

KfK 3636
EIR 502
Dezember 1983

DEMONA
Forschungsprogramm zur
Demonstration nuklearen
Aerosolverhaltens
— Grundlagen, Ziele, Auslegung —

zusammengestellt von
W. O. Schikarski
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3636

EIR 502

D E M O N A

Forschungsprogramm zur Demonstration nuklearen Aerosolverhaltens
- Grundlagen, Ziele, Auslegung -

zusammengestellt von

W. O. Schikarski

mit Beiträgen von

H. Bunz, K. Hassmann**, T. Kanzleiter***, O. Mercier*,
M. Peehs**, H. Ruhmann**, W. O. Schikarski, W. Schöck

- * Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
- ** Kraftwerk Union, Erlangen
- *** Battelle-Institut, Frankfurt/Main

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Das Forschungsprogramm DEMONA dient der Demonstration nuklearen Aerosolverhaltens durch Experimente in großem Maßstab. Es wird vom Kernforschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit EIR, KWU und Battelle durchgeführt. Die Rechenprogramme NAUA zur Beschreibung des Aerosolverhaltens in kondensierender Atmosphäre und COCMEL zur Beschreibung der Thermodynamik werden dargestellt. Die DEMONA-Experimente werden im Modell-Containment von Battelle-Frankfurt durchgeführt. Es werden die Ziele des Programms und die zugehörigen Experimente beschrieben. Die umfangreiche Instrumentierung zur zeitabhängigen Messung der Aerosolparameter und anderer Größen wird dargestellt. Eine Übersicht über den zeitlichen Ablauf des DEMONA-Programms wird gegeben.

DEMONA - Research program for the Demonstration of Nuclear Aerosol Behaviour - Scope, objective, facilities

A research program to demonstrate the behaviour of nuclear aerosols in a large confined volume, as predicted by the aerosol code NAUA, is being carried out in the model containment of Battelle-Frankfurt in cooperation with KfK, EIR and KWU. The latest versions of the aerosol code NAUA and the thermodynamic containment code COCMEL are described together with the planned tests, the model containment and other facilities used. The objectives of the DEMONA program and the related test matrix are discussed. The extensive instrumentation for aerosol measurements under condensing conditions are described. The time schedule for the DEMONA tests and the related evaluation is given.

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Bisherige Entwicklung von Aerosolverhaltens-Codes	2
2.1 Modelltheorie	2
2.1.1 Grundlagen	2
2.1.2 Anwendung der Modelltheorie (Aerosol-Codes)	6
2.2 Experimente	8
3. Aerosol- und Thermodynamik-Codes im DEMONA-Programm	10
3.1 NAÚA-Code	10
3.2 COCMEL-Code	19
3.2.1 Modellierung des Gasraumes	19
3.2.2 Modellierung des Sumpfwasserraumes	20
3.2.3 Gleichungssystem des COCMEL-Codes	20
3.2.4 COCMEL Programmerweiterungen im DEMONA-Programm	24
4. Ziele des DEMONA-Programms	25
5. Durchführung des DEMONA-Programms	28
5.1 Die Versuchsanlage	28
5.1.1 Beschreibung des Modellcontainments	28
5.1.2 Betriebsweise der Versuchsanlage	36
5.2 Aerosolmeßtechnik	46
5.2.1 Filterprobenanlage	50
5.2.2 Größenklassierende Geräte	50
5.2.3 Tröpfchenspektrometer	51
5.2.4 Fotometer	51
5.2.5 Kondensatmessung	52
5.2.6 Kontinuierliche Messung der Massenkonzentration und der Größenverteilung	52
5.2.7 Schleusen (Meßblanzen)	52

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
5.2.8 Datenerfassung	54
5.3 Aerosolerzeugung	54
5.3.1 Grundlagen	54
5.3.2 Ausführung der Aerosolgeneratoren	55
5.4 Das Versuchsprogramm	57
6. Schlußbemerkung	60
7. Literatur	63
8. Anhang	66
Liste der verwendeten Symbole	66

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. Während zunächst die Probleme bei schnellen Brutreaktor-Kraftwerken analysiert wurden /1/, /2/, begannen Untersuchungen zum nuklearen Aerosolverhalten in schweren Störfällen von LWR-Kernkraftwerken 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 des Committee on the Safety of Nuclear Installation (CSNI) der OECD Nuclear Energy Agency (NEA) dargestellt /3/, /4/.

Die bisherigen Forschungsprogramme zum Aerosolverhalten im KfK wurden im Labor- bzw. Technikums-Maßstab durchgeführt (siehe Abschnitt 2), wobei neben den Experimenten die modelltheoretische Entwicklung zur weitgehenden Verifikation der Aerosolverhaltens-Rechenprogramme (Aerosol-Codes) führte /5/. 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. Derzeit wird die Version NAUA-Mod5 dokumentiert, die alle wichtigen Aerosolprozesse (Sedimentation, Diffusion, Diffusiophorese, Brown'sche und Gravitationskoagulation, Kondensation) berücksichtigt.

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 DWR realistisch und genügend genau zu beschreiben. Wegen der engen Kopplung von Thermodynamik und Aerosolverhalten wird das DEMONA-Programm auch zur Zusammenfassung der Aerosol-(NAUA) und Thermodynamik-(COCMEL) -Codes einen Beitrag leisten.

Der folgende Bericht behandelt Grundlagen, Ziele und Auslegung der Experimente sowie die modelltheoretischen Arbeiten, die im DEMONA-Programm vorgesehen sind. Das Programm hat 1983 begonnen und wird 1985 abgeschlossen sein. Folgende Institutionen leisten wissenschaftliche und technische Beiträge:

- Kernforschungszentrum Karlsruhe, Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik I, in Zusammenarbeit mit der Projektleitung des Projektes Nukleare Sicherheit

- Kraftwerk-Union Erlangen

- Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung Würenlingen

- Battelle-Institut Frankfurt/Main.

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

2. Bisherige Entwicklung von Aerosolverhaltens-Codes

2.1 Modelltheorie

2.1.1 Grundlagen

Ein polydisperses Aerosolsystem, wie es sowohl im Containment eines LWR nach einem schweren hypothetischen Unfall als auch in den geplanten DEMONA-Experimenten zu erwarten ist, ist dadurch gekennzeichnet, daß eine große Anzahl Partikeln unterschiedlicher Masse und möglicherweise auch unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und geometrischer Form in einem Trägergas dispergiert sind. Der Aggregatzustand der Partikeln selbst kann dabei flüssig und/oder fest sein. Diese Partikeln sind eine Reihe von physikalischen Prozessen unterworfen. Diese sind:

- a) Kräfte auf die Partikeln aufgrund äußerer Felder, z. B. Gravitation, elektrische Felder
- b) Kräfte auf die Partikeln, die vom umgebenden Trägergas ausgeübt werden. Diese Kräfte können ihren Ursprung in einer im Trägergas vorhandenen Konvektion, in den zufälligen Stößen mit den Gasmolekülen aufgrund derer thermischen Bewegung und in Diffusionsströmen von Gasmolekülen aufgrund von räumlichen Unterschieden im Partialdruck einzelner Komponenten des Trägergases haben.
- c) Wechselwirkung der einzelnen Aerosolpartikeln untereinander, die sich durch Stöße zwischen den Partikeln aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten ergeben. Diese verschiedenen Geschwindigkeiten ergeben sich aus dem unterschiedlichen Antwortverhalten der einzelnen Partikeln auf die unter Punkt a) und b) genannten Kräfte. Da die Partikeln bei einem Stoß mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aneinander haften bleiben (Koagulation), verändert sich dadurch das Größenspektrum der Partikeln und damit ihr Verhalten gegenüber allen übrigen Prozessen.
- d) Absorption und Desorption von Einzelmolekülen und kleinen Molekülverlusten. Auch dies führt zu einer Veränderung des Größenspektrum mit den unter Punkt 3 erwähnten Auswirkungen
- e) Wechselwirkung der Partikeln mit makroskopischen Oberflächen. Hier kommen Absorption und Desorption von Partikeln in Frage. Da aufgrund der für kleine Partikeln sehr starken van-de-Vaals-Kräfte die Absorption die Desorption weit überwiegt, wirken Oberflächen als Partikelsenken. Wiederablösung bereits abgeschiedener Partikeln etwa aufgrund starker Konvektion ist nur für sehr große Partikeln möglich. Den Transport zu den Oberflächen bewirken die unter Punkt a) und b) genannten Kräfte.

Da es nun extrem aufwendig wäre, das Verhalten eines Aerosolsystems in voller Allgemeinheit zu beschreiben, da dazu die Lösung der Bewegungsgleichungen sämtlicher Einzelpartikeln (bis zu $10^9/\text{cm}^3$) notwendig wäre, ist mittels geeigneter Vereinfachungen ein praktisch lösbares Gleichungssystem zu konstruieren. Diese Vereinfachungen sollen im folgenden kurz beschrieben werden:

- I Anstelle der Verfolgung von Einzelpartikeln soll das Aerosolsystem durch eine Dichtefunktion $n(r, \vec{R}, t)$ beschrieben werden, wobei $n(r, \vec{R}, t)$ die Dichte der Aerosolpartikeln an Ort \vec{R} in Volumenelement 01^3R zur Zeit t mit einer Größe zwischen r und $r + dr$ bedeuten soll. Der Begriff der Größe soll weiter unten noch etwas erläutert werden. Diese Vereinfachung ist wegen der großen Zahl von Partikeln im Volumen gerechtfertigt, so daß die diskrete Größenverteilung der Einzelpartikeln in eine kontinuierliche übergeht.
- II Da in den meisten Fällen die Konvektion im Volumen wenig bekannt ist, diese aber in die Lösung der ortsabhängigen Gleichung für $n(r, \vec{R}, t)$ / 6 / eingeht, wird Konvektion nur indirekt dadurch berücksichtigt, daß man annimmt, daß Partikeln jeder Größe aufgrund des durchmischenden Einflusses der Konvektion im ganzen Volumen gleichmäßig verteilt sind. Die Funktion $n(r, \vec{R}, t)$ wird deshalb durch eine Funktion $n(r, t)$ ersetzt und sämtliche räumlichen Terme entfallen in der Gleichung für n . Die damit verbundene formale Schwierigkeit, daß es mit einer derartigen Lösung unmöglich ist (abgesehen von der Triviallösung $n \equiv 0$), die Randbedingung zu erfüllen, die fordert, daß an den Oberflächen des Behälters die Konzentration verschwindet, wird dadurch gelöst, daß man annimmt, daß die Konzentration von ihrem Volumenwert in einer dünnen Grenzschicht über der Oberfläche auf den Wert 0 abfällt. Diese Annahme ist auch insofern gerechtfertigt, daß auch die durchmischende, meist turbulente Konvektion nicht bis zur Wand besteht, sondern daß dort eine laminare Grenzschicht existiert. Die Oberflächen gehen daher in die Gleichung für $n(r, t)$ als eine Senke jeweils proportional zur Oberfläche und zur Konzentration selbst ein.
- III Die dritte Vereinfachung, die unter Punkt I bereits angedeutet wurde, ist die Einführung von nur einem Parameter zur Klassifizierung der Partikeln, der Partikelgröße. Dazu muß zuerst eine kurze Definition des Begriffs "Partikelgröße" gegeben werden. Die Größe einer Partikel wird im allgemeinen als Radius oder Durchmesser einer volumenäquivalenten Kugel angegeben, wobei die

Art der Äquivalenz durch das benutzte Meßverfahren bestimmt wird. Das bedeutet, daß die Größe einer nichtkugelförmigen Partikel je nach Meßverfahren verschieden ist / 7/. Mittels sogenannter Formfaktoren ist es im Prinzip möglich, die verschiedenen Durchmesser ineinander umzurechnen, wobei diese Umrechnung nicht unbedingt eindeutig ist, da jede Angabe eines Äquivalentdurchmessers für sich bereits eine Vereinfachung durch Mittelung über Partikeln unterschiedlicher Orientierung und möglicherweise stofflicher Zusammensetzung ist. Im allgemeinen werden in den Computerprogrammen zur Beschreibung des Aerosolverhaltens bei nuklearen Störfällen volumen- oder massenäquivalente Durchmesser oder Radien verwendet, wobei beide Durchmesser je nach Definition der Dichte der Partikeln noch mit Hilfe eines Porositätsfaktor ineinander umzurechnen sind. Diese Wahl ist deswegen sinnvoll, da zum einen die Aktivität direkt an die Masse der Partikeln gekoppelt ist und zum anderen die Koagulation als der bei hochkonstruierten Aerosolsystemen bestimmende Prozeß linear in der Masse der Partikeln ist. Bezüglich der hydrodynamischen Eigenschaften sind dann die bereits erwähnten Umrechnungen mit experimentell zu bestimmenden Formfaktoren durchzuführen.

