5$  und  $2.0 \text{ m}^{-1}$  finden sich nach 25, 30 bzw. 73 Min nach Start Lufteinspeisung. Man sieht also auch, wie sich die Aerosolwolke von Zone 1 über 2 nach 4 bewegt und sich dort verteilt.

Die Dampfeinspeisung wurde 0.8 h vor dem Start der Lufteinspeisung gestoppt (Zeitmarke 4). Das nur ca. 0.7 m von Dampfrohrende entfernte Fotometer IV zeigt daraufhin einen markanten Extinktionsabfall von ca.  $0.6 \text{ m}^{-1}$  bis zum Start des Aerosolgenerators 3, was auf das Verdampfen der hier bis (Zeitmarke 4) offenbar erheblichen Wassertröpfchenkonzentrationen zurückzuführen ist. Das Fotometer VI zeigt noch einen Abfall von etwa  $0.15 \text{ m}^{-1}$  und bei Fotometer II ist er nur mehr angedeutet.

Die Aerosolkonzentration in Zone 1 war gegen Ende der Aerosoleinspeisung so hoch, dass sich Aerosolkoagulat-Bärte an den optischen Blenden bildeten und damit zu massiven Messfehlern führten. Für die Fotometer IV und VI kann abgeschätzt werden, dass die wahre, rasch abnehmende Absorption zwischen Zeitmarken 6 und 7 sich in dem schraffierten Gebiet der Abbildung 5.2.13 befand.

Nach erneuter Dampfeinspeisung (Zeitmarke 7) wird das restliche Misch-aerosol rasch aus den Zonen 1 und 2 ausgeschoben und damit verschwanden aus dem nahe am Dampfaustritt befindlichen Fotometer IV auch der Grossteil der Bärte. Bei Fotometer VI fällt ein etwa 36 % Absorptions-äquivalenter Anteil der Bärte erst nach der Druckentlastung ( $t_v = 91.4 \text{ h}$ ) ab und der restliche Anteil von ca. 27 % konnte nach Versuchsende bei der Inspektion in situ registriert werden. Dementsprechend ist der damit abgeschätzte Bereich des Absorptionsverlaufes in Abbildung 5.2.14 eingezeichnet.

Die Dampfnachspeisung bewirkt in der Zone 4 mit etwa 1 h Verzögerung ein weiteres, kleineres Absorptionsmaximum von  $k = 0.8 \text{ m}^{-1}$  bei Fotometer II und ca.  $0.6 \text{ m}^{-1}$  bei Fotometer I (siehe Abbildung 5.2.15).

Schliesslich zeigt Fotometer IV etwa 8 h nach Start und bis zum Ende der Dampfeinspeisung während etwa 10 h massiv zunehmende Absorption auf  $k = 1.7 \text{ m}^{-1}$ . Dieses Signal deutet auf Nebel hin, der dann nach 1 h wieder verdampft ist. Etwa gleichzeitig mit Fotometer IV ist auch für Fotometer VI ein Wiederanstieg der Absorption zu sehen, der aber nur etwa 7 h andauert. Etwa 3 h verzögert gegenüber Fotometer IV und stark abgeschwächt, aber mit starken Absorptions-Fluktuationen ist übrigens diese Nebelabsorption auch vom hier nicht gezeigten Fotometer V registriert worden.

Aerosolgrössenverteilungen sind aus zwei Andersen Impaktoren vorhanden und auf Abbildungen 5.2.16 und 5.2.17 gezeigt. Weiters wurden mit dem APAC-Teilchengrössenanalysator über die Nebenkesselstrecke Grössenverteilungen zu vier verschiedenen Zeitpunkten gemessen, die in Abbildung 5.2.18 wiedergegeben wurden. Bei diesen Versuchen ist es nicht gelungen, Filter geeignet zu beladen, welche für Teilchengrössenverteilungen brauchbar wären.

Auf Abbildung 5.2.19 sind zwei REM-Fotos, je eines in der trockenen bzw. gesättigten Versuchsphase aufgenommen, gezeigt. Es fällt bei Vergleich dieser Fotos auf, dass die so typischen nahezu kugelförmigen Agglomerate, wie sie sonst bei gesättigter Containmentatmosphäre beobachtet wurden, hier nicht gesehen werden konnten. Eine Erklärung für dieses abweichende Verhalten steht noch aus.

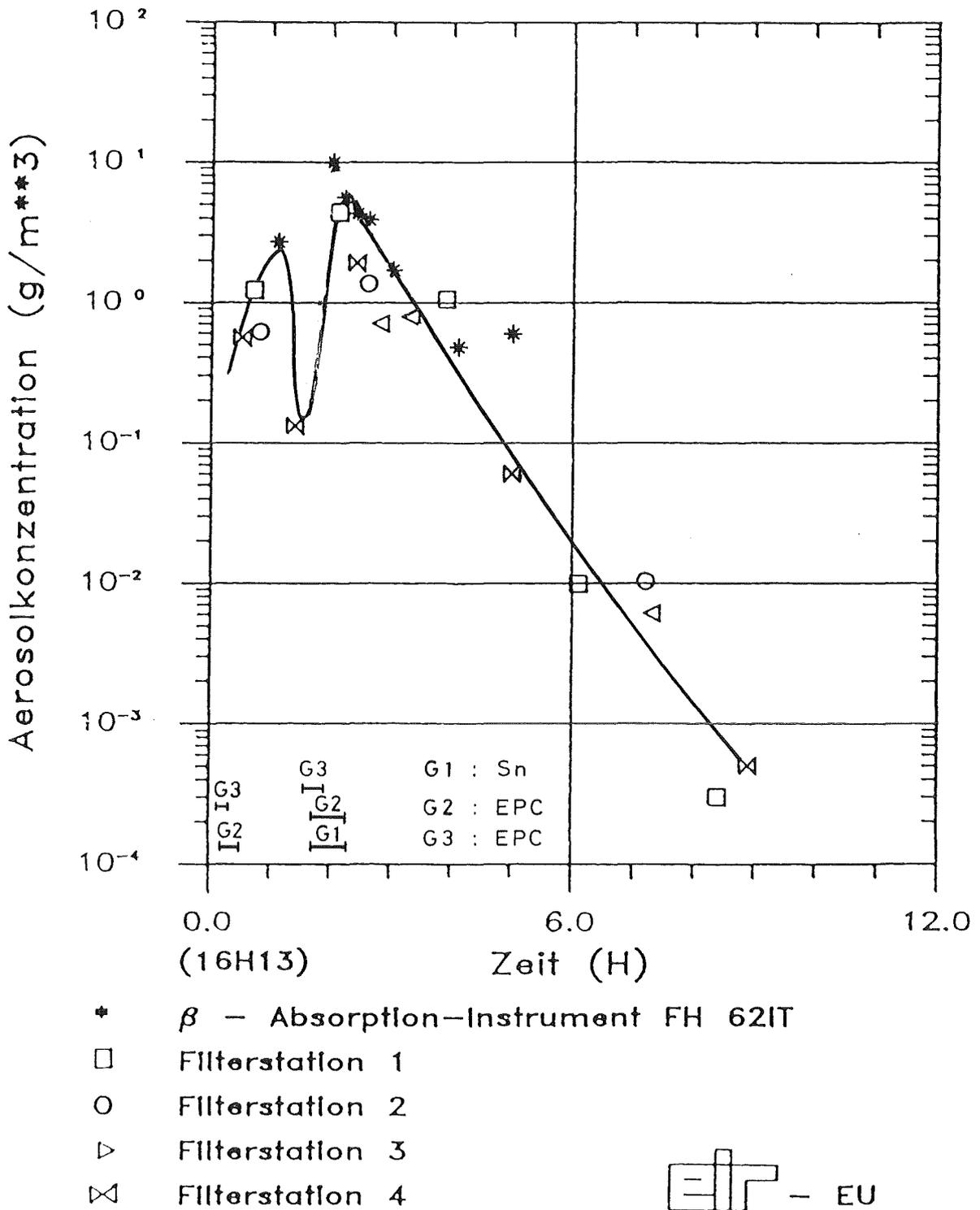


Abbildung 5.2.1: Gemessene Aerosolkonzentration bei DEMONA Versuch V55 in Funktion der Zeit. Durch den zweimaligen Brennerstart erscheinen zwei Maxima: Ein erstes bei ca.  $2.5 \text{ g/m}^3$ , ein zweites bei ca.  $4.9 \text{ g/m}^3$ . Der mit dem  $\beta$ -Absorptionsmessgerät festgestellte maximale Wert von  $10 \text{ g/m}^3$  ist nicht gesichert.

Start Luftfeinspeisung: 12.03.86, 16H13

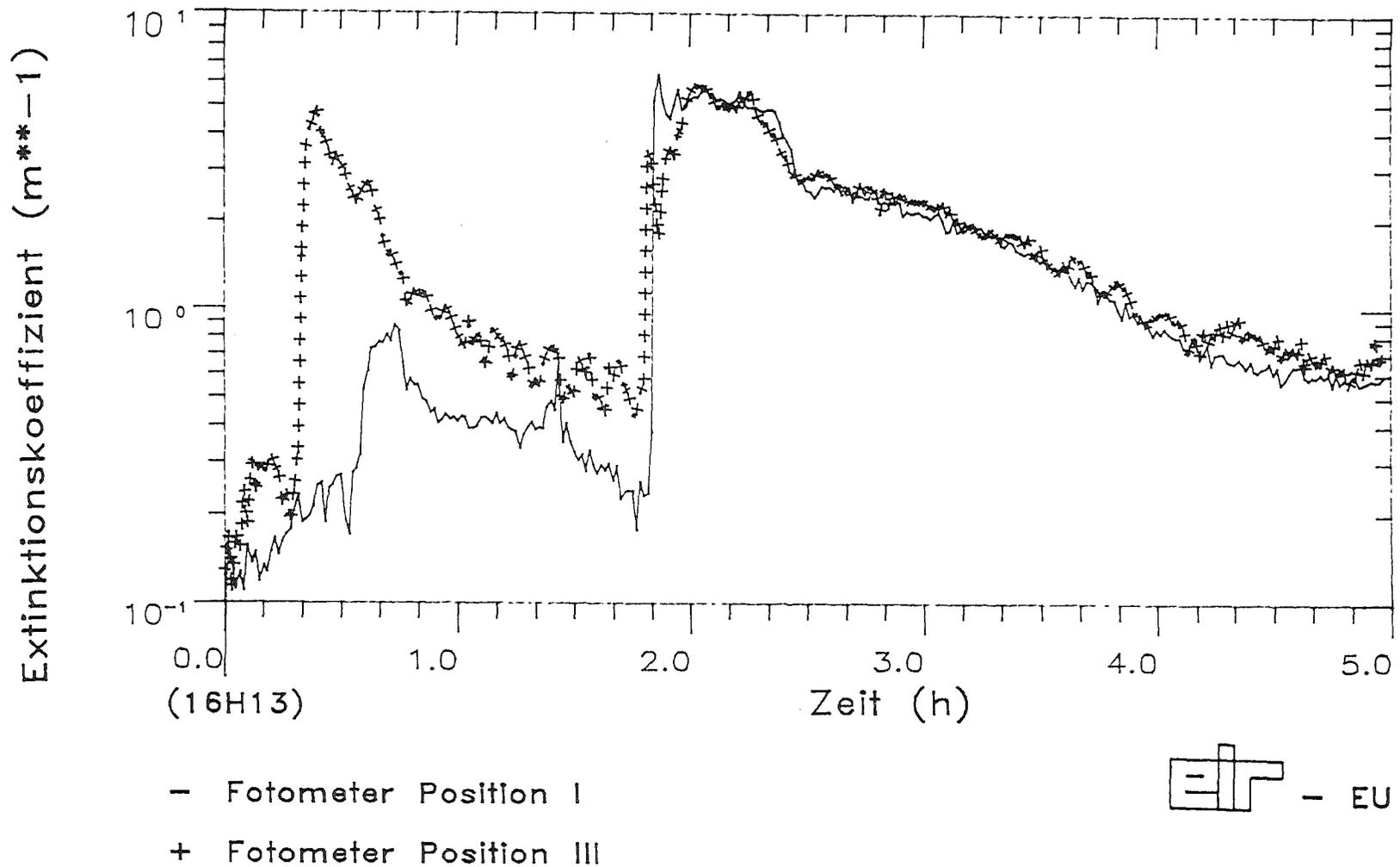
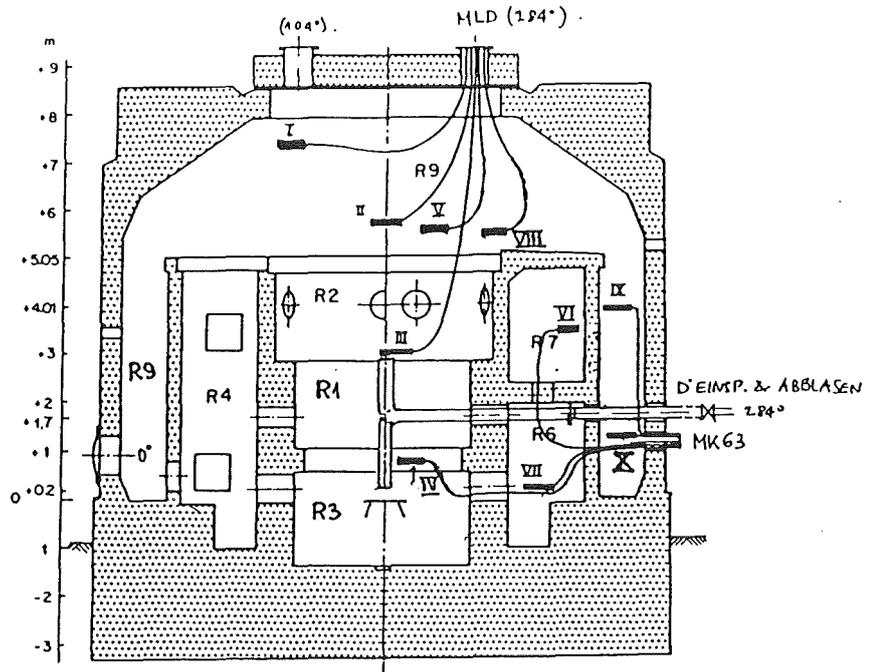


Abbildung 5.2.2: Extinktionsverläufe im oberen Kuppelraum (Fotometer I) und im oberen Teil des zentralen Raumes (Fotometer III). Deutliche Konzentrationsunterschiede sind erkennbar nach dem ersten Start, da nur die  $Fe_2O_3$ -Aerosolerzeugung gestartet werden konnte, während nach dem zweiten Start mit gleichzeitiger  $SnO_2$ -Aerosolerzeugung rasche und gute Durchmischung im Containment erreicht wurde.



I ... X = Fotometer

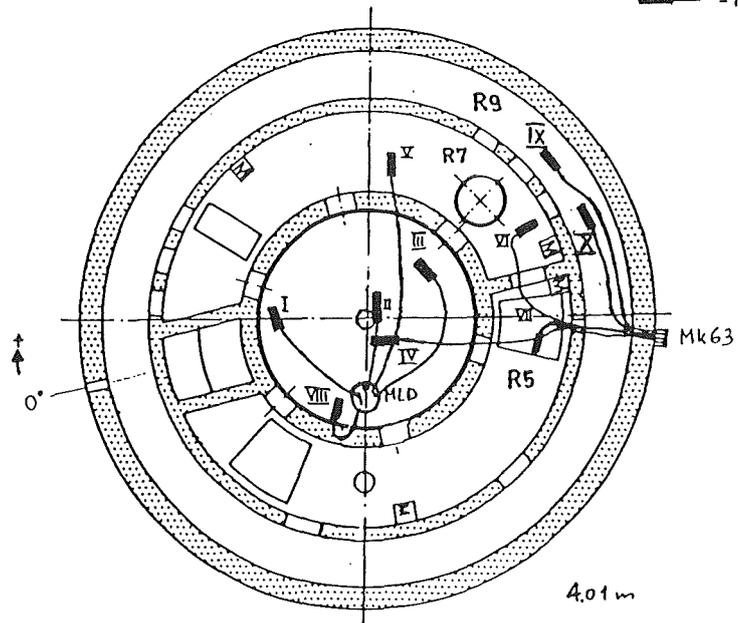


Abbildung 5.2.3: Positionen der zehn Fotometer im Containment für V55.

Start Luftfeinspeisung: 12.03.86, 16H13

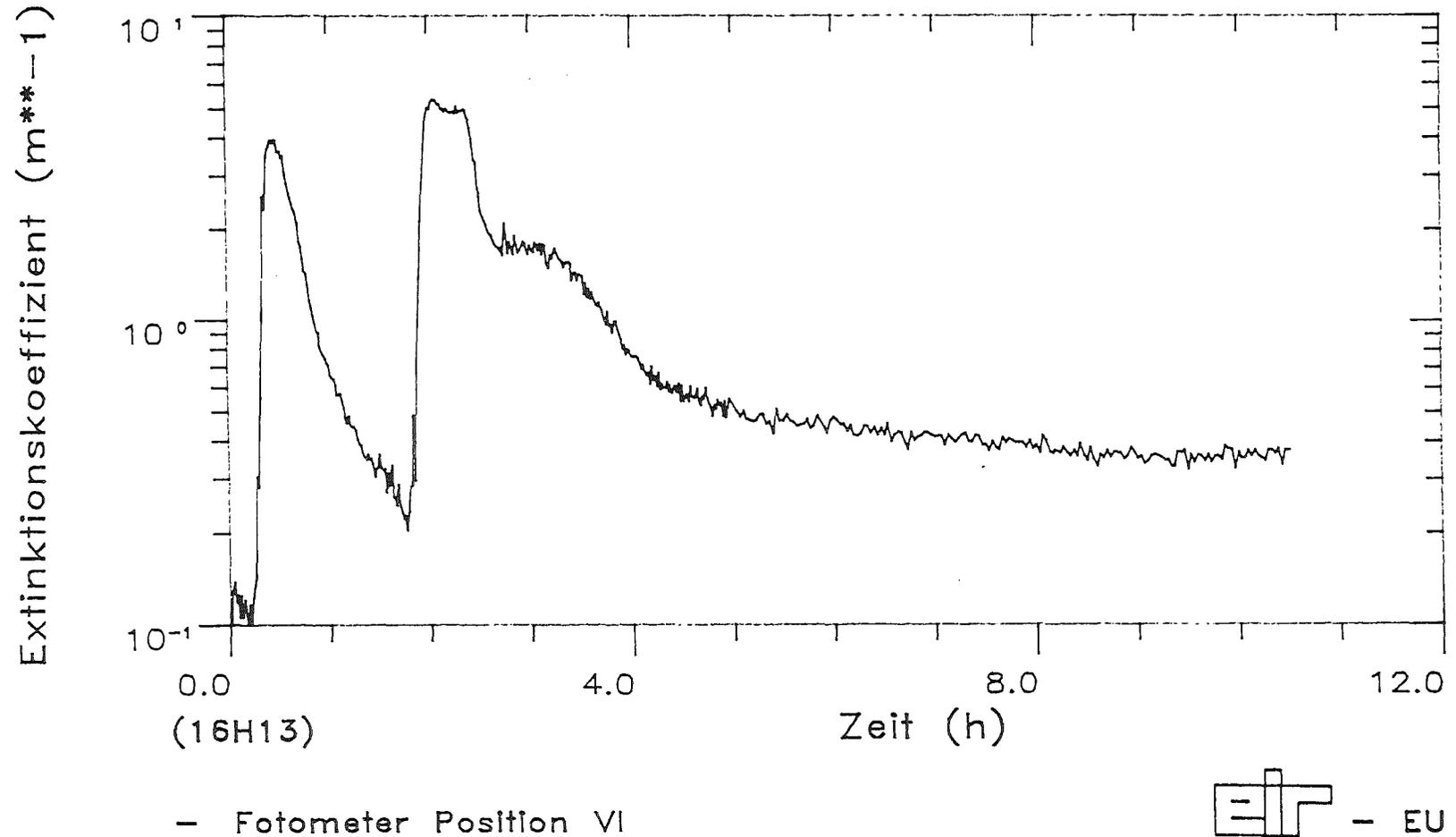


Abbildung 5.2.4: Extinktionsverlauf im R7 von Fotometer VI nahe der Filterstation 3. Etwa 50 Min nach Ende der ersten und 20 Min nach Ende der zweiten Einspeisephase ist Volumencondensation des Dampfes zu sehen. Für den grossen Nebelpeak ist die Extinktion der Wassertröpfchen grösser als die des festen Aerosols. Kurz vor Ende der zweiten Einspeisephase wurde die Massenkonzentration  $5.6 \text{ g/m}^3$  gemessen, was  $c/k = 1.1 \text{ g/m}^2$  ergibt.

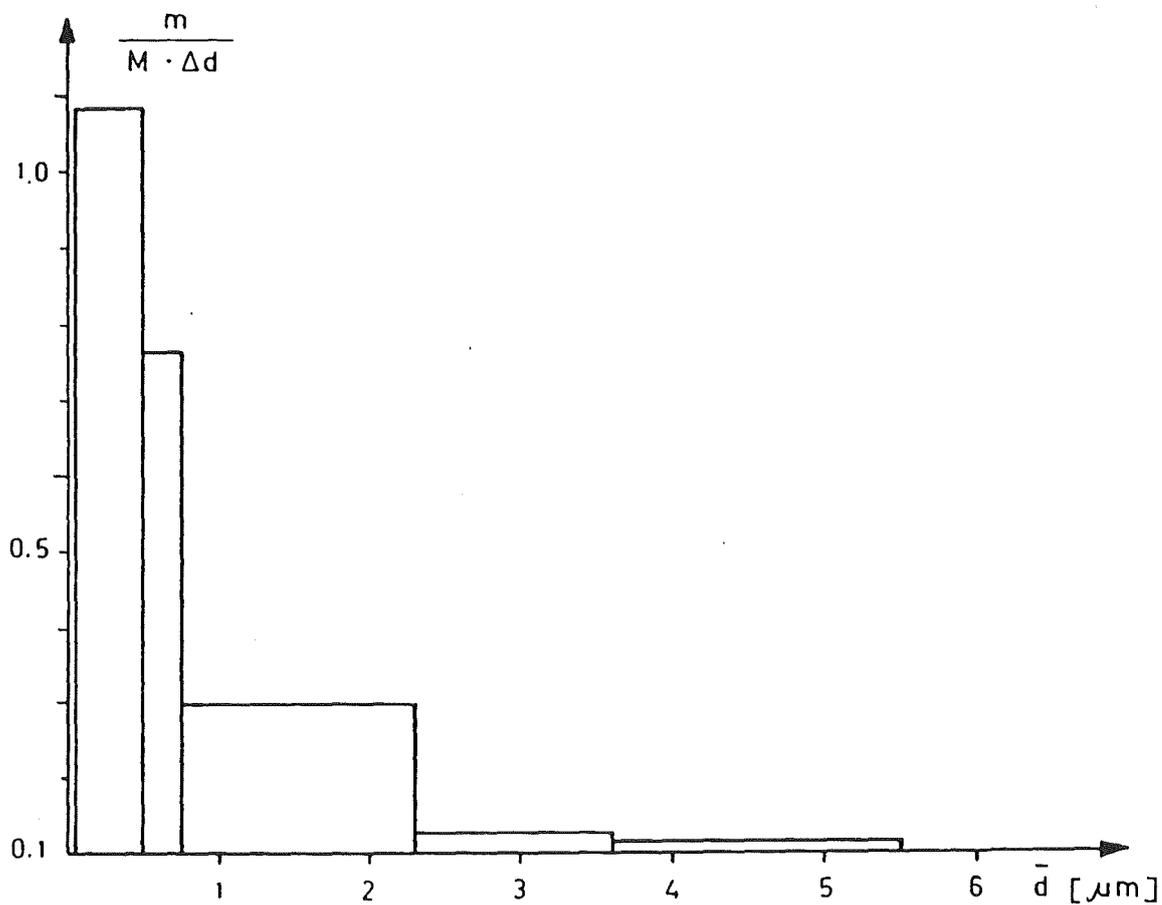


Abbildung 5.2.5: Versuch V55, Teilchengrößenverteilung gemessen mit Andersen-Impaktor am 12.3.1986 um 17.20 h. MMD = 0.52  $\mu\text{m}$  für angenommene Teilchendichte  $\rho = 4 \text{ g/cm}^3$ .

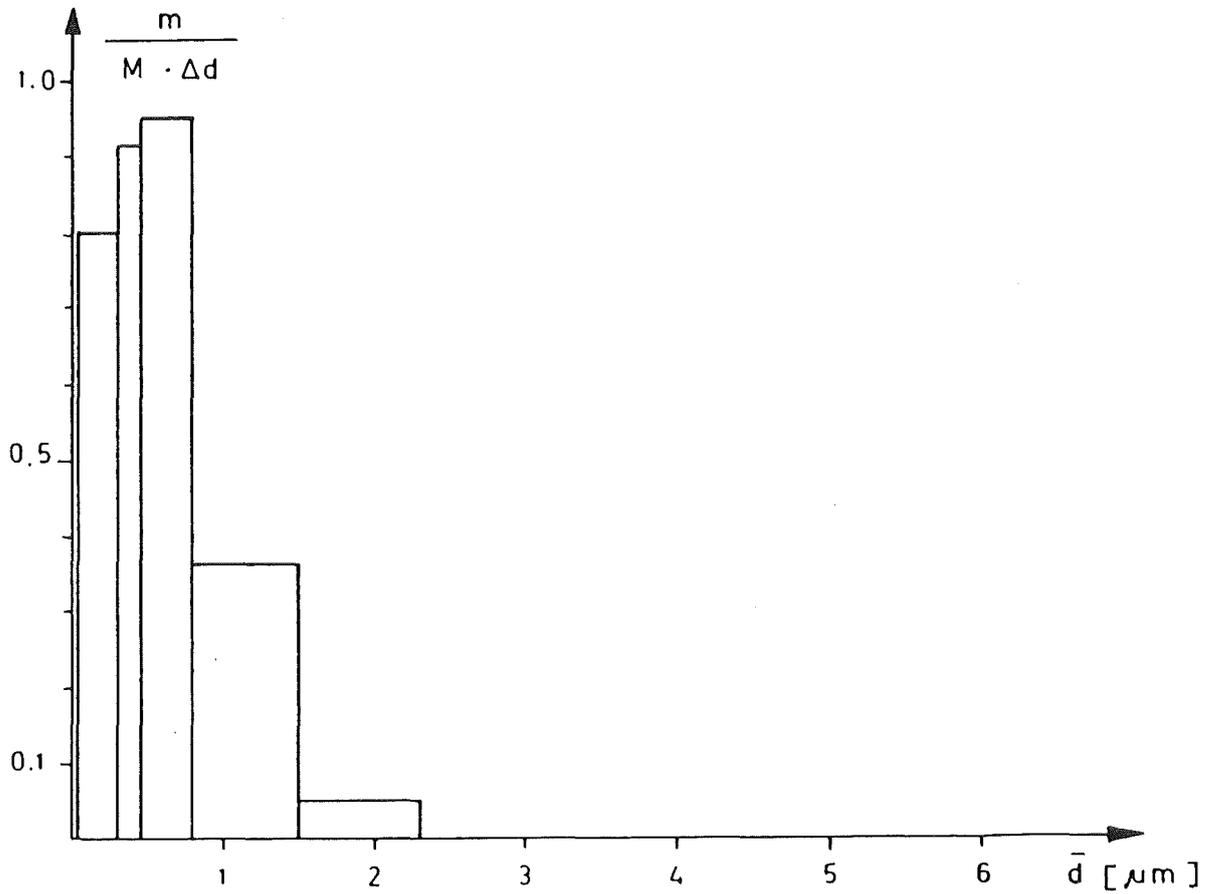


Abbildung 5.2.6: Versuch V55, Teilchengrößenverteilung gemessen mit Andersen-Impaktor am 12.3.86 um 19.20 h. MMD = 0.42  $\mu\text{m}$  für angenommene Teilchendichte  $\rho = 4 \text{ g/cm}^3$ .  $\sigma_D = 1.8$ .

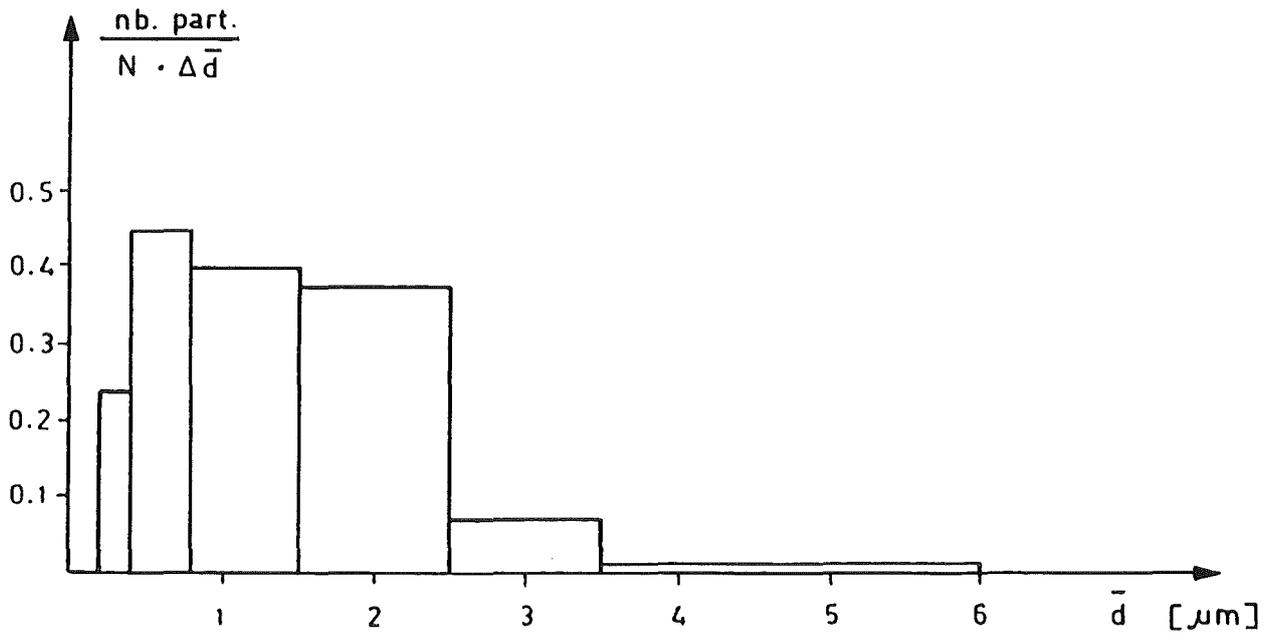


Abbildung 5.2.7: Versuch V55. Teilchengrössenausählung von Filter 4.4, beladen am 12.3.1986 um 21.00 h. CMD = 0.9  $\mu\text{m}$  für angenommenen Formfaktor  $f = 1$ .

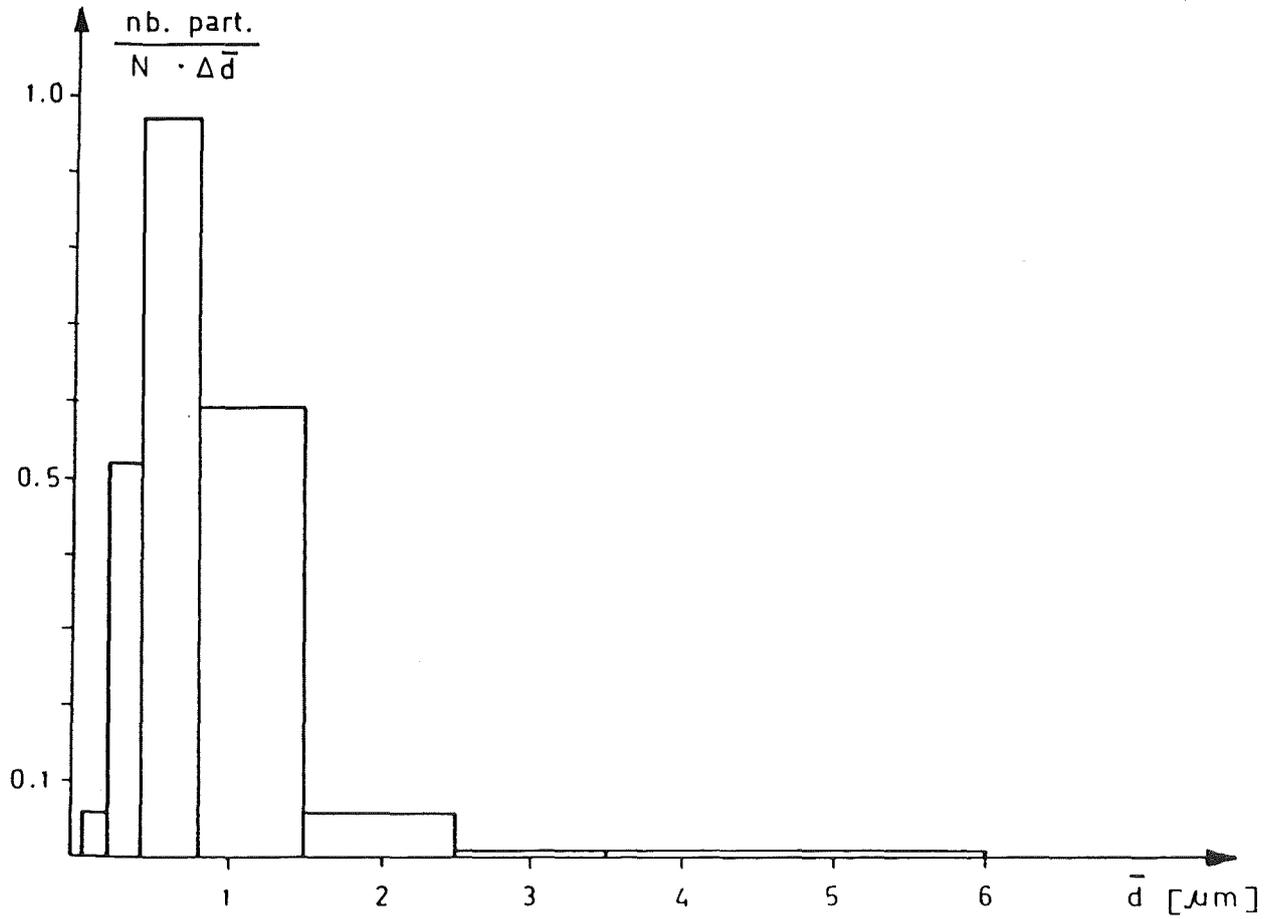


Abbildung 5.2.8: Versuch V55. Teilchengrössenausählung von Filter 1.4, beladen am 12.3.1986 um 22.20 h. CMD = 0.6  $\mu\text{m}$ , Formfaktor  $f = 1$ .  $\sigma_p = 1.7$ .

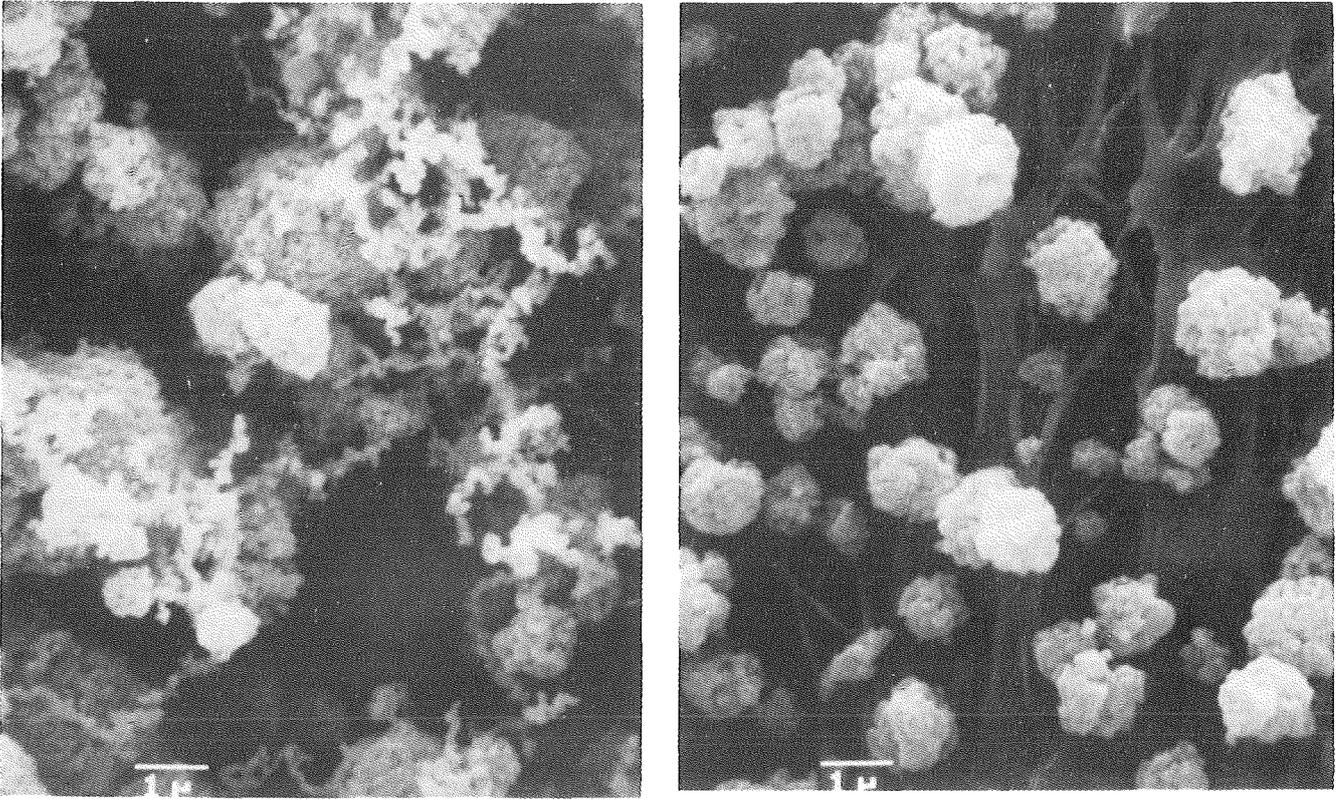
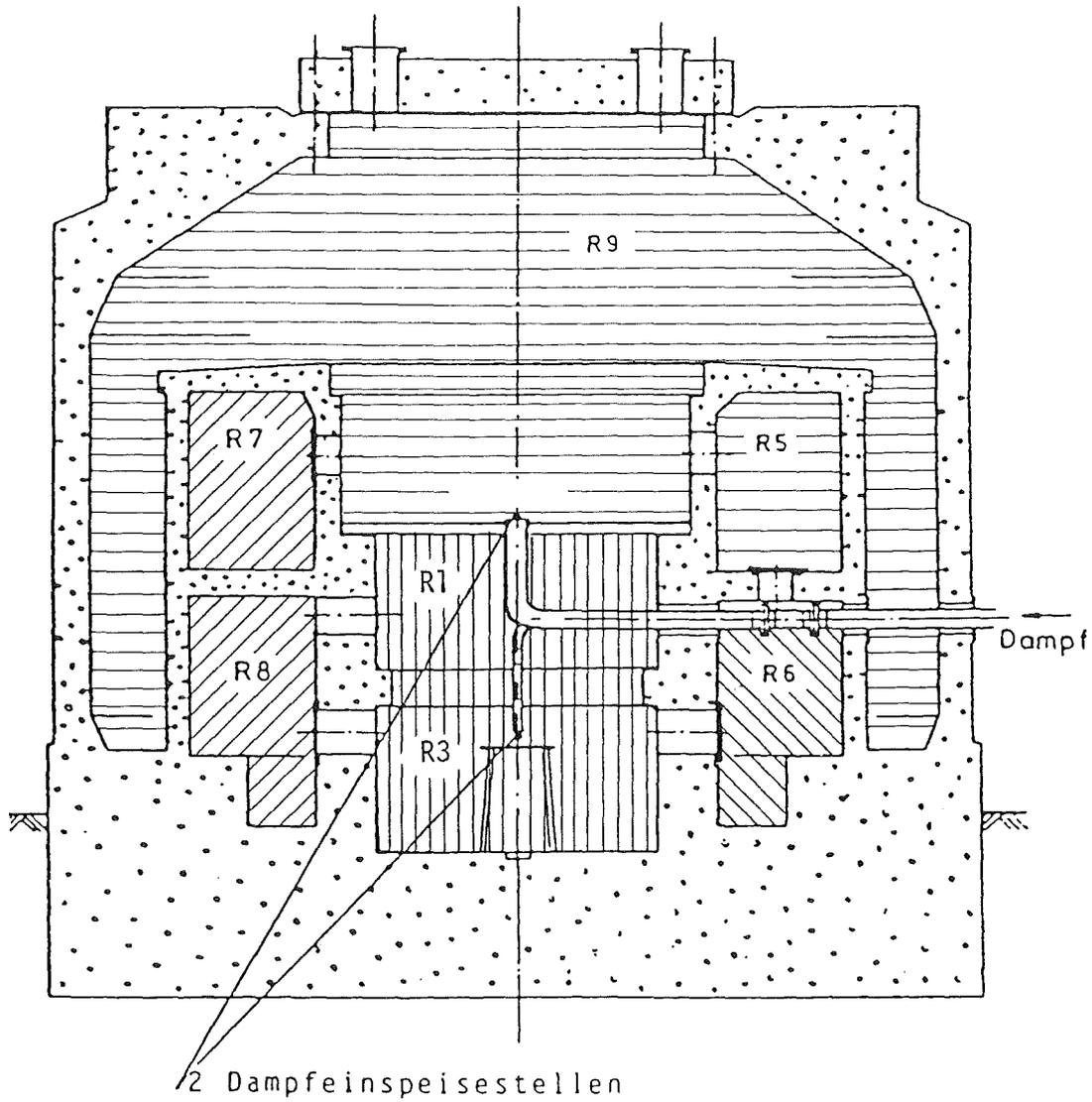