Auf der Grundlage dieser Annahmen läßt sich das das Aerosolverhalten bestimmende Gleichungssystem wie folgt schreiben /8/:

$$\begin{aligned} \frac{n(r_i, t)}{\sigma t} &= S(r_i, t) - (\alpha_D(r_i) + \alpha_S(r_i) + \alpha_L(r_i)) \cdot n(r_i, t) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{K=1}^N \sum_{j=1}^N K(r_K, r_j) \cdot \beta_{Kj}^i \cdot n(r_K, t) \cdot n(r_j, t) \\ &- n(r_i, t) \cdot \sum_{j=1}^N K(r_i, r_j) \cdot n(r_j, t) \cdot (1 - \frac{1}{2} \delta_{ij}) \quad i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

mit

$$\beta_{Kj}^i = \begin{cases} \frac{v_{i+1}^- (v_K^+ + v_j^-)}{v_i \pm 1^- v_i} & + \text{für } (v_K + v_j) \in (v_i, v_{i+1}) \\ - \text{für } (v_K + v_j) \in (v_{i-1}, v_i) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$S(r_i, t)$: Quelle von Partikeln der Größe r , zur Zeit t

und α_D bis α_L : Abscheidekoeffizienten aufgrund verschiedener Abscheideprozesse gemäß der unter Punkt II gemachten Feststellung, wobei hier die Leckage (Index L) formal auch als Abscheideprozeß zu behandeln ist.

Bei der Aufstellung obiger Gleichung wird davon ausgegangen, daß die Funktion $n(r, t)$ in einer geeigneten Weise bezüglich r diskretisiert wurde /8, 9/. Die einzelnen Abscheidekoeffizienten beschreiben die Wirkung der verschiedenen Abscheideprozesse, die als effektive Kräfte die Partikeln an die Oberflächen transportieren, wo sie dann abgeschieden werden. In jedem Falle werden dabei die Diffusion und die Sedimentation berücksichtigt, je nach Situation bzw. physikalischen Randbedingungen noch Thermophorese, Diffusiophorese und turbulente Abscheidung.

2.1.2 Anwendung der Modelltheorie (Aerosol-Codes)

Von diesen Grundlagen ausgehend, wurden weltweit eine ganze Reihe von Computercodes geschrieben, die sich in der Hauptsache durch die numerische Behandlung des obigen Gleichungssystems unterscheiden und in zwei prinzipiell verschiedene Gruppen eingeteilt werden können.

Zur ersten Gruppe gehören die Codes NAUA, PARDISEKO, AEROSIM, ABC, QUICK AEROSOL B2. In diesen Codes wird das Gleichungssystem mittels der Diskretisierung der Funktion $n(r, t)$ numerisch gelöst. Dadurch bestehen keine Einschränkungen bezüglich der Partikelgrößenverteilung, sofern eine ausreichende Feinmaschigkeit der Verteilung zugrundegelegt wird. Zur zweiten Gruppe gehören die Codes HAA-3, HAARM und AEROSOL A1. Hier wird der experimentelle Befund ausgenutzt, daß bei der Erzeugung unterschiedlicher Aerosole häufig eine Partikelgrößenverteilung auftritt, die logarithmisch-normal verteilt ist. In diesen Codes wird daher angenommen, daß die Funktion $n(r, t)$ sich stets als Lognormalverteilung schreiben läßt, die bekanntlich durch drei Parameter vollständig bestimmt ist. Die obengenannte Gleichung läßt sich damit in ein gekoppeltes, nur noch 3-dimensionales Gleichungssystem umformen.

Diese Methode hat gegenüber der Diskretisierung den Vorteil erheblich kürzerer Rechenzeit, allerdings auch den Nachteil, daß in einer Reihe von Fällen, in denen die Größenverteilung aus physikalischen Gründen stark von einer Lognormalverteilung abweicht, die mittels derartiger Programme gewonnenen Lösung sehr stark von der wirklichen Lösung abweicht. Darüber hinaus unterscheiden sich die Aerosol-Codes durch

- die unterschiedliche Behandlung der genannten Aerosolprozesse, etwa in der Berücksichtigung von Formfaktoren
- die Aerosolprozesse, die nicht berücksichtigt werden. Diese ergeben sich in der Regel aus den speziellen Szenarien, für die die Aerosol-Codes geschrieben wurden und bei denen vorausgesetzt werden kann, daß bestimmte Prozesse grundsätzlich von geringer Wirksamkeit sind. Zum kleineren Teil ist die mangelnde Datenbasis oder eine noch ungenügend abgesicherte Modelltheorie der Grund für die Nichtbehandlung einzelner Prozesse.
- die numerische Behandlung des Differentialgleichungssystems oder der Integro-Differentialgleichung (je nach Formulierung), insbesondere die Wahl des Integrationsverfahrens.

Alle genannten Aerosolcodes werden weiterentwickelt und ergänzt, um sie den sich wandelnden Ansprüchen der Anwender anzupassen. Eine zusammenfassende Darstellung des Status der genannten Aerosolcodes findet sich in/3, 4/. Vergleichende Untersuchungen zu den Aerosolcodes wurden im Rahmen einer OECD-Arbeitsgruppe durchgeführt. Es ergab sich, daß die Berechnungen der insgesamt an die Umgebung freigesetzten Aerosolmasse für den Standard-Störfallablauf eines Brutreaktor-Kernkraftwerks innerhalb eines Faktors 10 lagen, während die Werte für einen Standard-Störfallablauf eines LWR-Kernkraftwerks innerhalb eines Faktors 2 übereinstimmten. Hierbei wurden Aerosolcodes der obengenannten zwei Arten eingesetzt. Derzeit werden vergleichende Untersuchungen mit neueren Aerosolcode-Versionen im Rahmen einer Arbeitsgruppe der Europäischen Gemeinschaft durchgeführt /10/.

2.2 Experimente

Das erste experimentelle Versuchsprogramm zur Untersuchung des Aerosolverhaltens war das TUNA-Programm, das 1968-1973 durchgeführt wurde. Die wesentlichen Ziele des Programms waren die Bestimmung der Partikeleigenschaften (Größen, Dichte, etc.) für unterschiedliche Unfallbedingungen, die Bestimmung der Partikel-Anzahl-Konzentration und der Aerosolmassenkonzentration als Funktion der Zeit, die Ermittlung der Aerosolprozesse, die das Aerosolverhalten wesentlich beeinflussen und die modelltheoretische Beschreibung des Aerosolverhaltens. Verwendet wurde ein Kessel mit 2,2 m³ und mit 0,022 m³, um die Volumenabhängigkeit zu ermitteln. Es wurden UO₂-Aerosole mit Hilfe der Stoßstromtechnik in Stickstoff erzeugt mit Anfangsmassenkonzentrationen im Bereich von etwa 10 mg/m³ bis zu etwa 1 g/m³. Wichtige Ergebnisse des TUNA-Programms / 5 /, / 11 / waren:

- Identifikation der wesentlichen Aerosolprozesse, die das Aerosolverhalten unter trockenen Bedingungen bestimmen, nämlich Koagulation, Sedimentation, Thermophorese und Diffusion
- Aufstellung einer ersten Version eines Aerosolverhaltenscodes (PARDISEKO II bzw. III)
- Bewertung des Einflusses von Formfaktoren (Koeffizienten zur Berücksichtigung der physikalischen Form der Partikeln in den Aerosolprozessen) auf das Aerosolverhalten.

Das NABRAUS-Programm wurde 1973 - 1975 durchgeführt, um Bildung, Verhalten und Abscheidung von Na-Aerosolen verschiedener chemischer Zusammensetzung zu untersuchen. Das gegenüber TUNA vergrößerte Volumen (4,7 m³), die Erzeugung anderer Aerosole bei relativ hohen Temperaturen und die unterschiedlichen geometrischen Parameter (anderes Oberflächen/Volumen-Verhältnis) trugen dazu bei, die in PARDISEKO III entwickelte Modelltheorie zum Aerosolverhalten zu verifizieren. Die mit einer verbesserten Numerik ausgestattete Code-Version PARDISEKO IIIb wurde 1979 verfügbar / 8 /.

Die wesentlich größere FAUNA-Anlage mit einem Volumen von 220 m³, die 1976 ihren Betrieb aufnahm, wird neben anderen Aufgaben zur Simulation von Bränden von Metallen (z.B. Natrium) oder flüssigen Brennstoffen (z.B. Kerosin) eingesetzt. Anhand der Experimente im FAUNA-Programm war es möglich, die in PARDISEKO IIIb enthaltene Modelltheorie weiter abzusichern. Es wurden

experimentelle Daten von Formfaktoren für die eingesetzten Aerosole gewonnen sowie Aerosolverhaltensexperimente bei unterschiedlicher Erzeugung von Brandaerosolen durchgeführt. Der Einfluß der Konvektion im FAUNA-Kessel wurde experimentell untersucht und modelltheoretisch analysiert /12/. Dabei wurden erste Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Konvektion und Aerosolverhalten erzielt.

Untersuchungen zum Verhalten von reinen Natriumaerosolen in der NALA-Anlage (2,2 m³) - luftgetragene Natriumaerosole (Tröpfchen) sind wegen ihrer Kugelform und des Wegfalls von Formfaktorunsicherheiten der modelltheoretischen Behandlung leichter zugänglich - deuten auf einen deutlichen Anteil an turbulenter Abscheidung hin / 13 /. Diese experimentellen Ergebnisse führten auf die Berücksichtigung der turbulenten Abscheidung in der Modelltheorie und damit zur Aerosolcode-Version PARDISEKO IV.