Abbildung 5.2.9: Versuch V55. Links Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Aerosole nach dem ersten Brennerstart (Filter 4.2, beladen am 12.3.1986 um 17.23 h). Rechts Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SnO<sub>2</sub>-Aerosole nach dem zweiten Brennerstart (Filter 4.4, beladen am 12.3.1986 um 21.12 h).



Zone 1: Raum 1 + 3



Zone 2: Raum 7 + 8



Zone 3: Raum 6

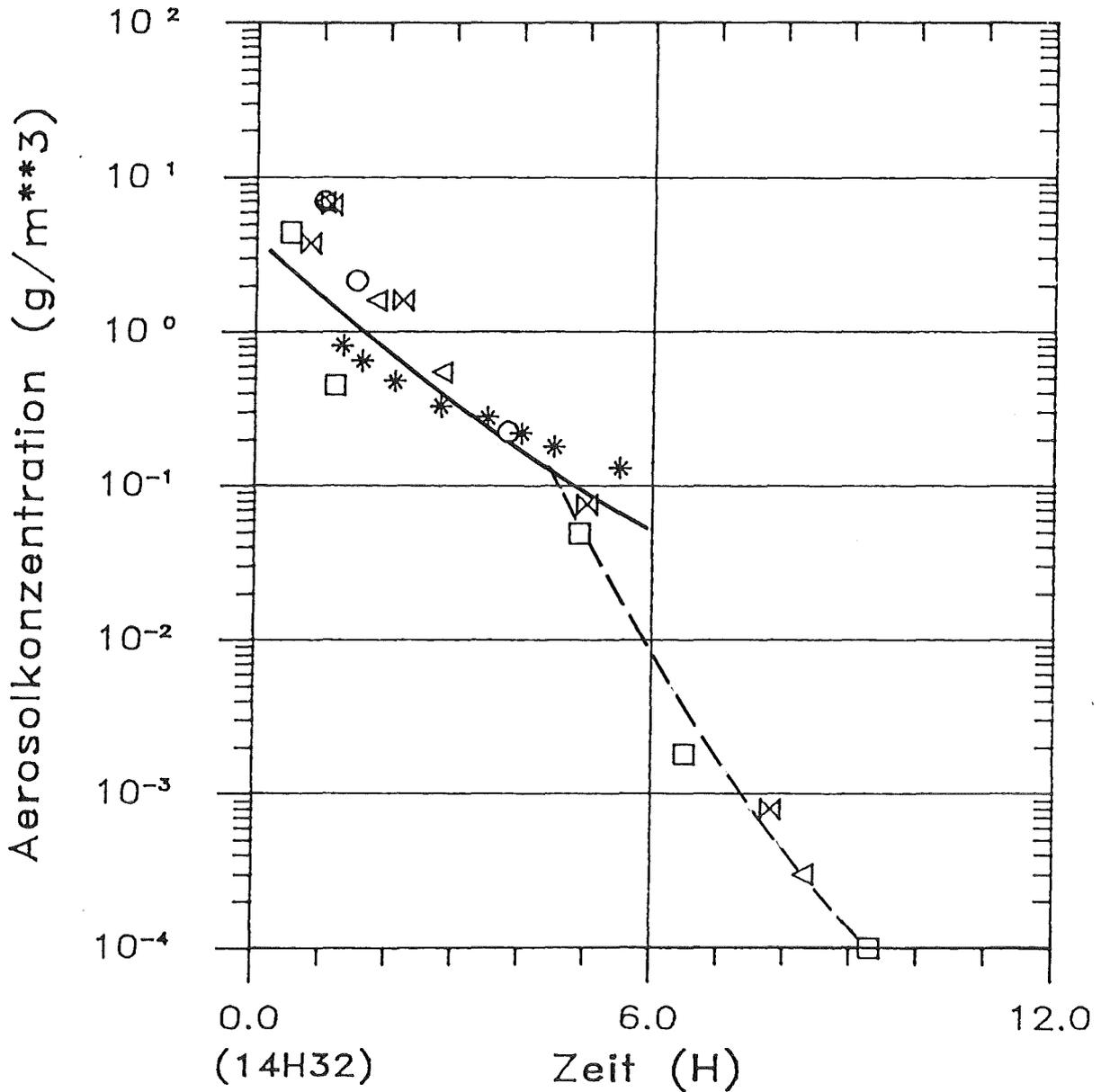


Zone 4: Raum 2+4+5+9

Ueberströmquerschnitt

Zone 1 → Zone 2	0.89	m <sup>2</sup>
Zone 2 → Zone 3	0.28	m <sup>2</sup>
Zone 2 → Zone 4	1.81	m <sup>2</sup>
Zone 3 → Zone 4	0.33	m <sup>2</sup>

Abbildung 5.2.10: Raumaufteilung bei Versuch V56.



- \*  $\beta$  - Absorption-Instrument FH 62IT
- Filterstation 1
- Filterstation 2
- △ Filterstation 3
- ⊗ Filterstation 4

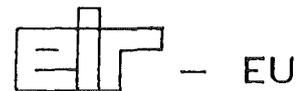
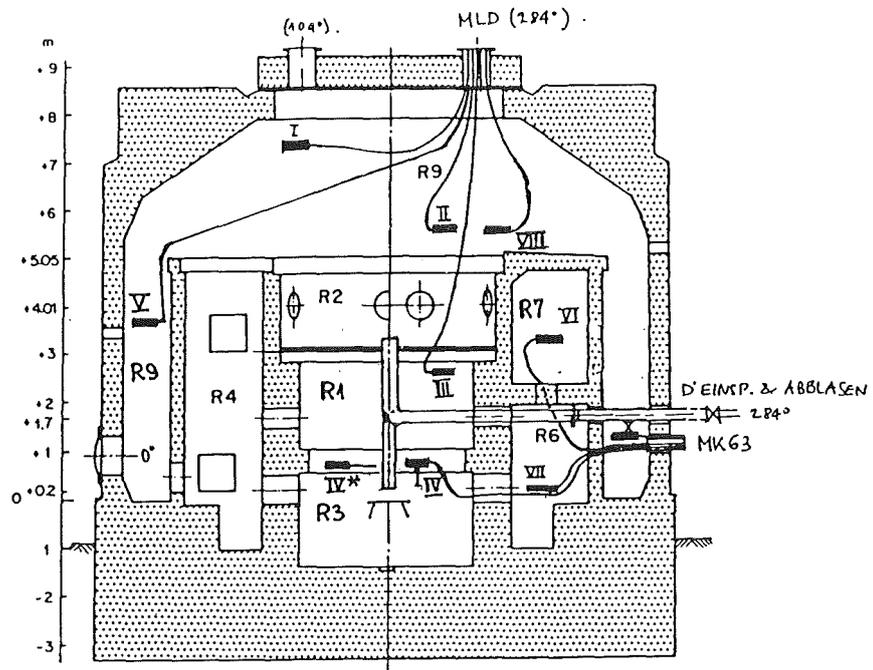


Abbildung 5.2.11: Gemessene Aerosolkonzentrationen bei DEMONA-Versuch V56. Maximal erreichte Konzentration ist ca. 7 g/m<sup>3</sup>, die nach ca. 5 h während der "trockenen" Versuchsphase auf ca. 0.1 g/m<sup>3</sup> abnimmt. Danach und nach Wiederaufnahme der Dampfeinspeisung nimmt die Aerosolkonzentration in ca. 2 h auf Werte unter 10<sup>-3</sup> g/m<sup>3</sup> ab.



I ... X  
 = Fotometer

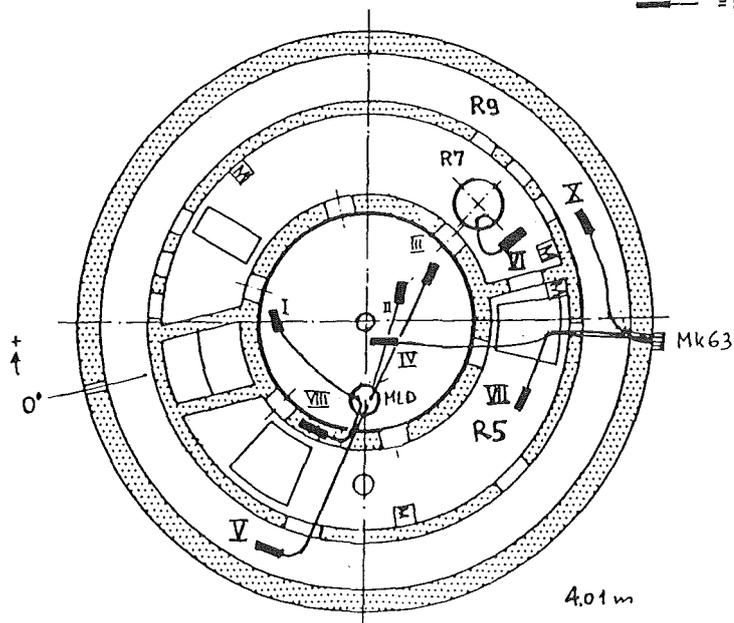
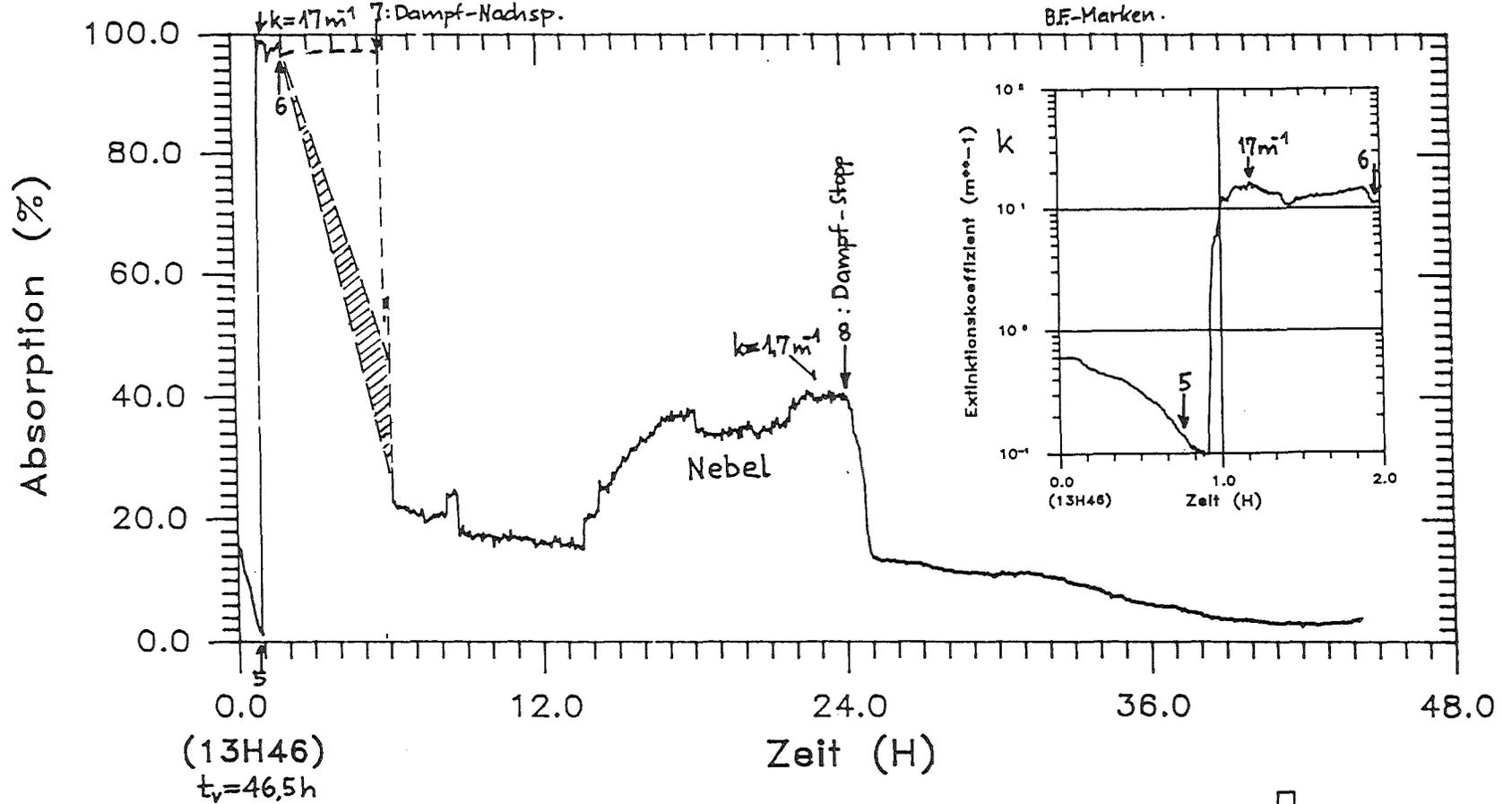


Abbildung 5.2.12: Anordnung der zehn Fotometer in den vier Zonen des Containments. Zone 1: III, IV, IV\*, Zone 2: VI; Zone 3: VII; Zone 4: I, II, V, VIII, X.

# DEMONA - VERSUCH V56

Stopp Dampfeinspeisung: 14.05.86, 13H46 : 4

Start Luft einspeisung: 14.05.86, 14H32 : 5



Fotometer Position IV, R3,  $z = 0,6m$

$l = 0,305m$

EIF - EU

Abbildung 5.2.13: Absorption und Extinktion bis Ende Aerosoleinspeisung von Fotometer IV nahe der Aerosol- und Dampfeinspeiseröhre in Zone 1. Aerosolkoagulat-Bärte an den optischen Blenden verfälschen ab etwa Ende der Aerosoleinspeisung bis Beginn Dampf nachspeisung die Messung stark. Schraffiert: abgeschätzter Bereich des wahren Absorptionsverlaufes.

DEMONA - VERSUCH V56

Stopp Dampfeinspeisung: 14.05.86, 13H46 : 4

Start Luftfeinspeisung: 14.05.86, 14H32 : 5

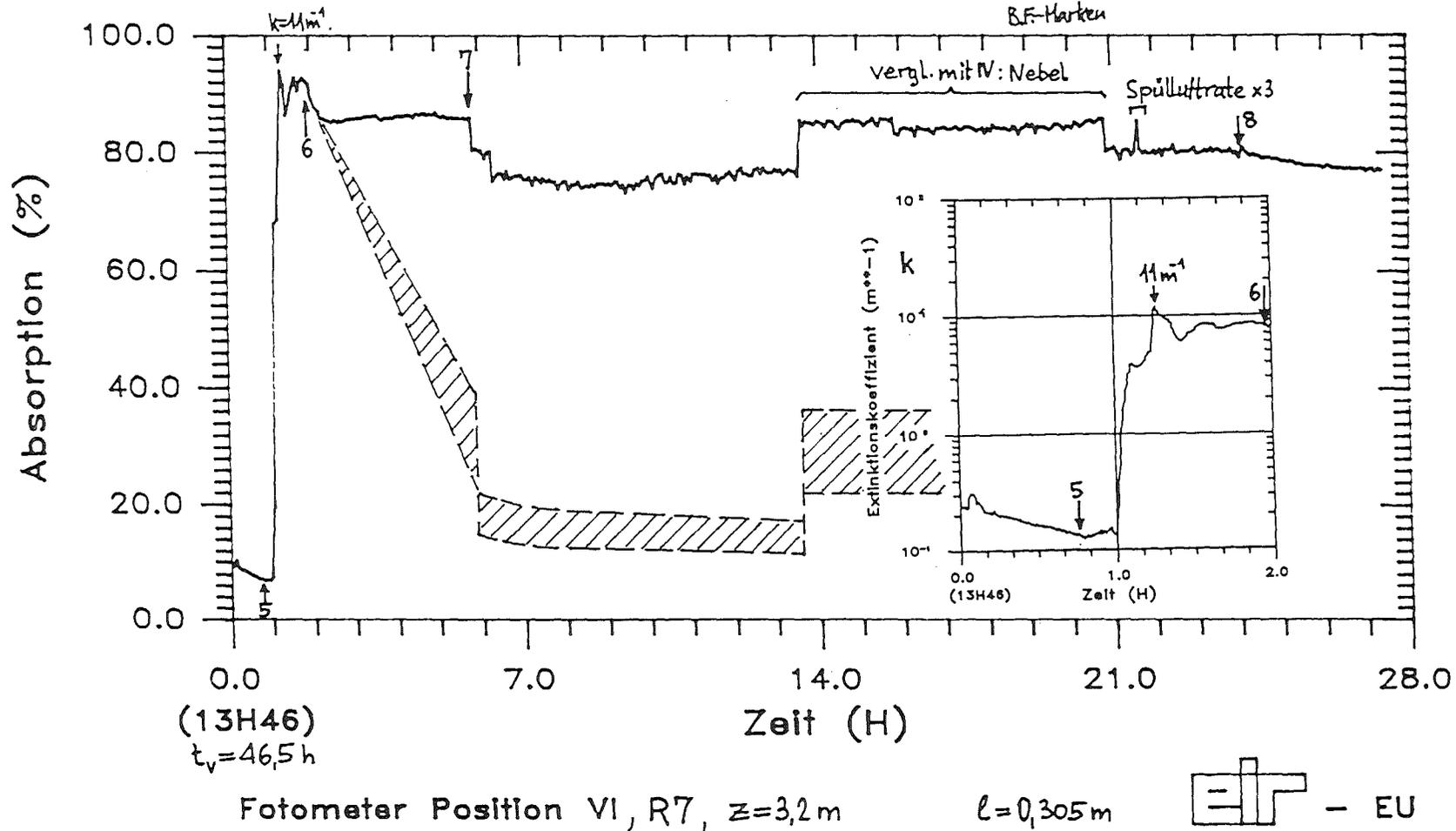


Abbildung 5.2.14: Gemessener Absorptionsverlauf und Extinktion bis Ende Aerosoleinspeisung von Fotometer VI in Zone 2 nahe der Filterstation 3. Die im wesentlichen bis zur Druckentlastung massiv vorhandenen Aerosolkoagulat-Bärte ergeben den stark verfälschten Absorptionsverlauf ab kurz nach Ende der Aerosoleinspeisung. Der abgeschätzte wahre Absorptionsverlauf liegt innerhalb der schraffierten Bereiche.