Die Frage des Aerosolverhaltens in kondensierender Atmosphäre als Beitrag zur Störfallanalyse von LWR-Kernkraftwerken wurde ab 1973 untersucht. Im experimentellen Teil des NAUA-Programms (1976-1981) wurden aerosolphysikalische Einzelvorgänge im NAUA-Versuchsstand (3,7 m³ Volumen), der die genaue Einstellung der Wasserdampf-Übersättigung gestattet, untersucht. Wichtigste Ergebnisse des NAUA-Programms sind

- die Verifizierung der Kondensationsgleichung im NAUA-Code unter LWR-störfalltypischen thermodynamischen Bedingungen für unterschiedliche Aerosole
- Analyse des Kompaktionsprozesses für Metalloxid-Aerosole (Bildung annähernd kugelförmiger Partikeln aus kettenförmigen Aggregaten durch Kapillarkräfte während der Kondensation).

Mit diesen Ergebnissen wurde der 1975 fertiggestellte Aerosolcode NAUA-Mod2, der die Erweiterung des Aerosolcodes PARDISEKO III um einen Kondensationsmodul umfaßte, weitgehend verifiziert und numerisch verbessert (NAUA-Mod3). Eine weitere Code-Version (NAUA-Mod4) wurde für Anwendungsrechnungen erstellt, insbesondere, um den zahlreichen Benutzern einen unkomplizierten Umgang bei vertretbaren Rechenzeiten zu gestatten. Die vorläufig letzte Code-Version (NAUA Mod5) beruht auf Erfahrungen mit Anwendungsrechnungen sowie auf Nachrechnungen von Experimenten, die in der NSPP-Anlage des Oak Ridge National Laboratory durchgeführt wurden. Dies ließ die Berücksichtigung der Diffusiophorese als notwendig erscheinen. Der in NAUA-Mod5 enthaltene diffusiophoretische Ansatz wurde im NAUA-Versuchsstand durch ein gezieltes Programm 1983 bestätigt.

Die vorstehende kurze Beschreibung der experimentellen Programme zur Entwicklung von Aerosol-Codes umfaßt nur die im Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik I des KfK durchgeführten Arbeiten. Durch regen Informations- und Gedankenaustausch der beteiligten internationalen Aerosolgruppen ist jedoch gewährleistet, daß die auswärtigen Ergebnisse berücksichtigt wurden. In / 3,4 / wird ein Überblick über diese Arbeiten, insbesondere über die Entwicklung von Aerosol-Codes weltweit, gegeben. Die Entwicklung der Aerosol-codes, zusammen mit den zugehörigen experimentellen Programmen im Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik des KfK zeigt Tabelle 1.

3 Aerosol- und Thermodynamik-Codes im DEMONA-Programm

3.1 NAUA-Code

Ausgehend von der in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Modellgleichung wurde das Rechenprogramm NAUA in seiner derzeitigen Version NAUA-Mod 5 entwickelt. Als Besonderheit im Vergleich zu anderen Aerosolcodes ist NAUA speziell auf die Verhältnisse zugeschnitten, wie sie im Containment eines LWR's nach einem hypothetischen Kernschmelzenunfall auftreten, die sich dadurch auszeichnen, daß zeitweise große Mengen von kondensierbarem Gas (Wasserdampf) auftreten. Der Wasserdampf wird überwiegend an den Wänden kondensieren, aber auch Volumen Kondensation, d. h. Kondensation an Aerosolpartikeln ist zu erwarten. Ein Programm zur Beschreibung des Aerosolverhaltens unter darartigen Bedingungen muß daher zusätzlich zu den bereits angesprochenen Aerosolprozessen das Wachstum der Partikeln aufgrund von kondensierendem Wasserdampf enthalten. Die in Abschnitt 2.1.1 angegebene Modellgleichung ist daher auf der rechten Seite um folgende Terme zu erweitern / 9 /:

$$(1 - \delta_{1,K}) \cdot \frac{\dot{v}_{K-1}}{v_K - v_{K-1}} \cdot n(r_{K-1}, t) - \frac{\dot{v}_K}{v_{K+1} - v_K} \cdot n(r_K, t) \quad K = 1, \dots, N$$

Dabei seien die v_K die Volumina der Partikeln der Klasse K und \dot{v}_K die Volumenwachstumsgeschwindigkeit aufgrund der Kondensation. Diese hängt sehr stark von den thermodynamischen Umgebungsbedingungen ab und kann sowohl positiv (Wachstum) als auch negativ (Verdampfung der Tröpfchen) sein. Im NAUA-Code wird dazu die von Mason /14/ abgeleitete Gleichung

Tab. 1: Übersicht der Aerosolcodeentwicklung und Verifizierung bei KfK

Code	Verbesserung	Entwicklungszeitraum	Experiment Volumen	Zeitraum des exp. Programms
PARDISEKO	Koagulation Sedimentation Diffusion	1968-69	-	-
PARDISEKO II	+Thermophorese	1971-73	TUNA 0,2...2,2 m ³	1968-73
NAUA Mod 1	Kondensation	1973	-	-
NAUA Mod 2	+Koagulation +Sedimentation +Diffusion	1974-75	-	-
PARDISEKO III	+zeitabhängige Quellfunktion	1973-75	TUNA 0,2...2,2 m ³ NABRAUS 4,7 m ³	1968-73 1973-75
PARDISEKO III b	+verbesserte Numerik	1976-79	FAUNA 220 m ³	1975-
NAUA Mod 3	+verbesserte Numerik	1976-80	NAUA 3,7 m ³	1976-
NAUA Mod 4	+Anwendung auf Containment- systeme PWR	1981-82	-	-
PARDISEKO IV	+turbulente Abscheidung	1982	FAUNA 220 m ³	1983
NAUA Mod 5	+Diffusiophorese	1982-83	NSPP 38 m ³ DEMONA 580 m ³	1981-83 1983-85

zum Wachstum von Wolkenröpfchen verwendet. Die Anwendung dieser Gleichung auf ein dem Kernschmelzenaerosol vergleichbares Aerosol konnte in Experimenten nachgewiesen werden /15/. Als außerordentlich wichtiges, zusätzliches Ergebnis aus diesen Experimenten konnte gezeigt werden, daß sich anfangs verzweigte, kettenförmige Partikeln durch Wasserdampfkondensation kompakte Kugeln umformen. Das in Abschnitt 2.1 bereits angesprochene Problem der Formfaktoren reduziert sich daher für Aerosolpartikeln unter dem Einfluß von Wasserdampfkondensation auf die Bestimmung des Porositätsfaktors bzw. der effektiven Dichte. Die Wachstumsgleichung ist damit gegeben zu:

$$\dot{v}_K = 4 \pi \cdot r_K \frac{S - \exp(2 \sigma M / (\rho_w \cdot R \cdot T \cdot r_K))}{\frac{L \cdot \rho_w}{K \cdot T} \left(\frac{L \cdot M}{R \cdot T} - 1 \right) + \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M \cdot D \cdot P_s(T)}}$$

mit

- r_K : Radius der Partikeln der Klasse K
- S : Wasserdampfsättigung
- σ : Oberflächenspannung des Tropfens
- M : Molekulargewicht des Wassers
- ρ_w : Dichte des Wassers
- R : allgemeine Gaskonstante
- T : absolute Temperatur
- L : Latente Wärme bei Wasserdampfkondensation
- K : Wärmeleitfähigkeit des Trägergases
- D : Diffusionskoeffizient des Wasserdampfes
- $P_s(T)$: Wasserdampfsättigungsdruck bei der Temperatur T

Die wichtigste Eingangsgröße ist dabei die Sättigung S, da deren Wert bestimmt, ob Tropfen einer bestimmten Größe wachsen oder verdampfen. Wie aus der Formel ersichtlich, werden für S kleiner als 1 Tröpfchen jeder Größe verdampfen, für S größer als 1 werden alle Tröpfchen mit einem Radius größer als der kritische, der durch die Nullstelle des Zählers gegeben ist, wachsen, die kleineren hingegen verdampfen. Dies

bedeutet, daß selbst kleine Schwankungen (wenige Prozent) des Wasserdampfpartialdruckes das Verhalten des Aerosolsystems beeinflussen können. Die thermodynamischen Bedingungen der Containmentatmosphäre sollten daher möglichst gut bekannt sein.

Als weiteren Effekt, der durch das Vorhandensein einer kondensierbaren Komponente des Trägergases verursacht wird, enthält der NAUA-Code (Mod 5) die Diffusiophorese. Dies ist ein Transporteffekt aufgrund einer gerichteten Diffusionsströmung von Dampf zu kalten Oberflächen, an denen er kondensiert und die daher als Senke für diesen wirken. In bisherigen Versionen des NAUA-Codes wurde dies nicht berücksichtigt, da die dazu erforderlichen Daten fehlten und man sicher war, bei den Rechnungen zum Aktivitätsabbau durch die Vernachlässigung in jedem Fall auf der sicherheitstechnisch konservativen Seite zu liegen. Da aber in den geplanten DEMONA-Experimenten mit großen Mengen von kondensierendem Wasserdampf zu rechnen ist, ist die Berücksichtigung dieses Effektes bei den Nachrechnungen der Experimente unbedingt erforderlich. Die in der Literatur zu findenden Ansätze /16,17,18/ zeigen, daß die Abscheidegeschwindigkeit zum einen weitgehend unabhängig von der Partikelgröße und zum anderen proportional zum Konzentrationsgradienten des Wasserdampfes ist. Da auch der Stofftransport proportional zu diesem Gradienten ist, läßt sich der integrale Abscheidekoeffizient recht gut zur Gesamtrate an kondensierendem Dampf bzw. zum integralen latenten Wärmetransport korrelieren.

Die übrigen Terme der im NAUA-Code verwendeten Modellgleichung entsprechen denen, die in den für Anwendungen in SNR-Containments entwickelten Aerosolcodes (z. B. PARADISEKO) verwendet werden. Diese sind:

- Sedimentation unter Verwendung der stationären Fallgeschwindigkeit und Stokes

$$\alpha_s(r) = \frac{2 \rho \cdot g}{9 \eta \kappa} \cdot r^2 \cdot C(r) \frac{F_s}{V}$$

- thermische Diffusion

$$\alpha_D(r) = \frac{k \cdot T}{6 \pi \eta r \kappa} C(r) \frac{F_D}{\delta_D \cdot V}$$

- Leakage

$\alpha_L(r, t)$: beliebige Leckrate als Funktion der Partikelgröße und der Zeit. Da die Leckrate als Funktion der Größe praktisch nie bekannt ist, wird nur die Zeitabhängigkeit berücksichtigt.

- Partikelquelle

$S(r, t)$: beliebige Partikelquelle sowohl bezüglich der Größenverteilung als auch bezüglich des zeitlichen Verlaufs.

- Koagulation unter Berücksichtigung von Brown'scher und Gravitationskoagulation

$$K(r_1, r_2) = K_B(r_1, r_2) + K_G(r_1, r_2)$$

$$K_B(r_1, r_2) = \frac{4 \cdot f \cdot k \cdot T}{6 \cdot \eta \cdot \kappa} \left(\frac{C(r_1)}{r_1} + \frac{C(r_2)}{r_2} \right) \cdot (r_1 + r_2)$$

$$K_G(r_1, r_2) = \frac{1}{2} \left(\frac{r_1}{r_1 + r_2} \right)^2 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2)^2 \cdot |v_{sed}(r_1) - v_{sed}(r_2)|$$

$$\text{mit } r_1 < r_2$$

mit

ρ : Dichte der Partikeln

g : Erdbeschleunigung

η : Trägergasviskosität

$C(r)$: Cunningham-Korrektur

k : Boltzmann-Konstante

$v_{sed}(r)$: stationäre Sinkgeschwindigkeit der Partikeln der Größe r

Da das NAUA-Programm zu der Gruppe von Aerosolcodes gehört, die das Gleichungssystem für $n(r, t)$ mittels Diskretisierung lösen, sind bezüglich der erlaubten Größenverteilungen keine prinzipiellen Einschränkungen notwendig. Dies ist schon deshalb erforderlich, da bei Wasserdampfkondensation auf den Partikeln die Größenverteilung extrem von der häufig angenommenen

Lognormal-Verteilung abweicht. Codes, die auf dieser Annahme (Lognormal-Verteilung) basieren, zeigen Fälle mit Wasserdampfkondensation und in Fällen mit sehr hoher Massenkonzentration starke systematische Abweichungen. In NAUA (Mod 5) wird $n(r, t)$ bezüglich des Logarithmus der Radius diskretisiert, da sich diese Diskretisierung für die verschiedenen Anwendungen als am variabelsten erwiesen hat.

Als Integrationsverfahren für das gekoppelte Differentialgleichungssystem wird ein Euler-Cauchy-Verfahren mit variablem Zeitschritt verwendet. Der Zeitschritt wird vor jedem Integrationsschritt nach der relativen Größe der Differentialquotienten und der Eingabegröße EPS bestimmt. Da die typischen Zeitkonstanten für die Tropfenwachstumsgleichung erheblich kürzer sind als für die übrigen Prozesse, wird diese in einer separaten Routine mit erheblich kleineren Zeitschritten integriert. Deshalb verlängern sich die Rechenzeiten bei Berücksichtigung der Kondensation erheblich.

Um Wachstum und vor allem Wiederverdampfung der aus Flüssigwasser und Feststoff zusammengesetzten Partikeln richtig berechnen zu können, muß selbst unter der Annahme kugelförmiger Partikeln zusätzlich zur Angabe des Radius jedes Partikel noch durch die Zusammensetzung nach flüchtigen und nichtflüchtigen Bestandteilen charakterisiert werden. Die dem NAUA-Code zugrundeliegende Modellgleichung mußte deshalb noch um eine weitere unabhängige Variable (zusätzlich zu r), der Aufteilung flüssig/fest, ergänzt werden. Diese Aufteilung wird unabhängig für jede Größenklasse vorgenommen, jedoch werden innerhalb einer Größenklasse keine weiteren Differenzierungen mehr vorgenommen, sondern für alle Partikeln dieser Klasse eine mittlere Zusammensetzung angenommen. Es konnte gezeigt werden, daß die mittels dieser Vereinfachung gewonnenen Ergebnisse immer auf der sicheren Seite liegen / 9/. Die Zusammensetzung wird aber ständig neu berechnet unter Berücksichtigung der Koagulation, von Partikelquellen und der Wasserdampfkondensation bzw. Verdampfung. Insbesondere ist es mit diesem Verfahren sehr gut möglich, zwischen kleinen, trocken bleibenden und größeren, als Kondensationskeime dienenden Partikeln zu unterscheiden.

Zur Nachrechnung des Aerosolverhaltens unter dem Einfluß der Dampfkondensation sind entsprechende thermodynamische Daten notwendig, insbesondere Thermodynamik-Codes, die das Auftreten von Übersättigungszuständen mit anschließender Volumen Kondensation berechnen. Dies aber ist bei den bisherigen Containment-Codes (zur Berechnung des Druckverlauf bestimmter Störfall-Szenarios) nicht der Fall, da die Auswirkung der Volumen Kondensation auf Druck und Temperatur gering ist und daher nicht berücksichtigt wird. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert wird, ist im Hinblick auf das DEMONA-Programm die Erweiterung des Thermodynamikmodells COCMEL um die genannten Effekte vorgesehen. Ob eine direkte Kopplung der beiden Codes notwendig ist, wird im Laufe des DEMONA-Programms zu entscheiden sein.

Abschließend soll noch kurz auf den derzeitigen Status des NAUA-Codes im Hinblick auf seine Einsetzbarkeit für Störfallrechnungen eingegangen werden. Wie bereits erwähnt, lassen sich mit dem NAUA-Code beliebige Quellenpartikelverteilungen verarbeiten. Außerdem können bis zu 50 verschiedene Radionuklide in ihrem zeitlichen Verhalten - allerdings nicht partikelgrößenabhängig - bilanziert werden. Wegen der prinzipiellen Beliebigkeit der Partikelgrößenverteilungen ist es auch möglich, partikelgrößenabhängige Leckraten als Partikelquellen wieder einzulesen, was Mehrfachcompartimentrechnungen ermöglicht /20/. Mittels des Programms ist es daher möglich, das Aerosolverhalten für Störfallszenarios in komplexen Geometrien eines Containmentsystems zu berechnen. Zu prüfen ist allerdings, ob aufgrund der Geometrie der einzelnen Compartments oder aufgrund des Flußschemas innerhalb des Containmentsystems gewisse, im Modell enthaltene Voraussetzungen a priori erfüllt sind. Hierzu gehören die homogene Durchmischung in jedem Compartment und das richtige Verhältnis der Zeitkonstanten des Gasaustausches zwischen verschiedenen Compartments und der Zeitkonstanten der Aerosolprozesse. In Fällen dieser Art kann der Code nicht anwendbar sein und die Rechenergebnisse können bestenfalls als grobe Abschätzungen angesehen werden.

Als Beispiel für eine NAUA-Rechnung ist in Bild 1 und Bild 2 der Verlauf der luftgetragenen Masse und der kumulierten Leckage einmal im Sicherheitsbehälter bzw. im Ringraum bei einem Kernschmelzenunfall der Freisetzungskategorie FK6 dargestellt. Dabei wird angenommen, daß die Partikel ohne Rückhaltung im Primärsystem direkt aus der Schmelze ins Containment freigesetzt werden. Die Leckage des Containments (Auslegungsleckage bis zur Erreichung des Überdruckversagens bei 460 000 sec, danach kritische Ausströmung) dient dann als Partikelquelle für den Ringraum, von wo die Partikel per Leckage über das Abluftsystem ins Freie gelangen können. Es zeigt sich, daß das Containment-

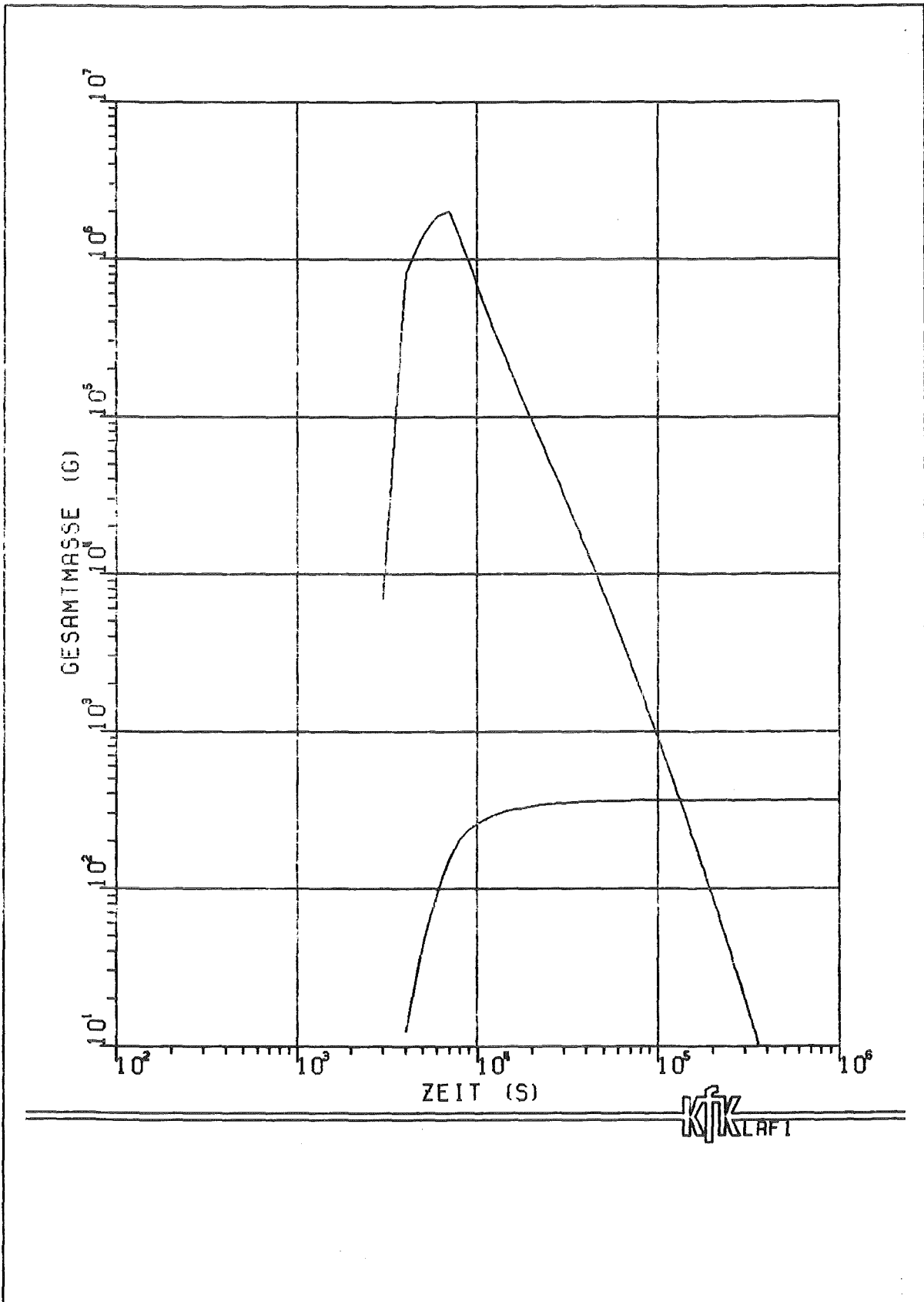


Bild 1: Luftgetragene Masse und kumulierte Leckmasse als Funktion der Zeit (Sicherheitsbehälter) bei der Freisetzungskategorie 6 (Ringraum)