D E M O N A - V E R S U C H V 5 6

Stopp Dampfeinspeisung: 14.05.86, 13H46

Start Luftspeisung: 14.05.86, 14H32

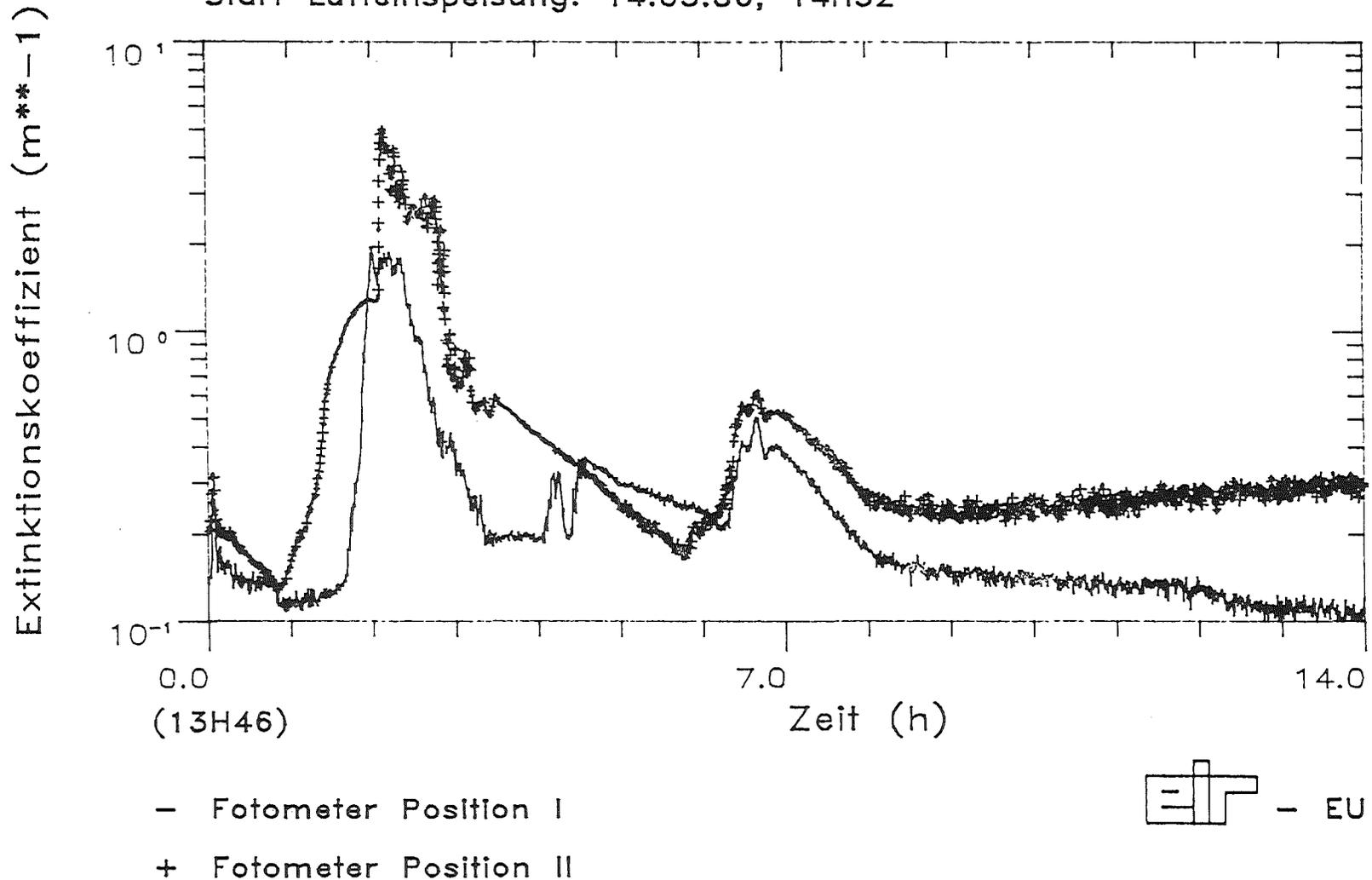


Abbildung 5.2.15: Extinktionsverlauf der Fotometer I und II in Zone 4. Die mit 28 bis 56 Min gegenüber Fotometer IV stark verzögerten Anstiege illustrieren das Vorrücken der Aerosolwolke aus Zone 1 via Zonen 2, 3 und 4. Nach 2 - 3 h sind die Unterschiede in den Aerosolkonzentrationen weitgehend abgebaut.

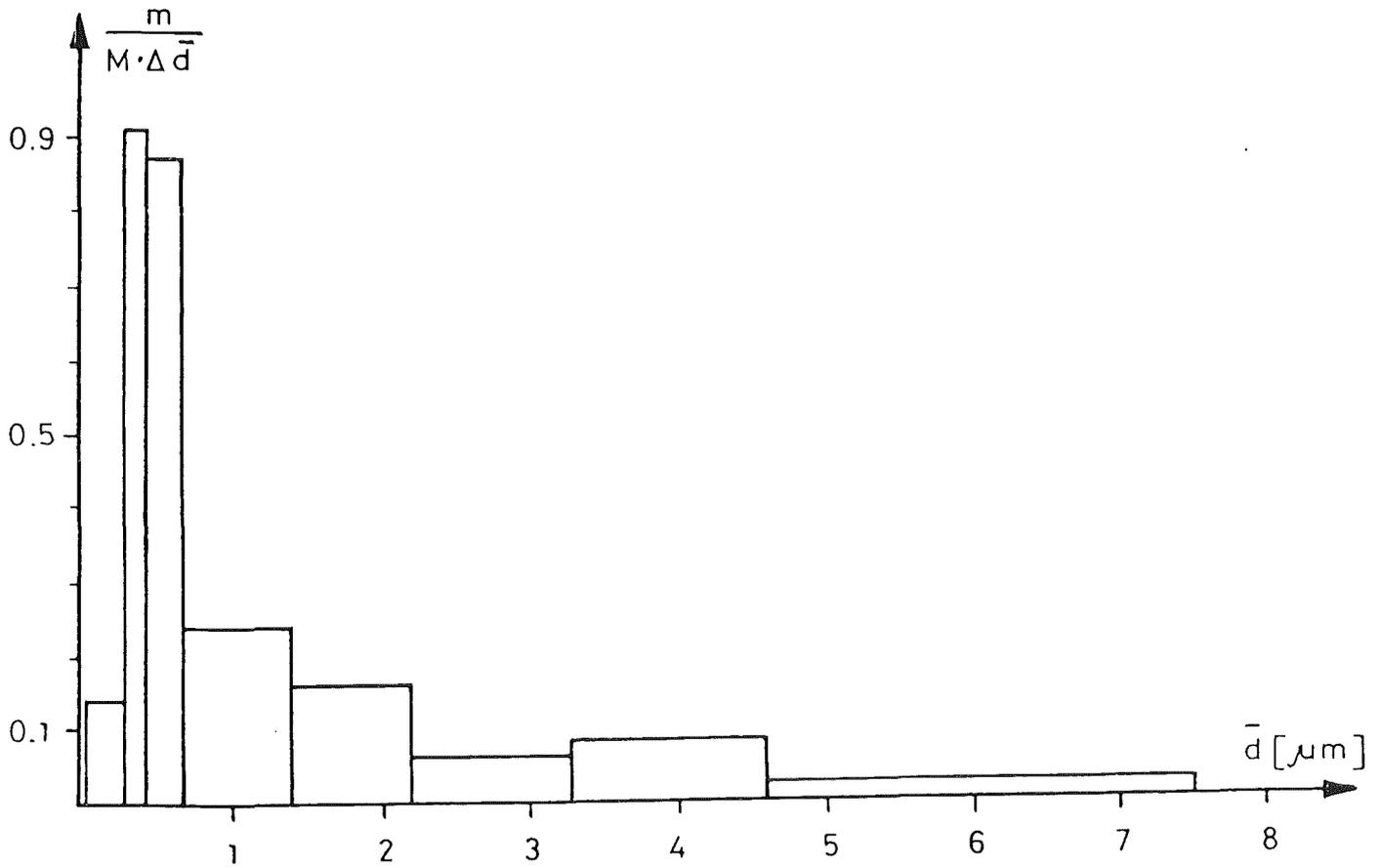


Abbildung 5.2.16: Versuch V56. Teilchengrößenverteilung mit Andersen-Impaktor. Beladen am 15.5.1986 um 15.52 h. MMD = 0.5  $\mu\text{m}$  für angenommene Teilchendichte  $\rho = 4 \text{ g/cm}^3$ .

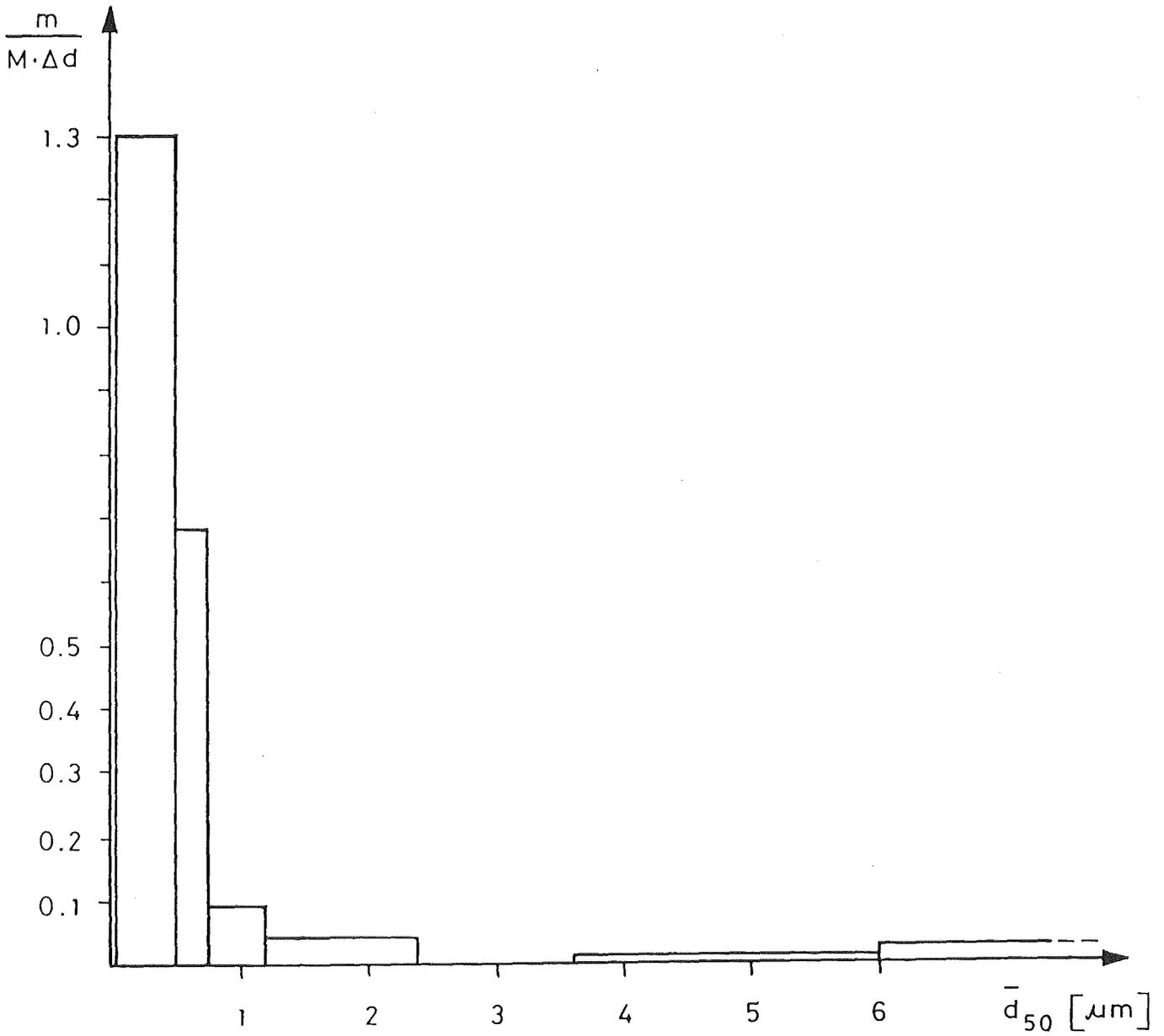


Abbildung 5.2.17: Versuch V56. Teilchengrößenverteilung mit Andersen-Impaktor am 14.5.86 um 21.00 h.

Teilchendurchmesser  
( $\mu\text{m}$ ) für angenommene  
Teilchendichte  $\rho = 4 \text{ g/cm}^3$

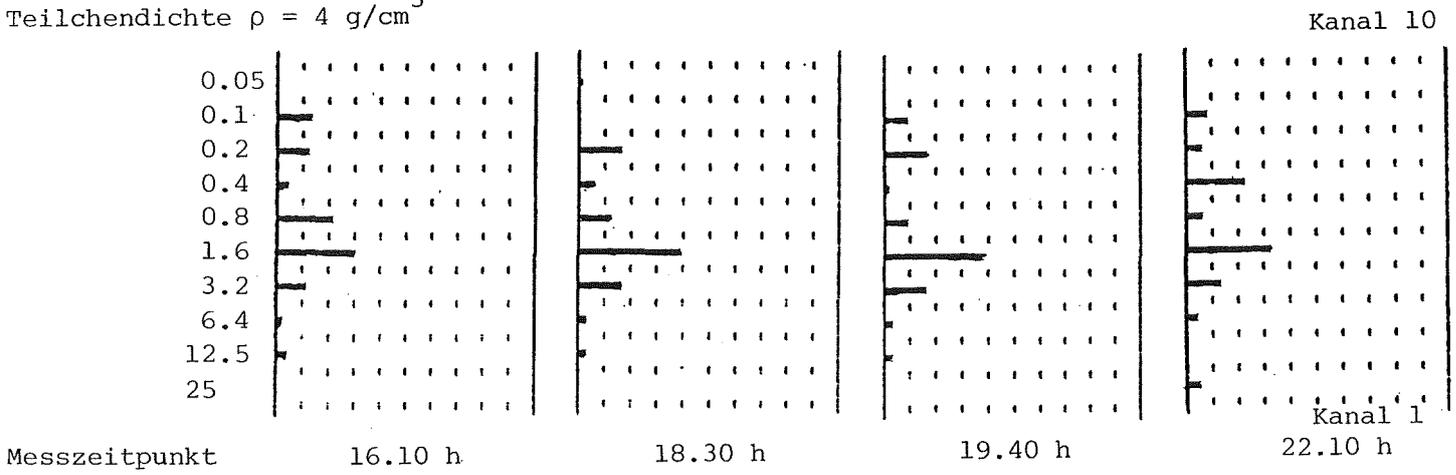


Abbildung 5.2.18: Mit APAC-Teilchengrößenanalysator über Nebenkesselmessstrecke gemessene Größenverteilung.

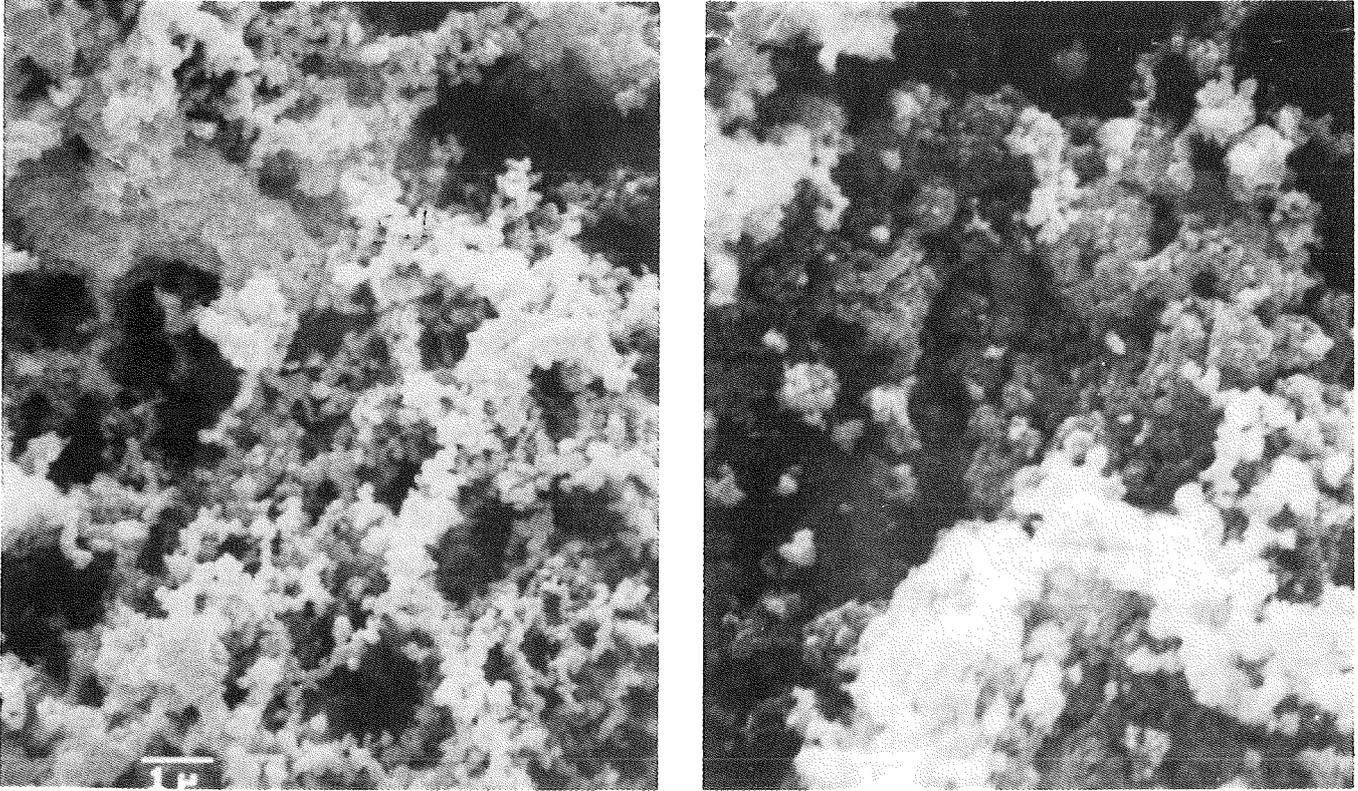


Abbildung 5.2.19: Versuch V56: REM-Fotos links von Filter 2.3, beladen am 14.5.1986 um 16.04 h während der nassen Versuchsphase. Im Unterschied zu früheren Versuchen sind hier auf dem rechten Foto keine für kondensierende Bedingungen typischen kugelförmigen Aggregate zu erkennen.

### 5.3. Sonderinstrumentierung (KfK/LAF 1)

Von KfK/LAF 1 wurden das Laserfotometer und die Tröpfchenkalorimeter betrieben. Die Messungen mit dem Laserfotometer stimmen mit denen der Infrarotfotometer überein. Die Messungen mit den Kalorimetern sind in den Abb. 5.3.1 und 5.3.2 dargestellt.

Das Kalorimeter 1 war in R9 auf 5.6 m Höhe angebracht; das Kalorimeter 2 war im Versuch A8 in R6 wie bisher, im Versuch A9 wurde es nach R7 verlegt. Bei beiden Versuchen lagen die gemessenen Tröpfchenkonzentrationen unter  $1 \text{ g/m}^3$  und im Gegensatz zu den früheren Versuchen wurde mit dem Kalorimeter 1 in R9 die geringere Konzentration gemessen.

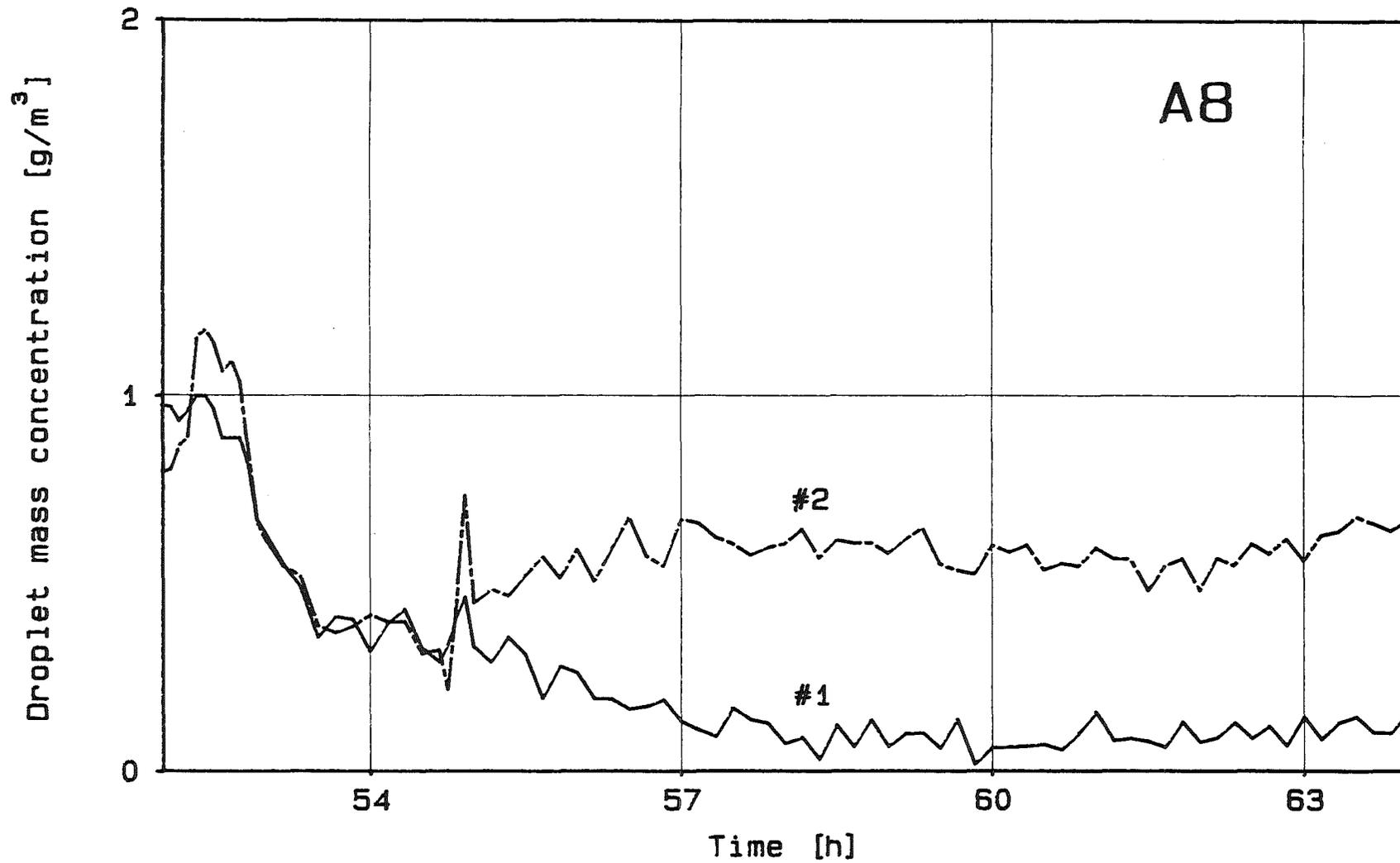


Abb.5.3.1: Tröpfchenmassenkonzentration gemessen mit den Kalorimetern #1 in R9 und #2 in R6

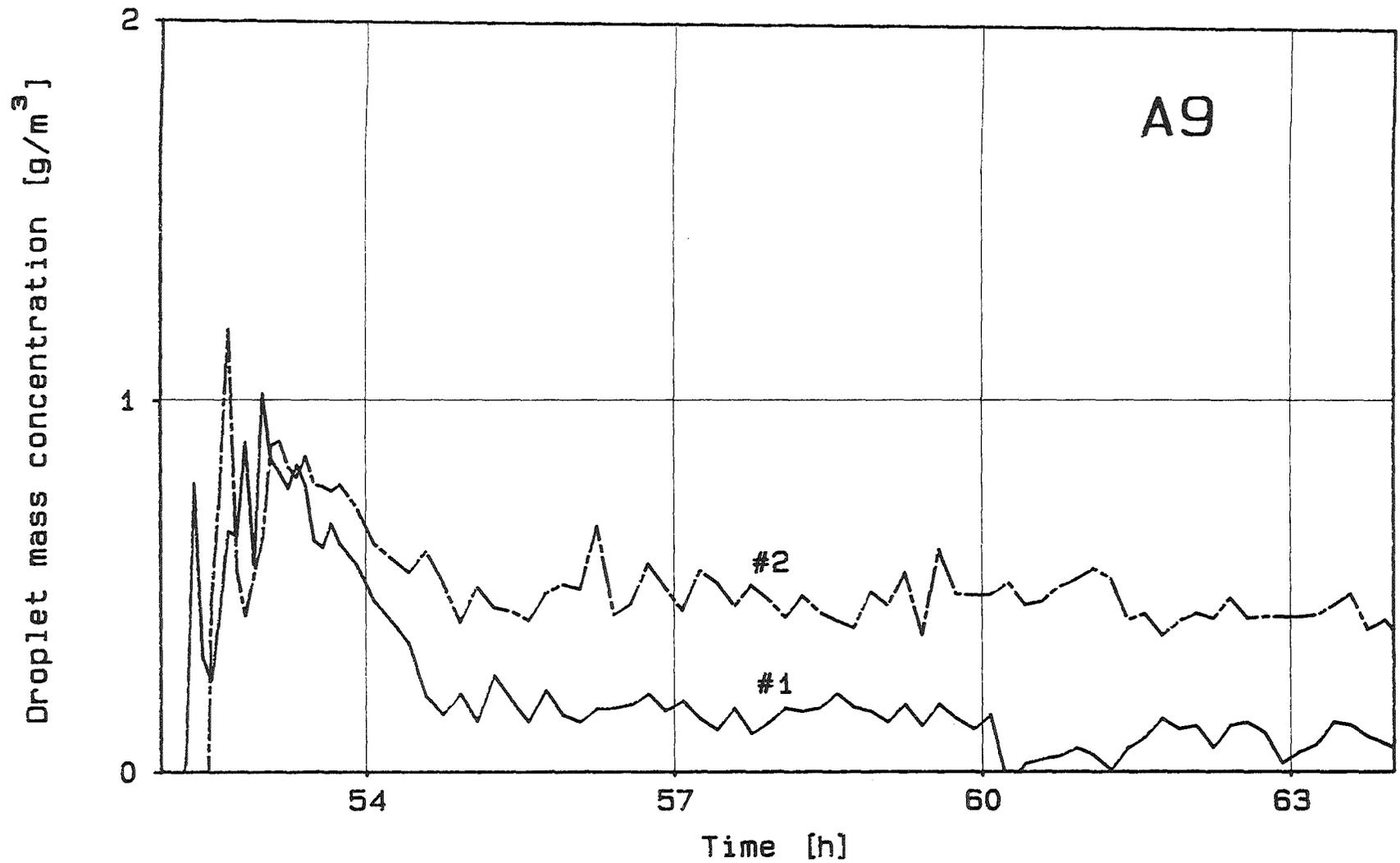


Abb.5.3.2: Tröpfchenmassenkonzentration gemessen mit den Kalorimetern #1 in R9 und #2 in R7



## 6. Modelltheorie

### 6.1. Thermodynamische Rechnungen mit COCMEL (KWU)

#### Ergebnisse

Zum Versuch A8 wurden keine Rechnungen mit COCMEL durchgeführt, weil die Thermodynamik wie in den Versuchen B3 und B4 geplant war. Die stattgehabten Abweichungen lassen sich für die NAUA Nachrechnung unschwer korrigieren.

Zum Versuch A9 wurde eine Nachrechnung mit COCMEL durchgeführt. Ziel war es zu zeigen, daß auch bei ausgeprägter Compartmentierung des Containments eine Einraumbetrachtung sowohl der Thermodynamik als auch des Aerosolverhaltens hinreichend genaue Ergebnisse liefert und Abweichungen stets zur einer konservativen Bewertung führen.

Aus diesem Grunde wurde für die thermodynamische Abbildung der gleiche Datensatz verwendet wie für die zuvor gerechneten Einraumversuche. Der nicht genau spezifizierbare Grad der Isolierung von Kamera- und Scheinwerfergehäuse ließ sich anhand von Parameterrechnungen ermitteln. Bei diesen wurde der sich als Summe der Energieeinträge in Wände und Kühlflächen ergebende Druckabfall mit dem gemessenen verglichen. Demnach bewirkt die Isolierung, bei Beibehalten der Modellvorstellung einer gekühlten Metallfläche, eine Reduktion der wirksamen Oberfläche auf 10% des ursprünglichen Werts.

Für den im Gleichgewichtszustand zugeführten Dampfmassenstrom vor und nach Aerosoleinspeisung lieferte die Rechnung Werte, die um 30% unter den gemessenen liegen. Dies ist insofern verwunderlich als der höhere Meßwert auch eine höhere Wärmeabfuhr durch Kühlung bedeuten würde, was wiederum inkonsistent ist mit der gemessenen Druckabfallrate. Erklären ließe sich dies z.B. dadurch, daß ein Teil des Dampfs im Rohr oder direkt an der Sumpfoberfläche kondensiert, bevor er den Gasraum des Containments erreicht.

Die errechneten Werte für Druck (Abb.6.1.1) und mittlere Temperatur (Abb.6.1.2) im Containment stimmen sehr gut mit den Meßwerten überein. Dies ist insofern erwähnenswert, als durch das verbesserte Wärmeübergangsmodell

jetzt auf jegliche Korrekturterme verzichtet werden konnte. Dies zeigt, daß es sich bei den ausgeführten Änderungen tatsächlich um Verbesserungen handelt. Im Hinblick auf die Volumenkondensationsrate (Abb.6.1.3) ergibt sich jedoch bei Anwendung dieses Modells ein weiteres Absinken des berechneten Wertes im Vergleich zu den früheren Versuchen

### Allgemeine Bewertung der Ergebnisse

Die Abbildung thermodynamischer Vorgänge im Innern des Modellcontainments auf nur einen Raum bringt zwangsläufig einen hohen Grad von Vereinfachung mit sich. Folgende Ursachen sind dafür maßgeblich:

Durch die Kompartimentierung des Containments ergeben sich wegen der gewählten Art der Dampfeinspeisung in den Zentralraum zu jedem Zeitpunkt Inhomogenitäten der Gaszusammensetzung.

Aus diesem Grund führt die Unbestimmtheit der Leckstellen zu Schwierigkeiten bei der Nachbildung der durch diese - speziell bei vertikaler Stratifikation - hervorgerufenen zeitlichen Änderungen der mittleren Gasanteile.

Die teilweise Umbauung des Containments bedingt lokal unterschiedliche Wärmeflüsse durch die Außenwand. Deren Modellierung durch, wie üblich, eindimensionale Wärmeleitungsgleichungen mit angenommener isotroper Außentemperatur impliziert somit bereits Abbildungsfehler. Eine ähnliche Abweichung von der Idealität des mathematischen Modells bringt auch die Stahlarmierung des Betons und die dadurch bedingte Verungleichmäßigung des Temperaturprofils im Innern mit sich.

Im unteren Containmentbereich kann die Ausbildung der, bei beruhigter Konvektion, den Wärmeaustausch zwischen heißer Atmosphäre und kaltem Sumpf behindernden Granzschicht ebenfalls nur pauschal nachgebildet werden.

Einen besonders starken Einfluß auf die Gasverteilung innerhalb der Atmosphäre dürften, im Hinblick auf lokale Inhomogenitäten, vor allem die in den späteren Experimenten installierten gekühlten Kamera- und Scheinwerfergehäuse gehabt haben.

Diese Effekte berühren die Vorhersage von Druck und mittlerer Temperatur nur wenig. Sie führen aber bei der Bestimmung von Zeitpunkt und Rate der Volumen Kondensation zu großen Unsicherheiten. Hinzu kommt, daß sich bei Einraumbetrachtungen lokale Effekte prinzipiell nicht direkt simulieren lassen. Dies betrifft z.B. die Nebelbildung in der Nähe der Einspeisestelle, wo auch noch der thermodynamische Zustand des Dampfs nur ungenau bekannt ist.

Unter Berücksichtigung der genannten Schwierigkeiten konnte von den COCMEL-Rechnungen bezüglich der Volumen Kondensation allenfalls eine qualitative Aussage darüber erwartet werden, ob im Mittel Naßdampfzustände vorliegen oder nicht. Bei den Versuchen mit annähernd homogener Durchmischung konnte dann auch der Zeitpunkt für das erste Auftreten derartiger Zustände richtig vorausgesagt werden. Der errechnete Absolutwert besitzt dagegen in diesem Fall eine große Fehlerbandbreite. Bei stark inhomogener Versuchsführung, wie im Mehrraumversuch A9, sind von vornherein keine verläßlichen Voraussagen zur Nebelbildung möglich.