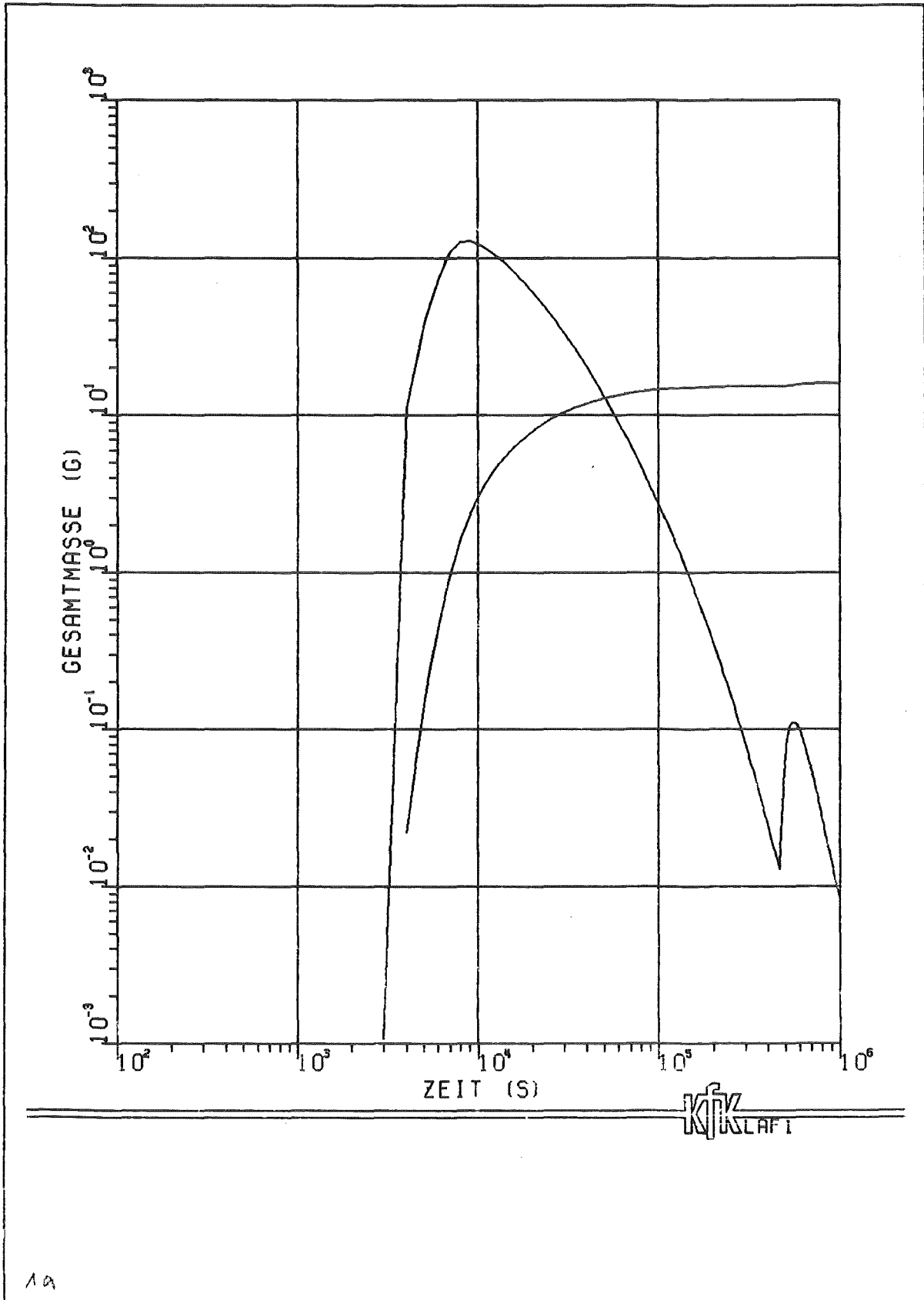


Bild 2: Luftgetragene Masse und kumulierte Leckmasse als Funktion der Zeit (Sicherheitsbehälter) bei der Freisetzungskategorie 6 (Ringraum)

system bei einem derartigen Störfall selbst ohne Filter im Abluftstrang des Ringraums eine sehr hohe Rückhaltewirkung (etwa einen Faktor 10^5) gegenüber der primär im Containment freigesetzten aerosolförmigen Aktivität besitzt.

3.2 COCMEL-Code

Mit dem KWU-Code COCMEL (Containment Code Kernschmelzen) können die thermodynamischen Zustände im Sicherheitsbehälter eines LWR-Kernkraftwerkes unter den Randbedingungen hypothetischer Störfälle berechnet werden. Ausgehend von den Anfangsdaten (wie Drücke, Temperaturen, Feuchte) sowie den Abmessungen des Sicherheitsbehälters, werden der Druck- und Temperaturentwicklung für die beiden thermodynamisch verknüpften Systeme (Gasraum und Sumpfwasservolumen) mit Energie-, Massen- und Volumen-Bilanzgleichungen unter Berücksichtigung der Energie- und Massenzufuhr sowie der Wärmeabfuhr in die Strukturen berechnet.

3.2.1 Modellierung des Gasraumes

Der Gasraum enthält neben Dampf und unter Sättigungsbedingungen Wasser, die nicht-kondensierbaren Anteile Luft, H_2 , CO, CO_2 , die gleichmäßig vermischt und im thermodynamischen Gleichgewicht (konstante Temperatur) befindlich angenommen werden. Im Anfangszustand werden die Massen aus den Partialdrücken, den Temperaturen, dem Anfangsvolumen und der relativen Feuchte bestimmt. Die anfangs luftgetragene Wassermasse wird per Input vorgegeben. Die nichtkondensierbaren Anteile der Containmentatmosphäre Luft/ H_2 /CO/ CO_2 folgen dem Gesetz idealer Gase, während die Zustandsgrößen von Dampf und Wasser nach den in den Dampftafeln angegebenen Gleichungen berechnet werden.

Die den thermodynamischen Zustand bestimmende Energie- und Massenzufuhr in den Gas- sowie in den Wasser-Raum wird über Tabellen eingegeben. Dampf kondensiert solange die Temperatur des Dampftraumes unter Berücksichtigung der Energie- und Massenzu- bzw. -abfuhr unter der Sättigungstemperatur des Dampfpartialdruckes liegt. Da die luftgetragene Wassermasse den langfristigen Druckaufbau nur unwesentlich beeinflusst, wird die im Luftraum bzw. an den Wänden kondensierte Wassermasse sofort dem Sumpfraum zugeschlagen. Das Gasvolumen kann gesättigte oder überhitzte Zustände annehmen, die neben der Energiezufuhr in erster Linie von der Wärmeabfuhr an die Struktur bestimmt werden. Für die globale Wärmeübergangszahl zwischen dem Gasraum und den Strukturen wird die empirische Beziehung nach Tagami-Uchida angesetzt. Auch andere Wärmeabfuhrmechanismen, wie z. B. Sprühen der Stahlhülle von außen, Sprühen in die Containmentatmosphäre oder Leckagen, können ebenfalls berücksichtigt werden.

3.2.2 Modellierung des Sumpfwasserraumes

Der Zustand des Sumpfwassers wird ebenso wie der des Gasraumes mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik berechnet. Der Zustand kann unterkühlt oder gesättigt sein, wobei das Sumpfwasser bei Sättigungsbedingungen auch Dampf enthält, welches mit dem Wasser gleichmäßig vermischt ist und sich im thermodynamischen Gleichgewicht (konstante Temperatur) befindet. Die Anfangsmasse des Wassers errechnet sich aus der Anfangstemperatur, dem Containment-Gesamtdruck und dem Anfangsvolumen. Die Dampfanzfangsmasse im Sumpfwasser wird eingegeben. Der Gesamtdruck des Sumpfwassers ist gleich der Summe der Partialdrücke der Gase im Gasraum des Sicherheitsbehälters. Neben der Masse kondensierten Dampfes ist der Sumpf mit dem Gasraum über die Wasserverdampfung verknüpft, die berücksichtigt wird, sobald die Wassertemperatur aufgrund einer externen Energiezufuhr (z. B. Spaltproduktleistung) oder der Wärmeabfuhr aus dem Gasraum über die Sättigungstemperatur zum Gesamtdruck ansteigt. Wärmeabfuhr aus dem Sumpfbereich in die benetzte Betonstruktur des Gebäudes kann ebenfalls berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, wird der Wärmeübergang zwischen dem Sumpf und dem Gasraum berücksichtigt, wenn Temperaturdifferenzen zwischen beiden Volumina auftreten. Das Gesamtvolumen des Wasser- und Gasraumes ist konstant.

Die Aufteilung energiereicher Zufuhrraten in Wasser und Dampf, wie sie bei Kernschmelzen während des blow down und den daran anschließenden Kernschmelzphasen zu berücksichtigen sind, erfolgt schon vor der Lösung des Gleichungssystems, wobei der Wasseranteil sofort dem Sumpf zugeschlagen wird.

3.2.3 Gleichungssystem des COCMEL-Codes

Massenbilanzen

Für die zeitliche Massenänderung der nichtkondensierbaren Gase Luft/H₂/CO/CO₂ gilt:

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab}$$

mit

M = Masse, kg

$\dot{m}_{zu,ab}$ = Massenstrom Zu- bzw. Abfuhr, kg/s

Abfuhr z. B. durch Leckagen

Für den Dampf (Index D) bzw. das Sumpfwasser (Index W) wird angesetzt:

$$\frac{dM_D}{dt} = \sum \dot{m}_D \text{ zu} - \sum \dot{m}_D \text{ ab} + \dot{m}_{\text{Verdampfung aus Sumpf}} - \dot{m}_{\text{kondensierter Dampf}}$$

$$\frac{dM_W}{dt} = \sum \dot{m}_W \text{ zu} - \sum \dot{m}_W \text{ ab} - \dot{m}_{\text{Verdampfung aus Sumpf}} + \dot{m}_{\text{kondensierter Dampf}}$$

wobei sich $\dot{m}_{W,ab}$ auf die Wasserabfuhr bei Sumpfumwälzung bezieht.

$\dot{m}_{\text{Verdampfung}}$ setzt sich aus den Ausdampfraten aufgrund des Wärmeüberganges aus dem Gasraum oder bei Druckentlastungsvorgängen sowie der Sumpfverdampfung durch die Einwirkung der Schmelze zusammen. Zusätzliche in COCMEL enthaltene Optionen wie z. B. Sprühen sind in den Bilanzgleichungen nicht berücksichtigt.

Volumenbilanz

Die zeitliche Änderung des Gesamtvolumens (Gasraum und Sumpfvolumen) ist Null:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_{\text{Gasraum}}}{dt} + \frac{dV_{\text{Sumpf}}}{dt} = 0$$

Energiebilanz

Der Gasraum und der Sumpf werden wie folgt getrennt bilanziert:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{\text{Gasraum}}}{dt} = & \sum (\dot{m} \cdot c_p \cdot T)_{\text{nichtkondensiertes Gas (zu - ab)}} + \sum (\dot{m} \cdot i)_{\text{Dampf (zu - ab)}} \\ & + (\dot{m} \cdot i)_{\text{Verdampfung aus Sumpf}} - (\dot{m} \cdot i)_{\text{Kondensdampf}} + \dot{q}_{\text{zu Quelle}} \\ & - \alpha \cdot F_{\text{Sumpf}} (T_{\text{Gasraum}} - T_{\text{Sumpf}}) \end{aligned}$$

In $\sum (\dot{m} \cdot c_p \cdot T)$ ist pro Zeitschritt die Zu- bzw. Abfuhr der nichtkondensierbaren Gase Luft/H₂/CO/CO₂ zusammengefaßt, während in $\sum (\dot{m} \cdot i)_{\text{Dampf (zu-ab)}}$ von den per Tabelleneingabe zugeführten Dampfziffern, die z. B. über Leckagen abgeführten abgezogen werden.

$$\begin{aligned} \frac{dE_{\text{Sumpf}}}{dt} = & \sum (\dot{m} \cdot i)_{\text{Wasser zu - ab}} - (\dot{m} \cdot i)_{\text{Verdampfung aus Sumpf}} + (\dot{m} \cdot i)_{\text{kondensierter Dampf}} \\ & + \dot{q}_{\text{zu Quelle}} + \alpha \cdot F_{\text{Sumpf}} (T_{\text{Gasraum}} - T_{\text{Sumpf}}) \end{aligned}$$

In Term $\dot{q}_{\text{zu Quelle}}$ können Leistungen (wie z. B. Wärmeentbindung der Spaltprodukte) im Gasraum bzw. im Sumpf per Eingabetabelle berücksichtigt werden. Für den Gasraum wird in diesem Glied auch die bei Verbrennungsvorgängen freigesetzte Wärmeleistung berücksichtigt.