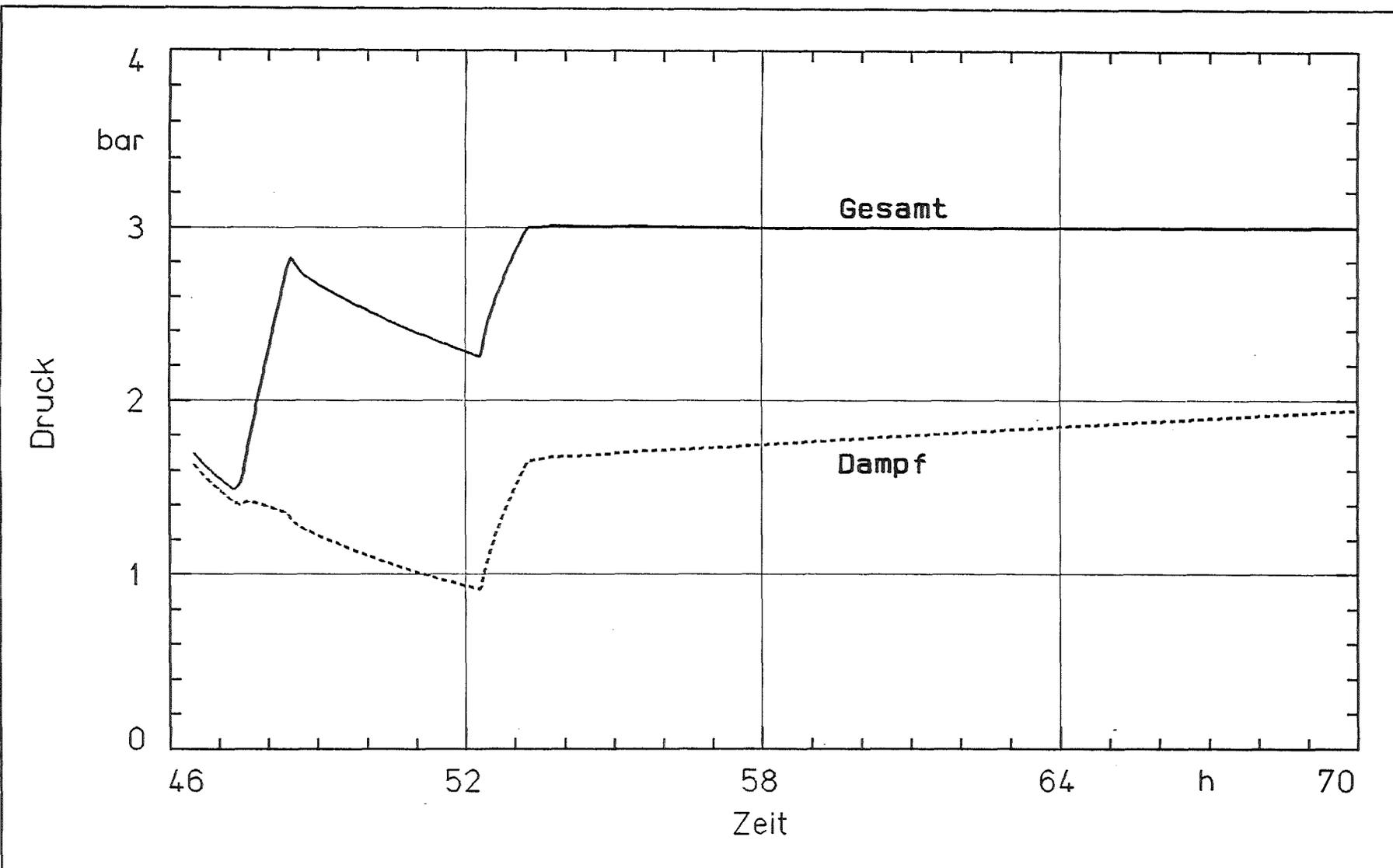


Abb.6.1.1: COCMEL Nachrechnung : Gesamt- und Dampfpartialdruck

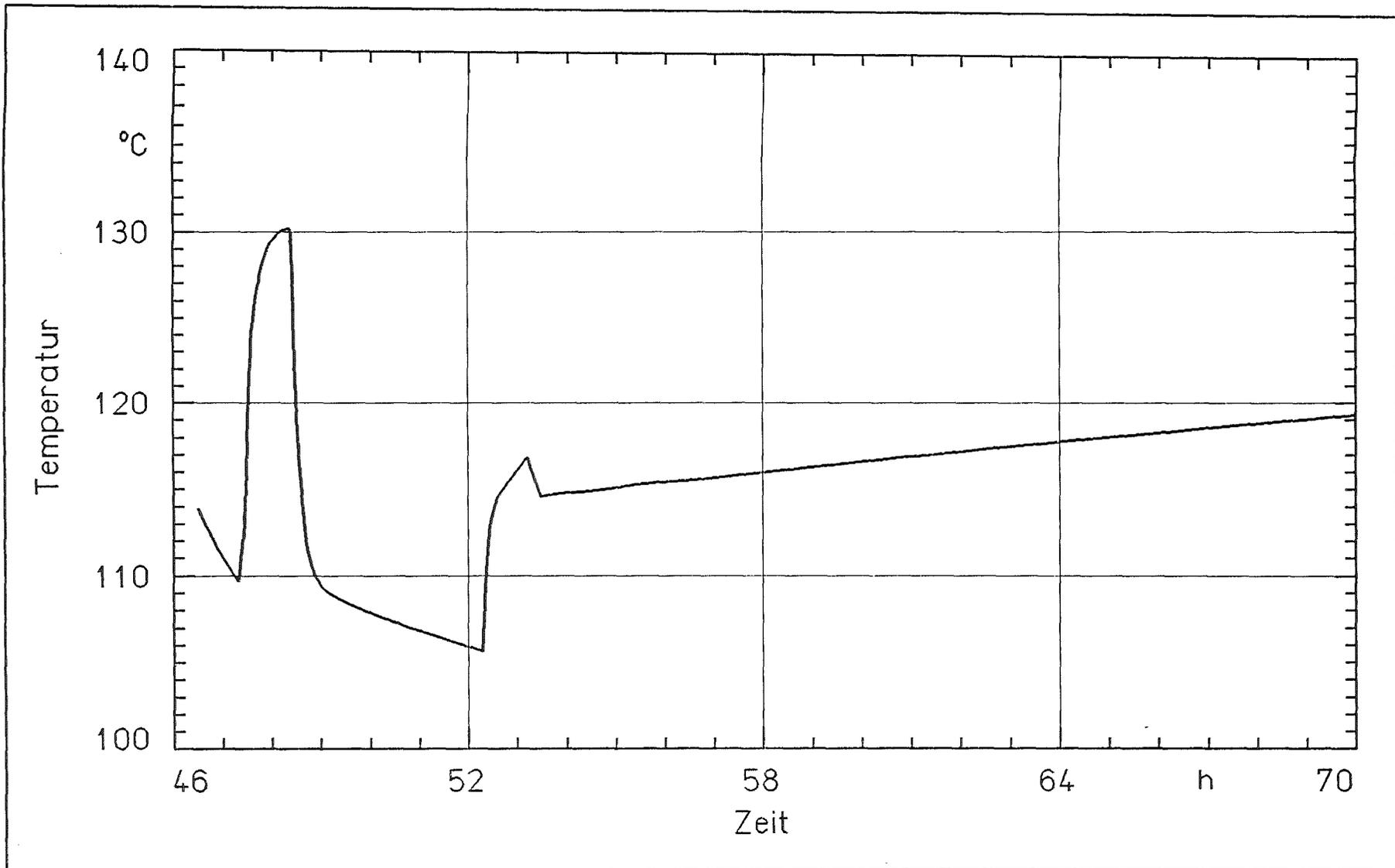


Abb.6.1.2:

COCMEL Nachrechnung : mittlere Gastemperatur

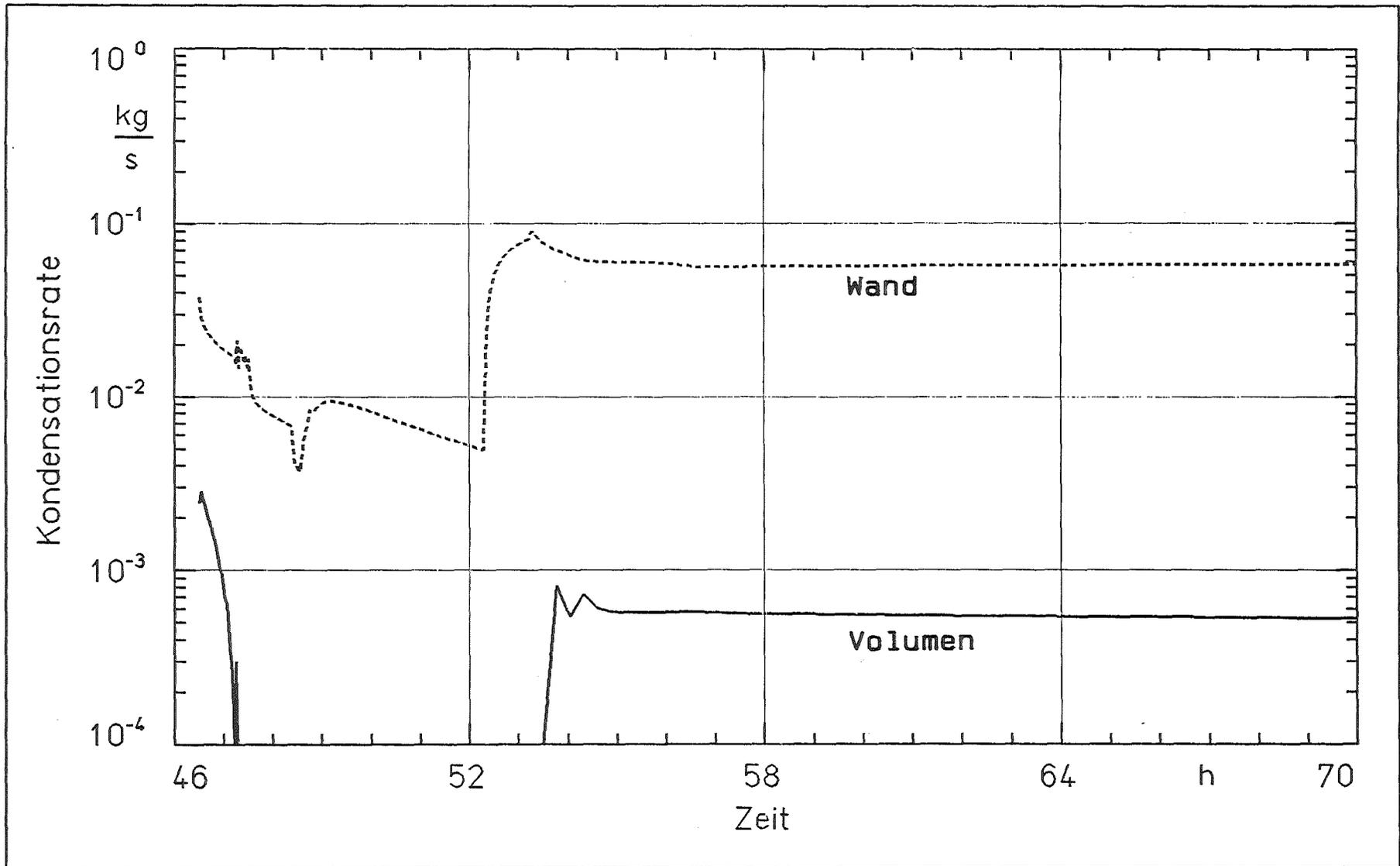


Abb.6.1.3:

COCMEL Nachrechnung : Kondensationsraten

## 6.2 Integrierte Mehrraumrechnungen (GRS)

Begleitend zu den DEMONA-Versuchen wurden im Berichtszeitraum wiederum Mehrraumrechnungen mit dem integrierten Containmentcode FIPLOC und einer Mehrraum-Version des Aerosolverhaltensmodells NAUA durchgeführt. Mit den Rechnungen wurden (1) die experimentelle Versuchsauslegung unterstützt, (2) die Meßergebnisse vor allem im Hinblick auf die Wechselwirkung zwischen Thermohydraulik und Aerosolverhalten analysiert und (3) die Rechenmodelle verifiziert.

Zum Einsatz kam die sog. Basisversion FIPLOC-MOD2/85 /1/. Mit diesem Mehrraummodell lassen sich lokal unterschiedliche Atmosphärenzustände und natürliche Transportvorgänge durch Konvektion in unterteilten Containments beschreiben.

Die DEMONA-Versuche B2 bis A8 wurden aus verschiedenen Gründen in einer Quasi-Einraumgeometrie durchgeführt. Dennoch zeigen diese Versuche mehr oder weniger ausgeprägte lokale Konzentrationsunterschiede für Dampf und Luft aber auch für Aerosol während der Phase der ca. einstündigen Aerosoleinspeisung. Eine hinreichende Kenntnis der thermohydraulischen Vorgänge zu dieser Zeit ist auch für die Modellierung des anschließenden Aerosolabbaus von Bedeutung.

Im folgenden werden die FIPLOC-Rechnungen und Ergebnisse zu dem DEMONA-Versuch A7 und dem einzigen Versuch in Mehrraumgeometrie A9 kurz beschrieben.

---

/1/ H. Jahn, G. Weber, T. Pham  
Description of the Mod2/85 Versions of the RALOC/FIPLOC Family,  
Part 1: Code System  
GRS-A-1315 (Dez. 1986)

### 6.2.1 FIPLOC-Nachrechnung des Versuches A7

Im DEMONA-Versuch A7 wurde während der Aerosoleinspeisung eine ausgeprägte Schichtung der Atmosphäre mit einem "Auffüllen" des Containments mit Aerosol von unten nach oben beobachtet. Das oberste Photometer in der Kuppel registrierte die erst 50 Minuten nach Beginn der Einspeisung Aerosol.

Für die FIPLOC-Rechnung wurde aus Rechenzeitgründen eine aus 7 Zonen bestehende Diskretisierung gewählt. Sie umfaßt 5 atmosphärische Zonen und 2 sog. Sumpfbzonen (Abb. 6.2.1). Die Einspeisung von Dampf bzw. Luft und Aerosol erfolgt in Zone 1. Die Kühlung einer eingebauten Fernsehkamera stellte eine nicht mehr zu vernachlässigende Wärmesenke dar. Die durch sie abgeführte Wärme wurde in der Rechnung der Zone 4 entzogen.

Der Verlauf von Atmosphärentemperatur und Gesamtdruck stimmen im allgemeinen mit den Meßwerten gut überein. Die berechnete Dampfsättigung zeigt nur im Zentralraum und nur während der Aerosoleinspeisung eine Überhitzung.

Trotz der eingeschränkten lokalen Auflösung infolge der relativ geringen Diskretisierung zeigt die FIPLOC-Rechnung deutlich, daß sich die atmosphärischen Strömungsverhältnisse mit Beginn der Aerosoleinspeisung drastisch ändern. Vor der Einspeisung läuft die Strömung aus dem Zentralraum nach oben in die Kuppel und von dort hinunter in den Ringraum und über die Bananenräume wieder in den Zentralraum (Abb. 4.2.2). Mit der Aerosoleinspeisung dreht sich die Strömung um. Sie führt nunmehr aus dem Zentralraum über die Bananenräume in den Ringraum und von dort nach oben in die Kuppel, um dann wieder nach unten in den Zentralraum zurückzukehren. Diese Strömungsumkehr tritt erst einige Minuten nach Einsetzen der Aerosoleinspeisung auf, was das frühe, kurzzeitige Ansprechen des Photometers II in der Kuppel erklärt.

/2/ W. Schöck, et.al.  
DEMONA-Jahresbericht 1985  
KfK 4182 (Dezember 1986)

### 6.2.2 FIPLOC-Nachrechnung des Versuches A9

Zur Auslegung des DEMONA-Mehrraumversuches A9 wurde eine FIPLOC-Vorausrechnung mit einer 6 Zonen-Diskretisierung durchgeführt /2/. Die Ergebnisse dieser Rechnung ließen erwarten, daß nach der transienten Phase mit der wieder einsetzenden Dampfeinspeisung (Phase 4) sowohl der Zentralraum als auch die Bananenräume von Aerosol freigespült werden würden. Dieses Rechenergebnis steht im Widerspruch zu den Meßergebnissen, die zeigen, daß sich die Aerosolkonzentrationen im Zentralraum und in den Bananenräumen in etwa ähnlich wie im Kuppelbereich entwickelt haben. Es wurde daher eine detaillierte Nachrechnung mit einer auf 16 Zonen erweiterten Diskretisierung, bestehend aus 12 atmosphärischen und 4 Sumpzonen (Abb. 6.2.3) durchgeführt. Die beobachteten Phänomene konnten nunmehr sehr gut analysiert werden.

Die gerechneten Temperaturen zeigen im Vergleich mit den gemessenen eine gute Übereinstimmung im Gesamtverlauf (Abb. 6.2.4). Im einzelnen konnte insbesondere die Temperaturverteilung im Einspeiseraum R1 + R3 gut simuliert werden. Allerdings wurden die vergleichsweise niedrigen Atmosphärentemperaturen im Ringraum - sie sind die Folge einer lokalen Luftanreicherung - von der Rechnung deutlich überschätzt. Der Grund dafür ist sehr wahrscheinlich in einer Überschätzung der Leckage aus dem Containment zu suchen. Dies ist auch die Ursache für den etwas zu groß berechneten Druckabfall während der transienten Phase.

Der Verlauf der Dampfsättigung ist in guter Übereinstimmung mit den Meßwerten. Er zeigt, daß der Einspeiseraum R1 während der Aerosoleinspeisung praktisch austrocknet und die Dampfsättigung im Bananenraum R7 auf ca. 20 % absinkt.

Die mit FIPLOC simulierten Strömungsvorgänge erklären die Aerosoltransport- und Verteilungsvorgänge sehr anschaulich. Es konnten eine sogenannte "innere" Konvektionswalze, die die Räume R1, R3 und R8 umfaßt und eine sog. "äußere" Konvektionswalze durch die Bananenräume R5, R6, R7 und R8 identifiziert werden. Sie sind über den gemeinsamen Raum R8 untereinander verbunden.

Während der Einspeisephase wird Aerosol über die innere Konvektionswalze in den Raum R8 transportiert. Von dort gelangt Aerosol direkt über den Raum R7, aber auch über die Räume R6 und R5 weiter in die Kuppel (Abb. 6.2.5). Die äußere Konvektionswalze ist also während der Aerosoleinspeisephase aufgebrochen und zwei Kolbenströmungen führen aus dem R8 in die Kuppel (Abb. 6.2.6). Diese Strömungssituation ändert sich mit dem Ende der Einspeisephase entscheidend. Die äußere Konvektionswalze beginnt wieder zu arbeiten und bleibt auch nach Beginn der Dampfeinspeisung in der Phase 4 erhalten (Abb. 6.2.7). Aerosolbeladene Atmosphäre gelangt aus der Kuppel über die Bananenräume R5 und R6 in den Knotenraum R8. Von dort transportiert die innere Konvektionswalze Aerosol in den Zentralraum zurück, in den nunmehr Dampf eingespeist wird (Abb. 6.2.8). Die Dampfeinspeisung ist demzufolge nicht stark genug, die Konvektionswalzen aufzubrechen.

Diese FIPLOC-Ergebnisse zeigen anschaulich, warum das Aerosol trotz Mehrraumgeometrie relativ gleichmäßig (gemessene Konzentrationsunterschiede  $\leq$  Faktor 20) im Containment verteilt worden ist. Sie erklären darüber hinaus, warum das Photometer VII im R6, der ursprünglich als "Totraum" eingestuft wurde, wider Erwarten äußerst hohe Aerosolkonzentration gemessen hat.

### 6.2.3 Interpretation der FIPLOC-Ergebnisse

Die Rechnungen mit FIPLOC bzw. FIPLOC/NAUA stellen bislang die einzigen Mehrraumrechnungen zu DEMONA-Versuchen dar. Neben einer hinreichend genauen Simulation von lokal unterschiedlichen thermodynamischen Zuständen werden auch Aerosoltransport- und Verteilungsvorgänge adäquat beschrieben.

Eine Grundvoraussetzung für Aerosol-Einraumrechnungen ist die Gültigkeit der Annahme, daß zu jedem Zeitpunkt eine annähernd homogene Verteilung des Aerosols im Containment vorliegt. Dies setzt eine kräftige und umfassende Konvektionsströmung voraus. Bislang wurde dies stets postuliert, konnte aber für die Aerosolabbauphasen der DEMONA-Versuche B2 bis A8 erstmals durch die FIPLOC-Analysen hinreichend bestätigt werden.

Wie die experimentellen Befunde und Rechenergebnisse zum Mehrraumversuch A9 zeigen, können unter gewissen Bedingungen auch in diesen komplexen Geometrien gute Durchmischungsverhältnisse herrschen. Diese Ergebnisse hängen allerdings von der Versuchsanlage und der Fahrweise des Experiments ab und sind daher nicht ohne weiteres auf andere Verhältnisse übertragbar. Insbesondere scheint eine Extrapolation der Ergebnisse auf ein reales Containment ohne zusätzliche Mehrraum-Analysen nicht durchführbar.