Die Zustandsänderung der nichtkondensierbaren Gase wird mit der Gleichung idealer Gase ermittelt.

$$\frac{d}{dt} / PV - MR (T + 273) = 0 /$$

Die Volumina und inneren Energien sind wie folgt definiert:

Volumen

$$V_{\text{Gasraum}} = V_{\text{Wasser gesättigt}} + V_{\text{Gas}}$$

$$V_{\text{Sumpf}} = V_{\text{Dampf gesättigt}} + V_{\text{Wasser}}$$

Innere Energie

$$E_{\text{Gasraum}} = (M c_p T)_{\text{nichtkond. Gas}} + (M i)_{\text{Gas}} + (M i)_{\text{Wasser}} - (P V)_{\text{Gasraum}}$$

$$E_{\text{Sumpf}} = (M i)_{\text{Wasser}} + (M i)_{\text{Gas}} - (P V)_{\text{Sumpf}}$$

Die Erhaltungsgleichungen werden mit Hilfe des Gauß'schen Eliminationsverfahrens gelöst.

Aufheizung der Strukturen

Bei der Aufheizung der Containmenteinbauten bzw. der Begrenzungsstrukturen kann zwischen Stahl- bzw. Betonstrukturen unterschieden werden. Diese sind als einseitig beheizte Platten modelliert, sie können jedoch Schichten unterschiedlichen Materials enthalten. Beidseitig der Containmentatmosphäre ausgesetzte Strukturen werden als ebene Platten mit doppelter Oberfläche und halber Schichtdicke eingegeben. Auch besteht die Möglichkeit, die für DWR's deutscher Bauart typische geometrische Anordnung Stahlhülle/Ringraum/Betonabschirmung incl. Wärmeabfuhr an die Umgebungsatmosphäre zu berücksichtigen.

Für jede Wand wird die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$$

$$a = \frac{\lambda}{c \rho} \quad \text{Temperaturleitfähigkeit, m}^2/\text{s}$$

λ Wärmeleitfähigkeit, W/m grad

c spezifische Wärme, Ws/kg grad

ρ Dichte, kg/m³

Für jede Wand werden die Gleichungen in Form der Matrix

$$A \cdot X = B$$

geschrieben, wobei A eine tridiagonale Matrix, X den Temperaturvektor der Wandknoten zur Zeit t und B den der Temperaturen zur Zeit t - Δt darstellt. Die Matrix wird für jeden Zeitschritt mit Hilfe des Gauß'schen Eliminationsverfahrens gelöst.

3.2.4 COCMEL Programmerweiterungen im DEMONA-Programm

Zur Beschreibung des Aerosolabbaus in einer Wasserdampf/Luftatmosphäre unter dem Einfluß von Kondensationsvorgängen ist die Kenntnis der zeitlichen Thermodynamikdaten erforderlich. Vor allem nimmt bei der Beschreibung der aerosolphysikalischen Prozesse die Bedeutung von einigen thermodynamischen Parametern zu, die für die Berechnung des Druck- und Temperatureaufbaus allein nur von äußerst geringem Einfluß sind und in Containmentcodes in der Regel vernachlässigt werden. So wird in COCMEL auf eine detaillierte Aufteilung des kondensierten Dampfes im Gasraum und an den Wänden verzichtet. Diese Unterscheidung würde den Modellierungs- und Rechenaufwand nur erhöhen, ohne aufgrund des nur äußerst geringen Volumens zu spürbaren Ergebnisabweichungen zu führen. Im Aerosolsystem ist die Kenntnis der im Gasraum luftgetragenen Wassermasse jedoch von Bedeutung, da durch die Kondensation von Dampf an den Aerosolen die Form der Partikeln geändert und, sollte mit nennenswerten Wassermassen während des Kernschmelzablaufes zu rechnen sein, die Aerosolabbau-geschwindigkeit erhöht wird.

Aus den oben angeführten Gründen soll COCMEL um ein Modell erweitert werden, mit dem die luftgetragene Wassermasse quantifiziert werden kann. Dazu ist es notwendig, die Wärmeübergänge an die Wände nicht pauschal (nach Tagami Uchida) sondern nach Konvektion, Leitung, Strahlung und Kondensation getrennt zu ermitteln. Gelingt dies (die Wärmeübergangsbeziehungen werden der Literatur entnommen), kann der Kondensatstrom an den Strukturen des Sicherheitsbehälters ermittelt werden. Aus den in Abschnitt 3.2.3 angegebenen Bilanzen ergibt sich dann die luftgetragene Wassermasse, deren zeitliches Ausregnen aus dem Gasraum nur unter Berücksichtigung der mit dem NAUA-Code zu ermittelnden Abbauraten berücksichtigt werden kann. Nach der Modellerweiterung in COCMEL und erfolgreichem Austesten ist eine Verifikation der Kopplung der Thermodynamik und des Aerosolverhaltens im Rahmen der DEMONA-Versuche vorgesehen.

4. Ziele des DEMONA-Programms

Der Stand der Kenntnis über das Verhalten nuklearer Aerosole nach schweren Störfällen in Kernkraftwerken wurde in den vorausgegangenen Abschnitten zusammenfassend dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, daß die für das Aerosolverhalten relevanten Prozesse aerosolphysikalisch und aerosolchemisch voll verstanden sind. Auch die mathematische Beschreibung eines dynamischen aerodispersen Systems - bestehend aus Trägergas(en), festen und flüssigen Aerosolen - ist mit Hilfe von numerischen Methoden gelungen und im Laufe der Entwicklung immer mehr verfeinert worden. Der NAUA-Code ist hierbei einer der am weitesten entwickelten Aerosol-Codes. Auch die in den letzten Jahren durchgeführten Experimente zur Verifikation bestimmter Aerosolprozesse sowie des integralen Aerosolverhaltens haben gezeigt, daß der NAUA-Code ein brauchbares Handwerkszeug ist, um die aerosolgebundene Aktivität unter allen relevanten Störfallabläufen im Hinblick auf ihr zeitliches Verhalten in LWR-Kernkraftwerken und ihre Freisetzung in die Umgebung (radiologischer Quellterm) zu berechnen. Es ist jedoch anzumerken, daß

- im NAUA-Code (wie in allen anderen Aerosol-Codes auch) mehr aus rechenökonomischen als aus aerosolphysikalischen Gründen homogene Durchmischung des Aerosols unterstellt wird. Dies wurde in allen Experimenten mit begrenzten Volumina mit guter Näherung bestätigt,

- die im NAUA-Code verwendeten mathematischen Beziehungen streng nur für kugelförmige Partikeln gelten. Dies erfordert die Anwendung von Korrekturfaktoren für reale (nicht-kugelförmige) Aerosole (Formfaktorkonzept), die für jedes Aerosol experimentell bestimmt werden müssen,
- die im Störfallablauf auftretende Dampfkondensation sowohl als Volumenkondensation (am Aerosol) als auch als Wandkondensation auftritt. Der NAUA-Code benötigt daher für die Beschreibung des Aerosolverhaltens in kondensierender Atmosphäre entsprechende thermodynamische Daten, die mit dem erweiterten COCMEL-Code gewonnen werden.

Grundsätzlich gilt die in Abschnitt 2.1.1 dargestellte Modelltheorie des Aerosolverhaltens für jedes abgeschlossene Volumen, unabhängig von der Größe. Größere Volumina zeigen jedoch eine Tendenz zur Ausbildung von Konvektionsströmungen, insbesondere dann, wenn inhomogen verteilte Wärmequellen und -senken vorliegen. In der Regel sind diese thermischen Inhomogenitäten - insbesondere für die inneren Strukturen eines Kernkraftwerkes - nur begrenzt zu beschreiben, so daß mittlere Wärmeflüsse etc. angesetzt werden. Abschätzungen zeigen jedoch, daß thermische Inhomogenitäten nur einen geringen Einfluß auf das integrale Aerosolverhalten haben. Im DEMONA-Programm soll gezeigt werden, daß der im NAUA-Code verwendete Ansatz der homogenen Durchmischung des betrachteten Volumens brauchbare Resultate für die insgesamt freigesetzte Aerosolmasse liefert. Dies erfordert ein Versuchsprogramm in einem großen Volumen.

Grundsätzlich gilt die oben beschriebene Modelltheorie des Aerosolverhaltens für jedes in seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften bekannte Aerosol. Eine verlässliche Beschreibung des Aerosolverhaltens erfordert daher die Kenntnis der Formfaktoren, insbesondere des dynamischen Formfaktors κ und des Koagulationsformfaktors f . Unter kondensierenden Bedingungen findet eine Kompaktion der Partikeln zu Kugeln statt, so daß hier $f = \kappa = 1$ ist. Im DEMONA-Programm werden daher Versuche mit trockener Atmosphäre und mit Dampfkondensation durchgeführt. Es wird ein Metalloxidaerosol eingesetzt, das dem Kernschmelzenaerosol möglichst nahekommt.

Schließlich ist der zuverlässige Einsatz des NAUA-Codes von ausreichenden thermodynamischen Daten, insbesondere der örtlichen und zeitlichen Übersättigung des Wasserdampfes, abhängig. Die mit dem erweiterten COCMEL-Code ermittelten Daten bedürfen der Messung unter realistischen Bedingungen. Das DEMONA-Programm soll daher auch zur ausreichenden Verifikation des erweiterten COCMEL-Codes durch Rechnung und Messung beitragen.

Aus den vorstehenden Überlegungen lassen sich die Hauptziele des DEMONA-Programms ableiten, nämlich

- die Demonstration der Wirksamkeit natürlicher Aerosolabbauprozesse im großen Maßstab unter realistischen Kernschmelzunfallbedingungen
- der Vergleich des NAUA-Codes mit Experimenten unter verschiedenen Randbedingungen
- der Nachweis der Anwendbarkeit des zugehörigen Thermodynamikmodells.

Hieraus ergeben sich folgende Randbedingungen für das DEMONA-Programm, nämlich

- ein ausreichend großes Modell-Containment, das sich in Compartments aufteilen läßt,
- dem Störfallablauf entsprechende Druck-, Temperatur- und Übersättigungsbedingungen,
- die Einspeisung eines physikalisch und chemisch dem Kernschmelzenaerosol vergleichbaren Aerosols,
- die Erzeugung einer realistischen Anfangs-Massenkonzentration des Aerosols.

In Abschnitt 5 sind Aufgaben und Durchführung des DEMONA-Programms im einzelnen dargestellt. Neben den Vorausrechnungen der Versuche (siehe Anhang) muß insbesondere eine umfangreiche Versuchs- und Aerosolmeßtechnik bereitgestellt werden. Daneben sind die Aerosolerzeugungstechnik, die Vorbereitung und Anpassung der Versuchsanlage und - nicht zuletzt - die Versuchsplanung wichtige Aufgaben im DEMONA-Programm.