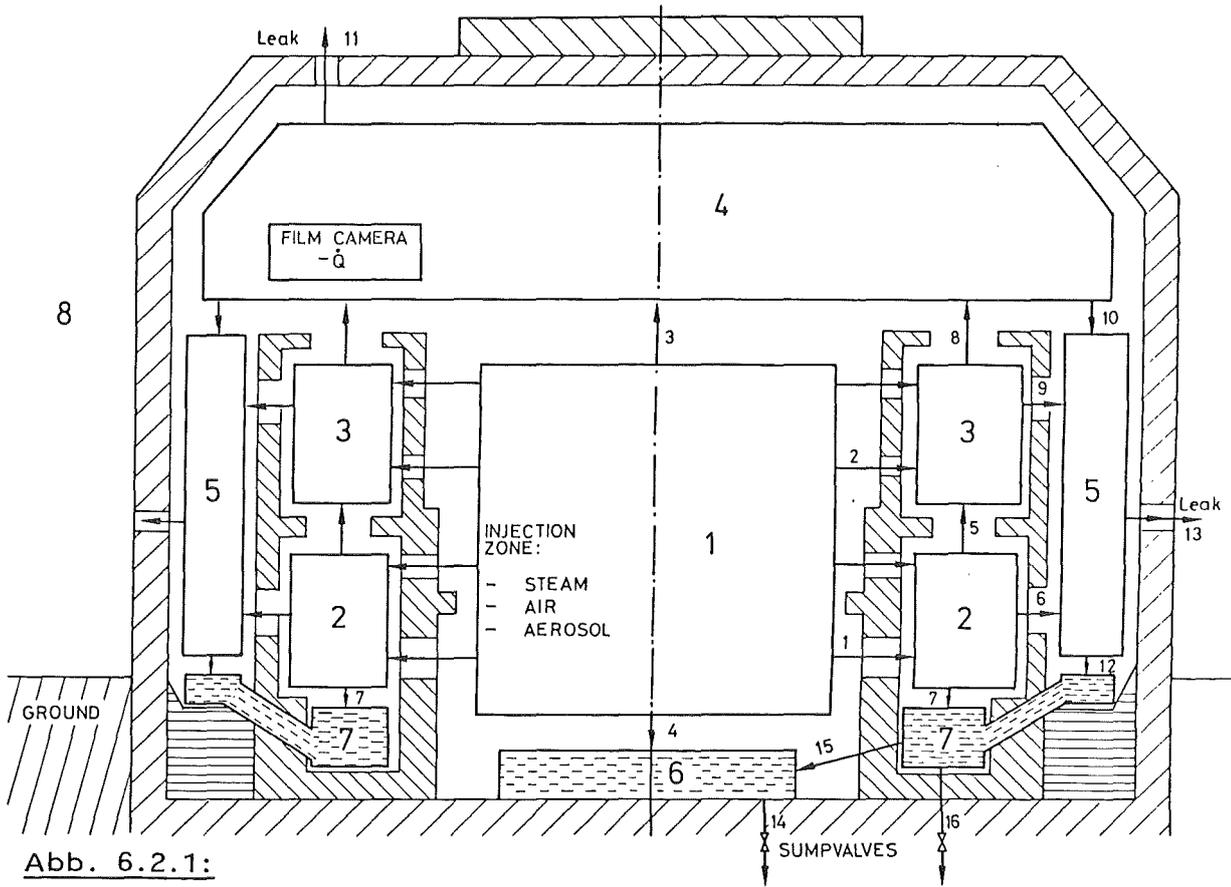


Abb. 6.2.1:

Diskretisierung des Battelle-Modellcontainers für FIPLOC- und FIPLOC/NAUA-Rechnung des DEMONA-Versuchs A7

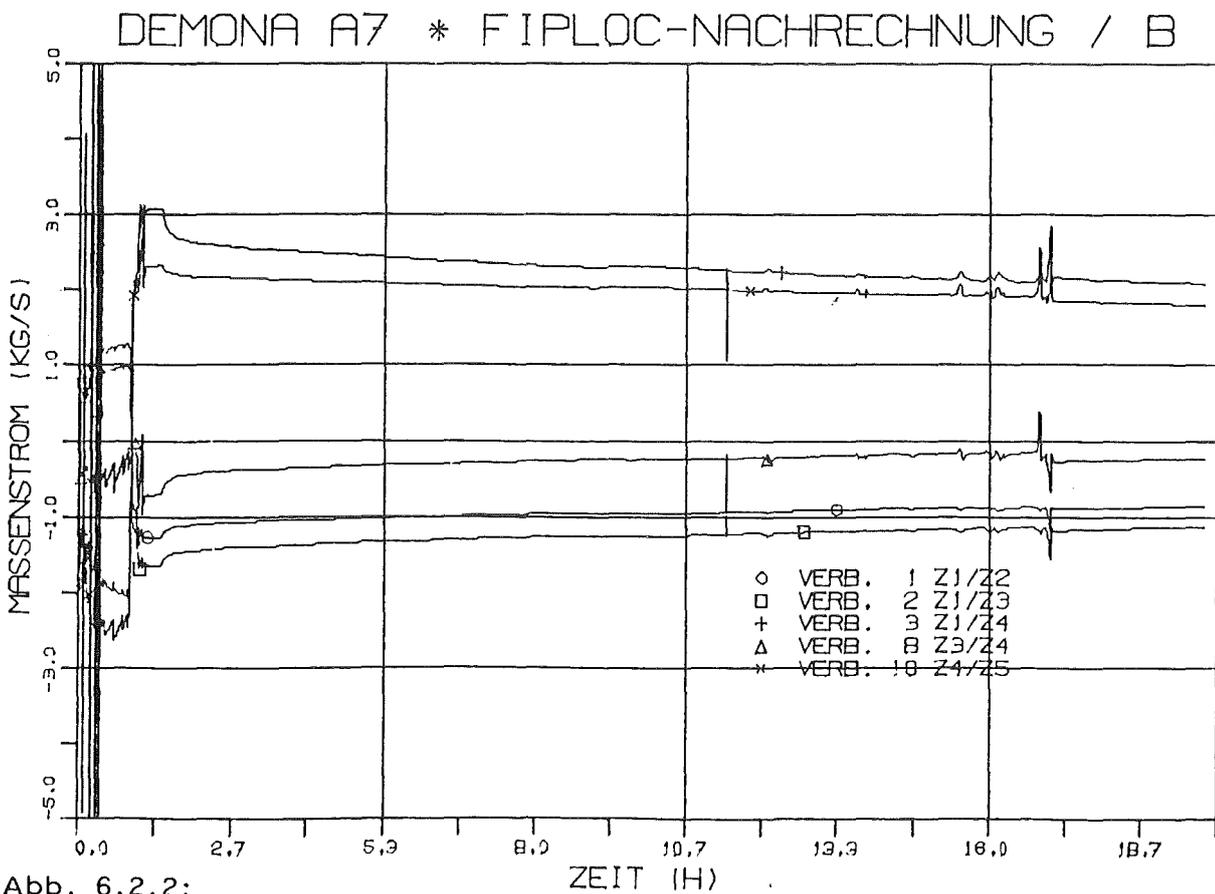


Abb. 6.2.2:

Versuch A7, berechnete atmosphärische Massenströme (pos.: in Definitionsrichtung, neg.: gegen Definitionsrichtung)



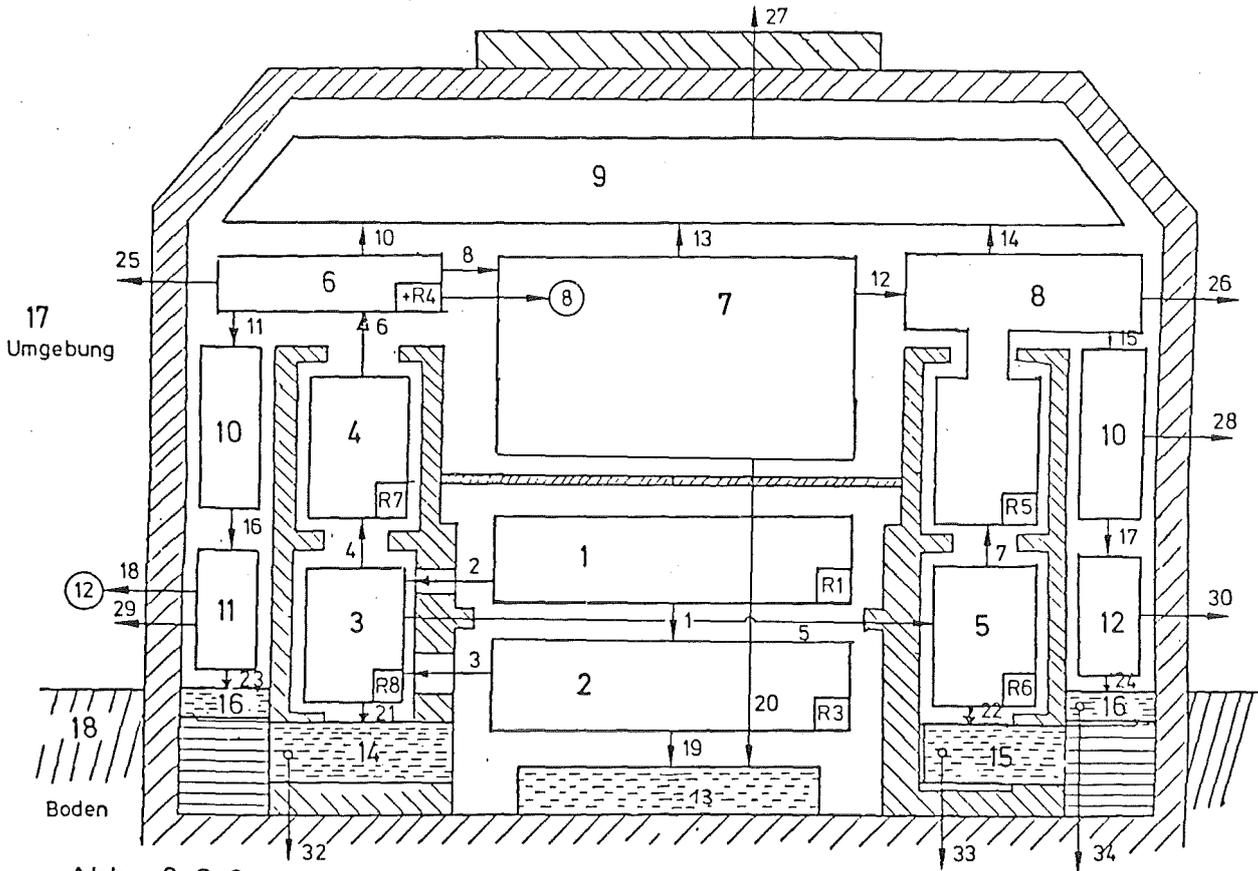


Abb. 6.2.3:

Diskretisierung des Battelle-Modellcontainments für FIPLOC- und FIPLOC/NAUA-Rechnung des DEMONA-Mehrraumversuches A9

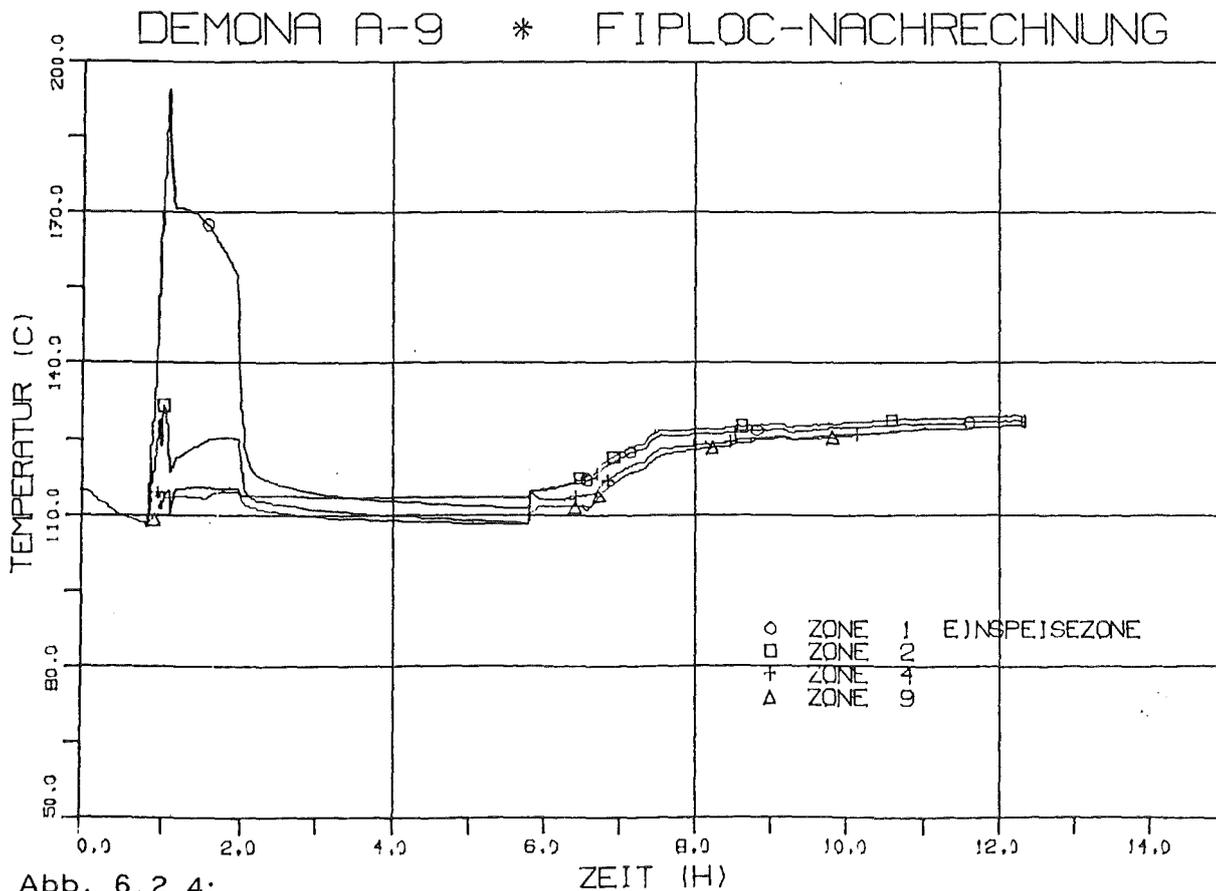


Abb. 6.2.4:

Versuch A9, berechnete lokale Temperaturverläufe



DEMONA A-9 \* FIPLOC-NACHRECHNUNG

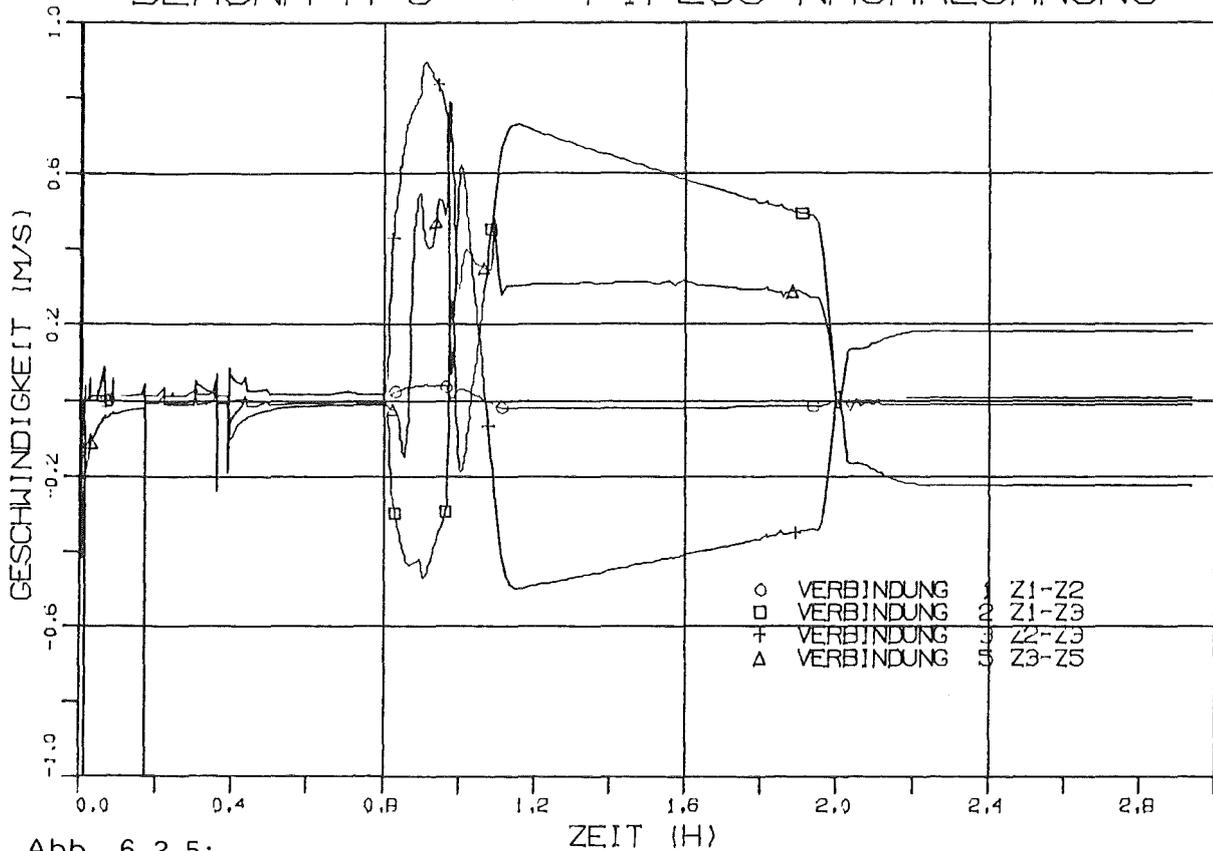


Abb. 6.2.5:

Versuch A9, berechnete atm. Geschwindigkeiten der "inneren" Konvektionswalze

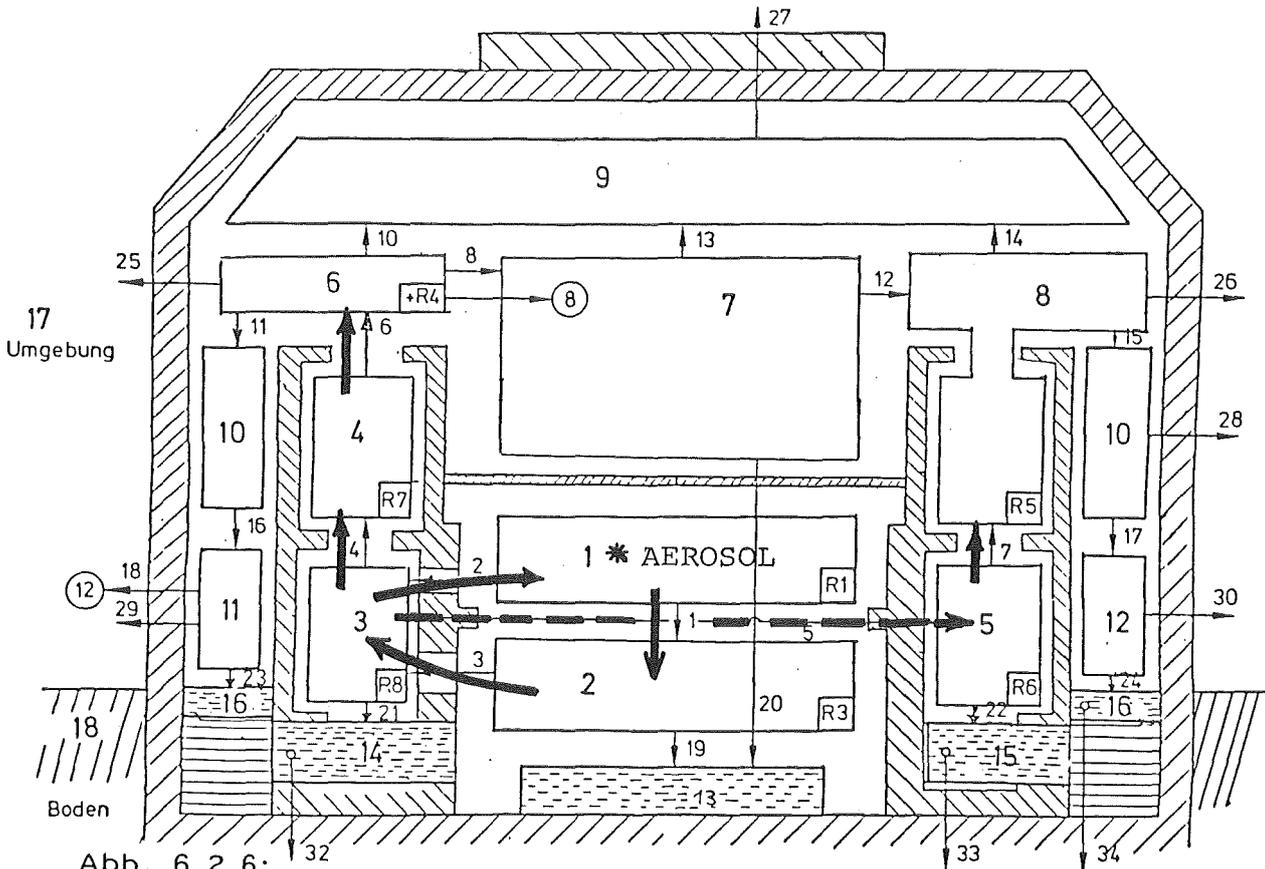


Abb. 6.2.6:

Versuche A9, berechnetes Strömungsprofil während des ersten Teils der Aerosoleinspeisephase



DEMONA A-9 \* FIPLOC-NACHRECHNUNG

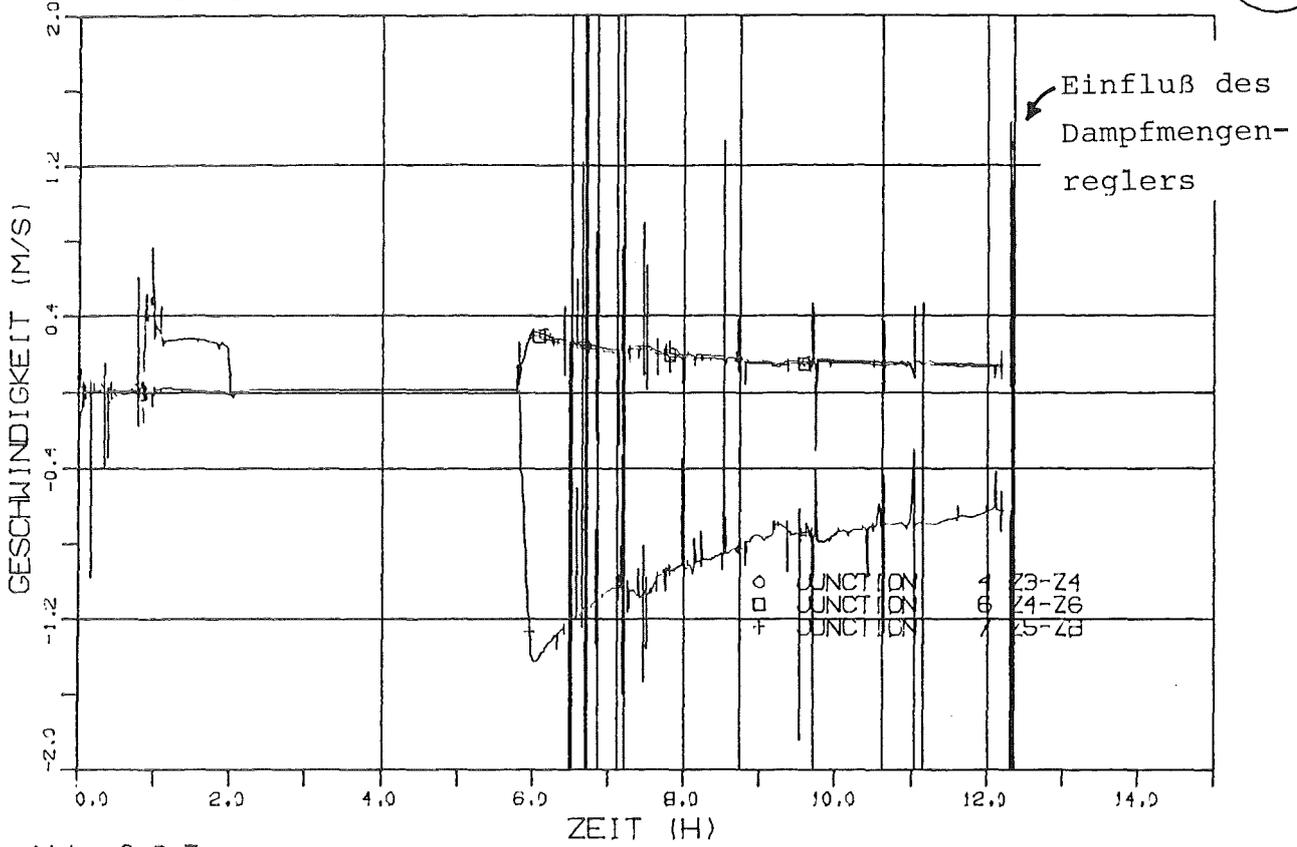


Abb. 6.2.7:

Versuch A9, berechnete atm. Geschwindigkeiten der "äußeren" Konvektionswalze

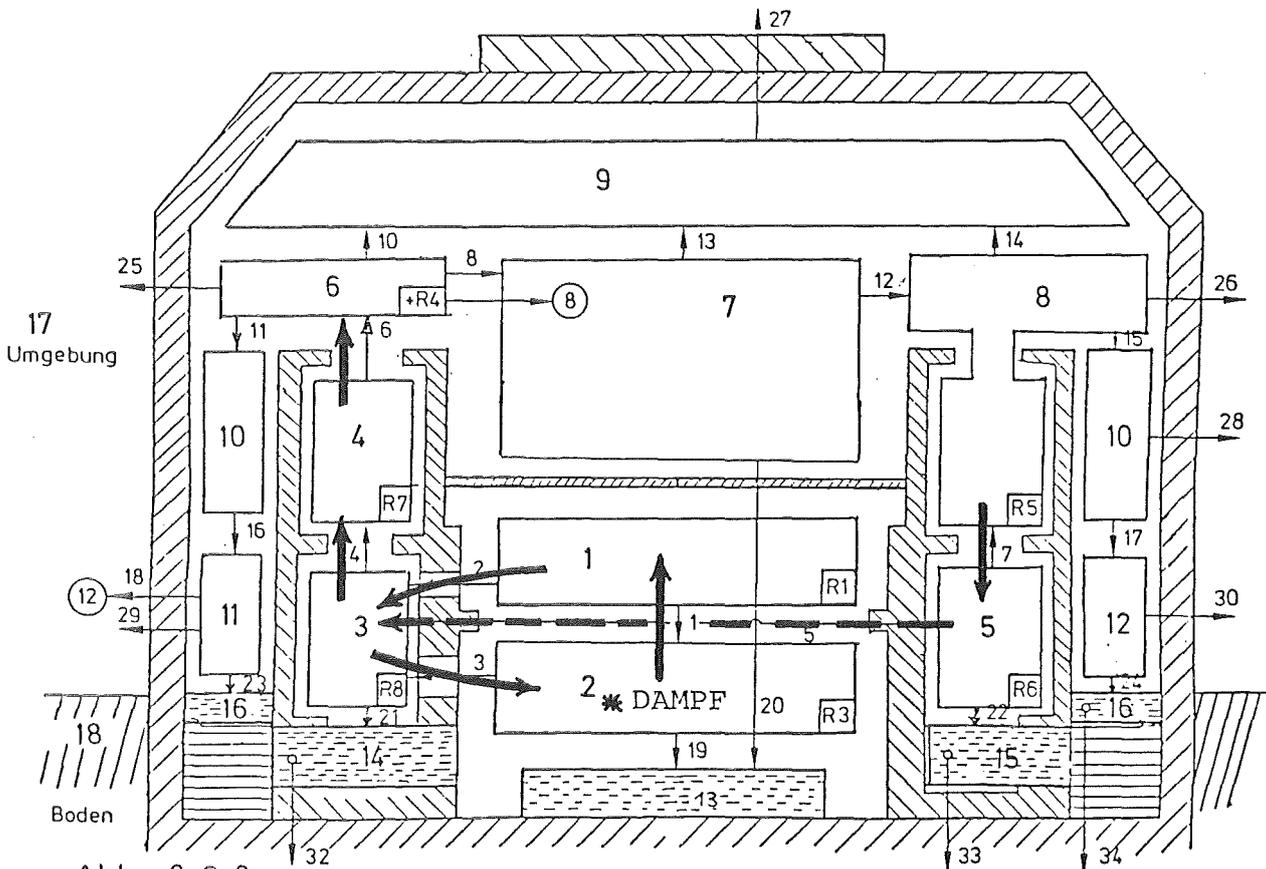


Abb. 6.2.8:

Versuch A9, berechnetes Strömungsprofil während der Phase 4 mit Dampfeinspeisung

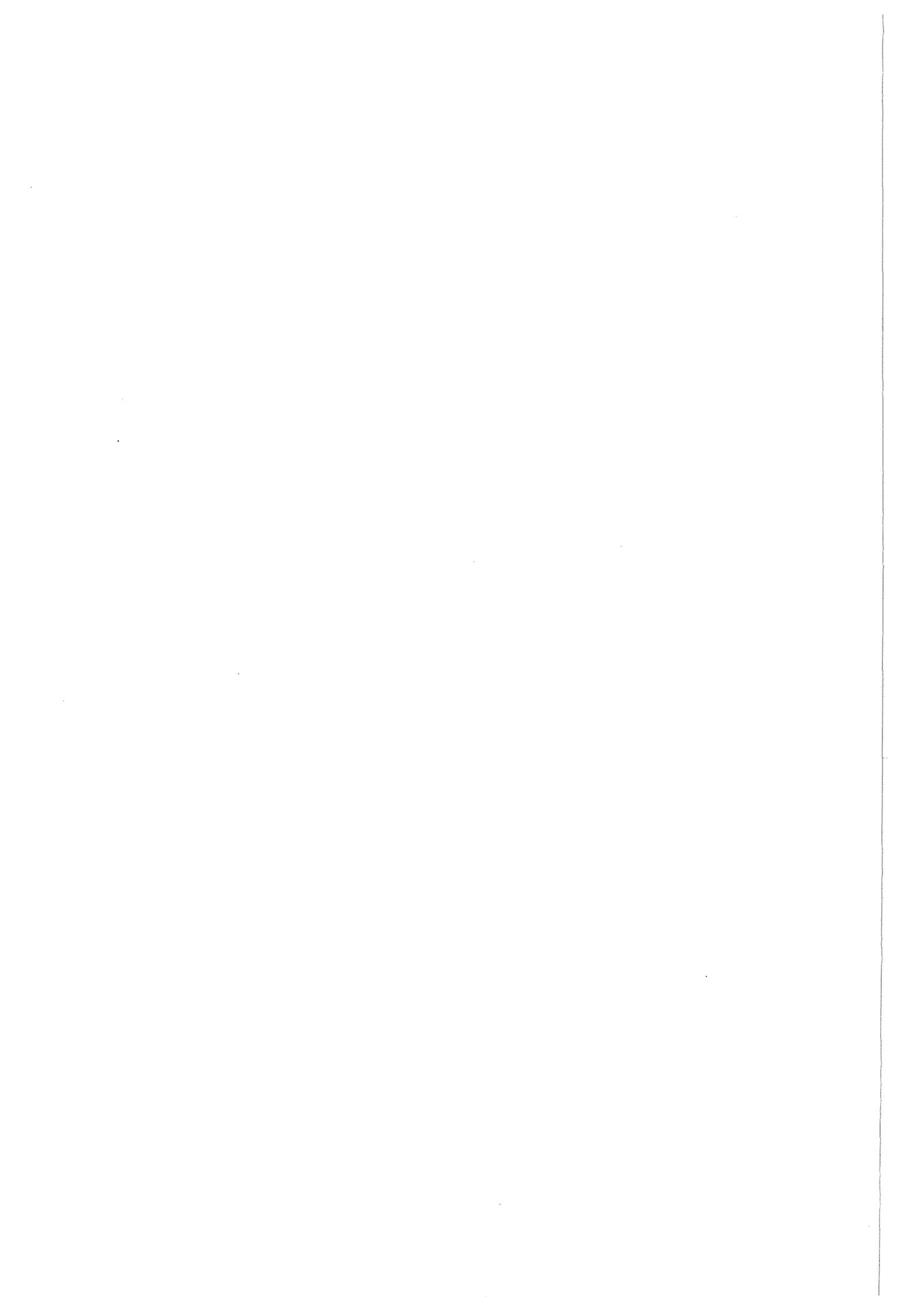
### 6.3. Aerosolverhaltensrechnungen

Im Berichtszeitraum wurden lediglich die beiden Versuche A8 und A9 durchgeführt, da das experimentelle DEMONA-Programm zur Jahresmitte '86 auslief. Das Aerosolmaterial war in beiden Fällen eine Mischung aus Eisenoxid und Zinnoxid. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag für den A8 auf der Überprüfung des Verhaltens von Mischerosolen und beim A9 auf der Auswirkung einer Multicompartment-Geometrie. Beide Versuche waren zudem wiederum Naßversuche, so daß auch hier die bereits im letzten Jahresbericht angesprochene Problematik durch die Addition der sowohl im COCMEL- als auch im NAUA-Code enthaltenen Vereinfachungen zum Tragen kommt.

Prinzipiell ist A8 die Wiederholung der Basisversuche B3/B4 unter Verwendung von Mischerosolen. Der Unterschied bei der Versuchsführung bestand zudem in der diskontinuierlichen Aerosolerzeugung bedingt durch den zeitweisen Ausfall der beiden Eisenoxidaerosolgeneratoren. Da aber, wie frühere Untersuchungen bereits zeigten, der genaue Verlauf der Aerosolerzeugung keine große Rolle spielt, kann A8 in eine Reihe mit B3/B4 und A7 (Wiederholung des Basisversuchs mit reinem Eisenoxidaerosol) gestellt werden und ist somit als gültiger Versuch im Sinne der Versuchsmatrix anzusehen. Wie die Abb. 2.2.1 zeigt, ergeben sich bezüglich des gemessenen Aerosolverhaltens keine großen Unterschiede zu B3/B4/A7. Alle drei Versuche werden durch die Dampfkondensation dominiert. Die NAUA-Nachrechnungen weichen dagegen wie bereits bei den Versuchen B5/B6 deutlich nach oben von den Meßwerten ab, was sich durch die im Vergleich zu früheren COCMEL-Rechnungen kleineren Volumenkondensationsraten erklären läßt. Parametrisch durchgeführte Rechnungen mit erhöhten Kondensationsraten, die dann auch zu deutlich verbesserter Übereinstimmung mit der gemessenen Flüssigwasserkonzentration führten, verminderten die Unterschiede zu den Meßergebnissen erheblich.

Von der experimentellen Durchführung her deutlich verschieden ist dagegen der Mehrraumversuch A9. So zeigten sich während der Aerosoleinspeisephase Konzentrationsunterschiede in den einzelnen Räumen, die später aber rasch verschwanden. Es konnte also erwartet werden, daß das grundsätzliche Verhalten der Aerosole sich nicht wesentlich von den Einraumversuchen unterscheidet und daß die Einraummodelle für die Nachrechnung ausreichend sind. Wie die Abb. 2.2.2 zeigt, ist dies der Fall, d.h. es sind so gut wie keine signifikanten Unterschiede zu den früheren Versuchen insbesondere dem Versuch A8 mit dem gleichen Aerosolmaterial zu entdecken.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß alle Rechnungen, die mit der Kombination der beiden Einraummodelle COCMEL und NAUA durchgeführt wurden, auf der sicheren Seite liegen. Die auftretenden Abweichungen zu den experimentellen Ergebnissen erklären sich durch Schwierigkeiten bei der Modellierung der Volumencondensation, worauf die Ergebnisse der Flüssigwasserkonzentrationsmessungen hindeuten.



## 7. Veröffentlichungen im Berichtsjahr

W.Schöck

DEMONA Jahresbericht 1985

KfK 4182, BF-R65.523-12, EIR-592, GRS-A-1252, KWU-R-917/86/107 (1986)

H.Bunz, W.Schikarski, W.Schöck

DEMONA - Aerosol behavior experiments under simulated conditions  
of an accident in a nuclear power plant

Aerosols - Formation and reactivity, Proceedings of the Second  
International Aerosol Conference, Berlin, September 22-26, 1986  
Pergamon Oxford, 1986, S. 1074-1077

H.Ruhmann, M.Peehs

A high efficiency aerosol generator for DEMONA

Aerosols - Formation and reactivity, Proceedings of the Second  
International Aerosol Conference, Berlin, September 22-26, 1986  
Pergamon Oxford, 1986, S. 1070-1073

W.Schöck, H.Bunz, W.Schikarski, J.P.Hosemann, D.Haschke,  
A.Fromentin, R.Taubenberger, T.F.Kanzleiter, Th.Schröder,  
M.Fischer, H.Ruhmann, M.Peehs, G.Weber

Results of the DEMONA Program

Transactions of the 4th International ENS/ANS Conference,  
Genf, 1.-6. 6. 1986, Vol.3, S. 219-224

T.F.Kanzleiter, Th.Schröder, H.Ruhmann, M.Peehs

DEMONA experiments - Results from aerosol generation  
and long term thermal-hydraulics

Transactions of the 4th International ENS/ANS Conference,  
Genf, 1.-6. 6. 1986, Vol.3, S. 443-448

W.Schöck, H.Bunz, M.Koyro

Experimente zur Verifikation des NAUA-Codes

Abschlußkolloquium des Projekts Nukleare Sicherheit 1986

KfK 4170, S.381-398, (1986)

H.Bunz, W.Schöck

Recent results of DEMONA experiments and comparison with NAUA calculations  
Annual USNRC-BMFT Information Exchange Meeting on Core Meltdown Research,  
Köln, 13./14.10.1986

G.Weber

Calculations on DEMONA and LACE experiments  
with the integrated system code FIPLOC

Annual USNRC-BMFT Information Exchange Meeting on Core Meltdown Research,  
Köln, 13./14.10.1986

D.Haschke, A.Fromentin, W.Schöck, J.P.Hosemann,  
T.Kanzleiter, T.Schröder, M.Peehs, H.Ruhmann  
Containment aerosol removal in condensing atmospheres -  
Results of DEMONA tests  
International Topical Meeting on Thermal Reactor Safety,  
San Diego CA, 2.-6.2. 1986

T.Kanzleiter, L.Wolf, W.Schöck, H.Bunz, D.Haschke,  
J.P.Hosemann, M.Peehs, H.Ruhmann, M.Fischer, G.Weber  
Results from DEMONA aerosol experiments  
14th Water Reactor Safety Research Information Meeting,  
NBS, Gaithersburg MD, 27.-31. 10. 1986

W.Schöck, H.Bunz, M.Koyro  
Folgerungen aus dem DEMONA-Programm hinsichtlich  
der Abschätzung des Quellterms beim Kernschmelzen  
Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik 1987  
Karlsruhe, 2.-4. 6. 1987, S. 235-238

T.Kanzleiter, B.Fischer  
DEMONA-Versuche, Ergebnisse des Versuchs B5,  
Technischer Fachbericht BIeV-R65.523-30-5,  
Battelle-Institut Frankfurt, Juni 1986

T.Kanzleiter, B.Fischer  
DEMONA-Versuche, Ergebnisse des Versuchs B6,  
Technischer Fachbericht BIeV-R65.523-30-6,  
Battelle-Institut Frankfurt, August 1986

T.Kanzleiter, B.Fischer  
DEMONA-Versuche, Ergebnisse des Versuchs A7,  
Technischer Fachbericht BIeV-R65.523-30-7,  
Battelle-Institut Frankfurt, September 1986

B.Fischer  
DEMONA-Versuche, Ergebnisse des Versuchs A8,  
Technischer Fachbericht BIeV-R65.523-30-8,  
Battelle-Institut Frankfurt, September 1986

T.Kanzleiter  
DEMONA-Versuche, Ergebnisse des Mehrraumversuchs A9  
Technischer Fachbericht BIeV-R65.523-30-9,  
Battelle-Institut Frankfurt, September 1986