5 Durchführung des DEMONA-Programms

5.1 Die Versuchsanlage

5.1.1 Beschreibung des Modellcontainments

Das Kernstück der DEMONA-Versuchsanlage ist das im Rahmen des BMFT-Vorhabens RS 50 auf dem Gelände des Battelle-Instituts in Frankfurt am Main erstellte Modellcontainment mit seinen apparatetechnischen Nebeneinrichtungen.

Das Modellcontainment wurde ursprünglich als ein 1 : 64 - Modell der 1200 MW-DWR-Anlage Biblis A für Blowdownuntersuchungen erbaut. In dieser Konfiguration war es in seinem Innern in neun Räume unterteilt, die über variable Überströmöffnungen miteinander verbunden werden konnten.

Für die ersten DEMONA-Versuche wurden alle beweglichen inneren Strukturen entfernt und die dann noch verbleibenden fünf Räume durch weitgehendes oder vollständiges Öffnen aller verfügbaren Überströmquerschnitte miteinander verbunden. Ziel dieser Maßnahmen, die ein Abgehen von einer realitätsnahen, unterteilten DWR-Containmentgeometrie bedeuten^{*)}, ist, dem vereinfachenden Ideal einer Einraum-Geometrie mit homogener Atmosphäre (das den Codes NAUA und COCMEL zugrunde liegt) nahezukommen und damit eine übersichtliche Versuchsführung zu ermöglichen. Für mindestens zwei der insgesamt etwa zehn DEMONA-Versuche (Versuchsprogramm siehe Abschnitt 5.4) ist vorgesehen, auch eine realitätsnähere Mehrraum-Geometrie zu verwirklichen.

Bild 3a und b zeigen das Modellcontainment im Schnitt in der angenäherten Einraum-Geometrie. Die wichtigsten geometrischen Daten des Modellcontainments für diese Konfiguration sind in Tabelle 2 bis 5 zusammengestellt.

*) Das Verhältnis Überströmquerschnitte zum Raumvolumen wird durch vollständiges Öffnen aller verfügbaren Überströmöffnungen im Mittel um den Faktor 6,7 gegenüber einem Biblis-Containment vergrößert.

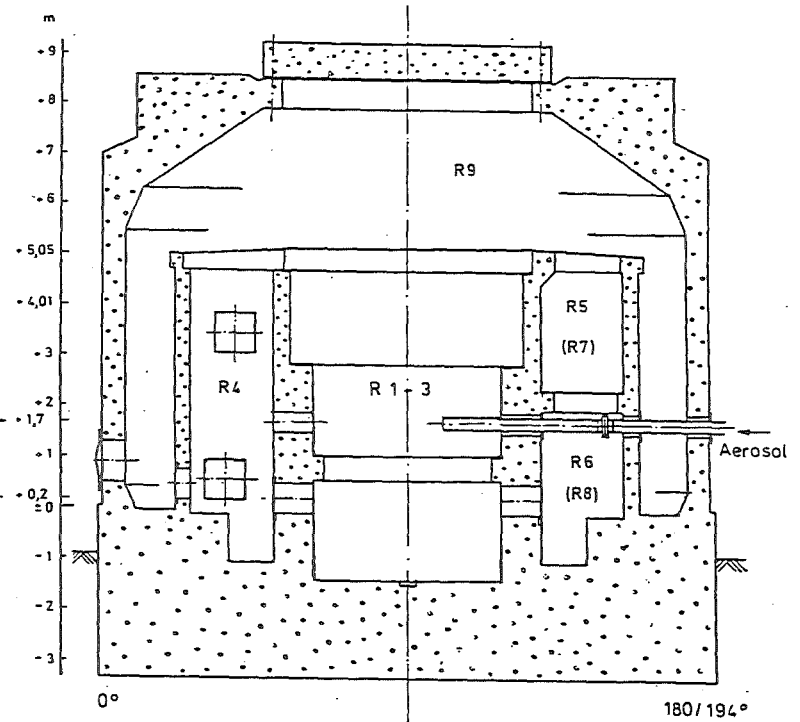
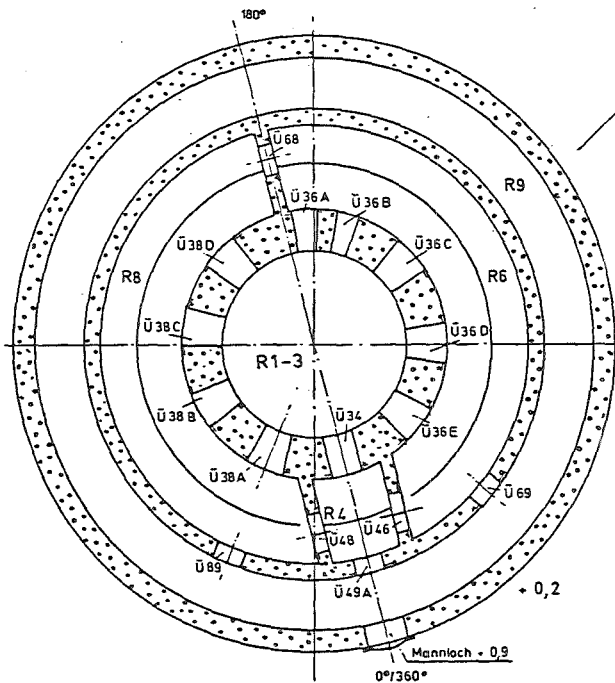
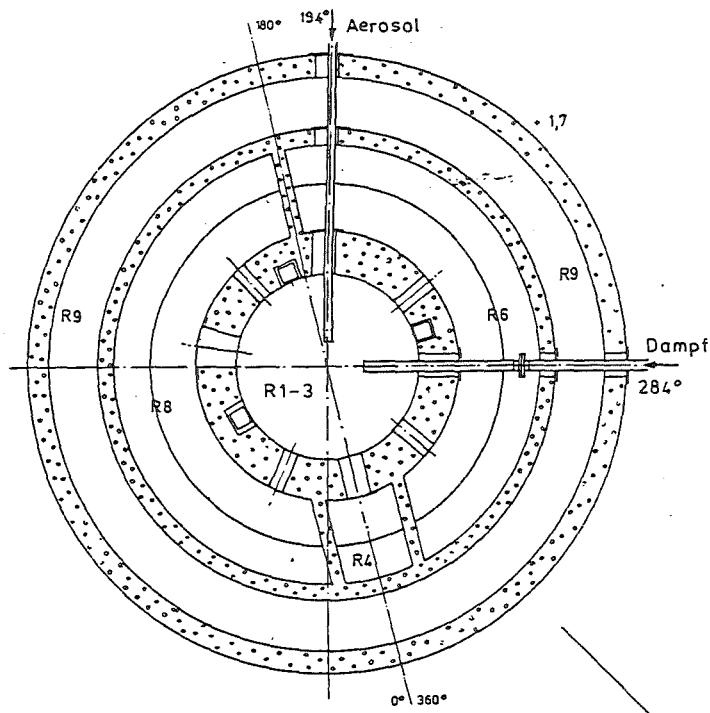


Bild 3 a Modellcontainment in Konfiguration für DEMONA-Versuche.
 Vertikalschnitt 0/180 ° und Grundrisse +0,2 m und +1,7 m

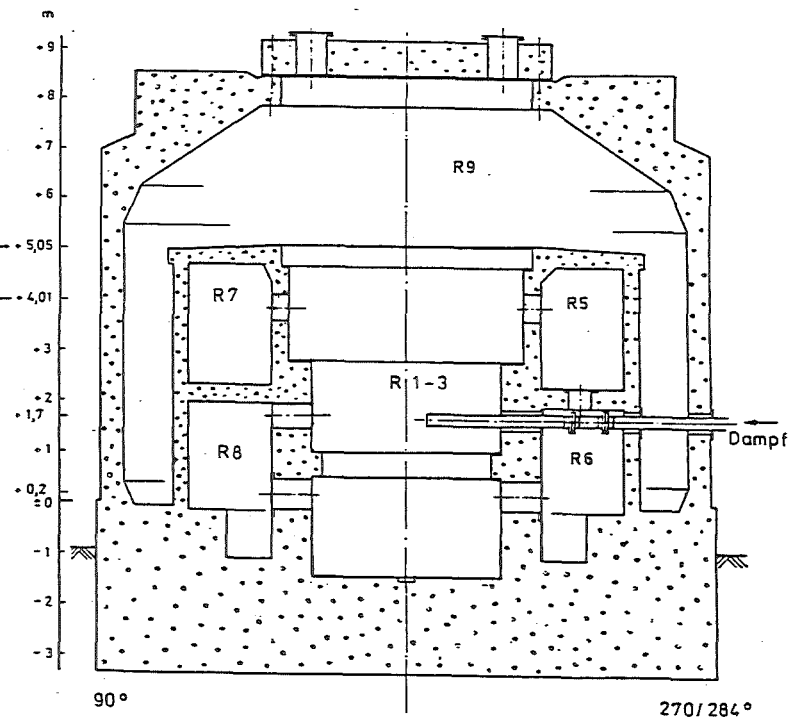
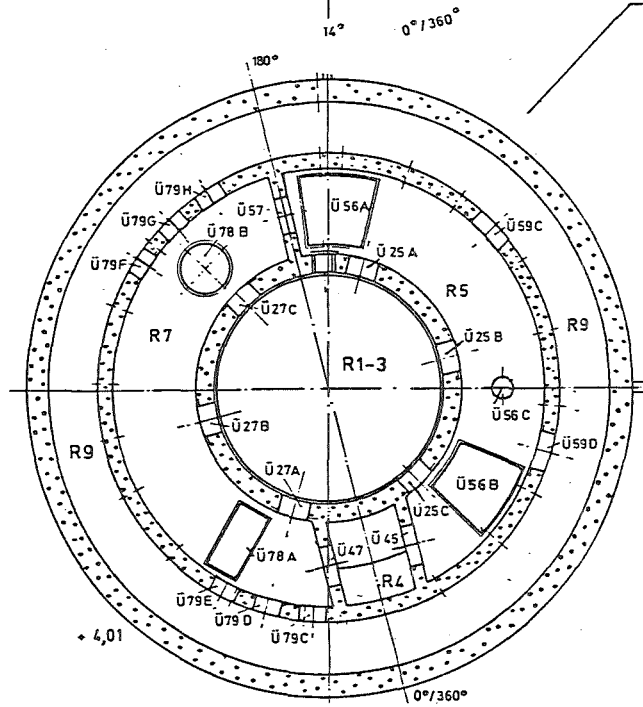
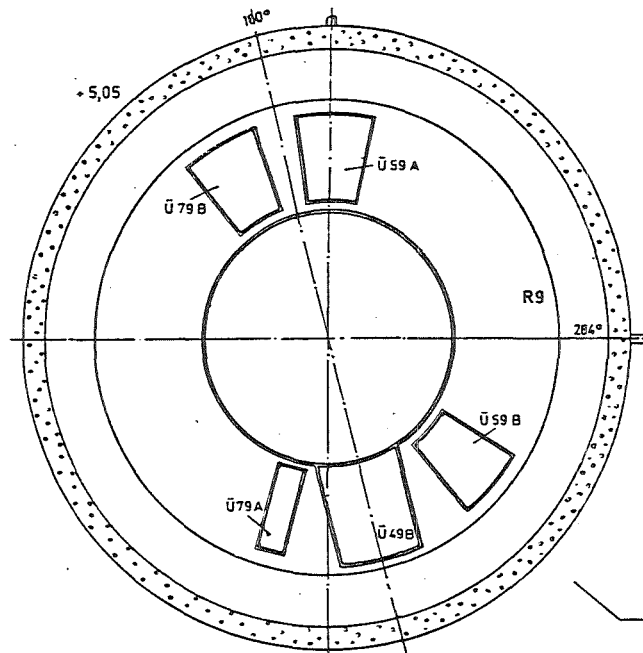


Bild 3 b Modellcontainment in Konfiguration für DEMONA-Versuche.
 (Forts.). Vertikalschnitt 90/270° und Grundrisse +4,01 m
 und + 5,05 m

Tabelle 2: Hauptabmessungen des Modellcontainments (Bild 1a und b)

Raum-Nr.	Teilraum	Höhenkote Raumboden m	Raumhöhe m	äußerer Durchmesser m	innerer Durchmesser m	(mittlere) Länge m	Breite m
1-3	oben	+ 2,85	2,28	4,56	-	-	-
	unten	- 1,30	4,15	3,70	-	-	-
4	oben	- 0,10	5,15	8,60	5,30	1,40	1,65
	Sumpfgraben	- 1,05	0,95	7,10	5,30	1,40	0,90
5		+ 2,25	2,50	8,60	5,30	(9,82)	1,65
6	oben	- 0,05	2,00	8,60	5,30	(9,82)	1,65
	Sumpfgraben	- 1,00	0,95	7,10	5,30	(9,82)	1,65
7		+ 2,25	2,50	8,60	5,30	(9,82)	1,65
8	oben	- 0,05	2,00	8,60	5,30	(9,82)	1,65
	Sumpfgraben	- 1,00	0,95	7,10	5,30	(8,75)	0,90
9	Kuppel	+ 5,05	3,45	11,20	-	-	-
	Ringraum	± 0	5,05	11,20	9,20	(32,04)	1,00

Außendurchmesser des Modellcontainments: 12,10 m

Tabelle 3: Raumvolumina und innere Oberflächen des Modellcontainments für Modellrechnungen zum Aerosolverhalten (gerundete Werte)

Raum-Nr.	Volumen m ³	Sumpf- Bodenfläche m ²	sonstige Bodenfläche m ²	Decken- fläche m ²	Wandseiten- fläche m ²	Gesamt- fläche m ²
1-3	82	11	16	7	84	118
4	14	1	3	1	27	32
5	41	-	13	13	56	82
6	41	8	10	14	60	92
7	41	-	13	13	56	82
8	41	8	10	14	60	92
9	380	-	80	103	375	558
Summe	<u>640 m³</u>	28	145	165	817	<u>1056 m²</u>

Strukturmaterial der inneren Oberflächen: überwiegend beschichteter Beton (Tabelle 5)
 Verbindungsquerschnitte zwischen den o.g. Einzelräumen: siehe Tabelle 3

Tabelle 4: Verbindungsquerschnitte zwischen den einzelnen Containmenträumen
(maximaler Öffnungszustand)

Von Raum	nach Raum	Öffnung Nr.	Abmessungen der Öffnung(en) (\varnothing bzw. B x H) m	Öffnungsfläche m ²	Richtung ⁺	Höhenkote der Öffnungsmitte m
1-3	4	Ü 34	\varnothing 0,60	0,45	H	+ 0,20
		R	\varnothing 0,46		H	+ 1,70
1-3	5	Ü 25 A-C	3 Stk \varnothing 0,60	0,85	H	+ 4,01
1-3	6	Ü 36 A	0,35 x 0,60	1,79	H	+ 0,20
		Ü 36 B	0,27 x 0,60		H	+ 0,20
		Ü 36 C-E	3 Stk 0,54 x 0,60		H	+ 0,20
		R	2 Stk \varnothing 0,46		H	+ 1,70
		R	2 Stk \varnothing 0,27		H	+ 1,70
1-3	7	Ü 27 A-C	3 Stk \varnothing 0,60	0,85	H	+ 4,01
1-3	8	Ü 38 A-D	4 Stk 0,54 x 0,60	1,65	H	+ 0,20
		Einstieg	0,60 x 0,40		H	+ 1,67
		R	2 Stk \varnothing 0,27		H	+ 1,70
1-3	9	Ü 29	\varnothing 4,56	16,33	V	+ 4,70
4	5	Ü 45	0,80 x 0,80	0,64	H	+ 3,45
4	6	Ü 46	0,80 x 0,80	0,64	H	+ 0,55
4	7	Ü 47	0,80 x 0,80	0,64	H	+ 3,45
4	8	Ü 48	0,80 x 0,80	0,64	H	+ 0,55
4	9	Ü 49 A	\varnothing 0,60	0,28	H	+ 0,45
		Ü 49 B	1,40 x 1,65	2,31	V	+ 5,00
5	6	Ü 56 A,B	2 Stk 1,55/1,06x1,35	3,68	V	+ 2,10
		Ü 56 C	\varnothing 0,45		V	+ 2,10
5	7	Ü 57	0,70 x 2,00	1,40	H	+ 3,36
5	9	Ü 59 A	1,95/1,33x1,37	4,07	V	+ 5,00
		Ü 59 B	1,58/1,08x1,37		V	+ 5,00
		Ü 59 C,D	2 Stk 0,80 x 1,10		H	+ 4,00
6	8	Ü 68	\varnothing 0,60	0,28	H	+ 0,45
6	9	Ü 69	\varnothing 0,60	0,62	H	+ 0,45
		R	2 Stk \varnothing 0,46		H	+ 1,70
7	8	Ü 78 A	0,66 x 1,35	1,68	V	+ 2,10
		Ü 78 B	\varnothing 1,00		V	+ 2,10
7	9	Ü 79 A	0,66 x 1,37	3,07	V	+ 5,00
		Ü 79 B	1,95/1,33x1,37		V	+ 5,00
		Ü 79 C-H	6 Stk 0,55 x 0,50		H	+ 4,00
8	9	Ü 89	\varnothing 0,60	0,28	H	+ 0,45

+) H = Öffnung für horizontale Durchströmung

V = Öffnung für vertikale Durchströmung

Tabelle 5: Strukturflächen und -dicken des Modellcontainments für vereinfachte thermodynamische Modellrechnungen

Gesamtbaumassen: Beton: 700 m³ $\hat{=}$ 1540 to
 Bewehrungsstahl: 17 m³ $\hat{=}$ 135 to

<u>Aufteilung:</u>		innere Oberfläche m ²	mittl. Fläche m ²	mittl. Dicke m	Beton- volumen m ³
Außenhülle:	Zylinderwand	190	200	0,45	90
	Kegelteil	76	85	1,2	102
	Deckelbereich	64	54	0,7	38
	Bodenplatte unter Sumpf	28	40	2,25	90
	Bodenplatte Rest	62	75	3,3	248
Zwischensumme		420 m ²	-	-	568 m ³
Innenstrukturen	zusammen:	636 m ²	-	-	147 m ³
gesamt:		<u>1056 m²</u>			<u>715 m³</u>

sämtl. Betonflächen sind auf der Innenseite beschichtet, siehe Tabelle 5
 Anteil der Stahlstrukturen ist vernachlässigbar gering

Tabelle 6: Vorhandene Beschichtung der inneren Betonoberflächen des Modellcontainments

Zur Vermeidung von Wasseraufnahme bzw. -abgabe durch Betonflächen sind diese mit einer Beschichtung versehen, die folgendermaßen aufgebaut ist:

Schicht	Dicke mm	Dichte ρ kg/m ³	spez. Wärme c kJ/kgK	Wärmeleitfähigkeit λ W/mK
- Grundierung (EP-Tiefensiegel)	~ 0	-	-	-
- Vorspachtelung, Füllung von Fehlstellen (EP-Betonspachtel)	variabel	1900	1,4	0,3
- Flächenspachtelung (EP-Betonspachtel)	0,5-1	1900	1,4	0,3
- Haftvermittler (2 K-Haftvermittler)	~ 0	-	-	-
- Grundanstrich (faserverstärkter PC-Anstrich)	~ 0,1	1100	0,95	0,2
- 2 x Deckanstrich (PC-Anstrich)	~ 2 x 0,05	1100	0,72	0,2

Die Dicke der einzelnen Schichten ist örtlich unterschiedlich. Eine systematische zerstörungsfreie Dickenmessung ist mangels eines geeigneten Meßverfahrens nicht möglich gewesen. Die angegebenen Dickenwerte wurden anhand von Proben, die an einzelnen Stellen genommen wurden, abgeschätzt.

Zum Einspeisen von Sattedampf, Luft und Aerosol in das Containment dienen horizontale Rohrleitungen, die in der Containment-Mitte auf etwa 1,7 m Höhe enden, siehe Bild 3 a und b.

Zur Vermeidung von Wasseraufnahme bzw. -abgabe durch die inneren Betonstrukturen des Modellcontainments sind diese mit einer Kunststoffbeschichtung gemäß Tabelle 6 versehen. Diese Beschichtung hat zugleich auch die Aufgabe, die Außenhülle des Modellcontainments - welche im Gegensatz zu einem Anlagencontainment aus schlaff bewehrtem Beton statt aus Stahl gebaut wurde - in beschränktem Umfang abzudichten. In einem Vorversuch wurde für das Modellcontainment eine Leckrate von etwa 3 Vol.-%/h ermittelt. Dies ist bei der Auswertung der Versuche in den Modellrechnungen zu berücksichtigen.

Als Dampfquelle für das Aufheizen der Containmentstrukturen sowie für das Aufrechterhalten eines stationären Containmentdrucks dient ein Dampfkessel mit einer Leistung von maximal 2500 kg/h (0,7 kg/s) Sattedampf.

5.1.2 Betriebsweise der Versuchsanlage

Die einzustellenden Versuchsbedingungen sollen sich an den Bedingungen des Kernschmelzunfalls gemäß FK6 orientieren. Für den Unfallablauf FK 6 ergibt sich im Containment eine gesättigte Luft-Wasserdampf-Atmosphäre, in die innerhalb kurzer Zeit eine große Aerosolmenge (ca. 30 g Metalloxid-Aerosole pro Kubikmeter Containmentvolumen) freigesetzt wird und deren Druck sich über mehrere Tage zwischen 2 bis 4 bar bewegt. Um für die DEMONA-Versuche klare und leicht reproduzierbare Versuchsbedingungen zu erhalten, soll die Versuchsanlage nach der Aerosoleinspeisung stationär bei einem absoluten Druck von 3 bar betrieben werden. In dieser Zeit soll sich auch die Temperaturverteilung in den Strukturen in einem angenähert stationären Zustand befinden. Letzteres erfordert eine ausreichend lange und gleichmäßige Vorheizung. Daraus ergibt sich folgender Betriebszyklus für einen DEMONA-Versuch:

1. Aufheizen des Modellcontainments durch Einspeisen von Sattdampf (Einspeiserate anfangs rund 2500 kg/s, verringert sich bei Annäherung an den stationären Zustand auf ca. 200 kg/s zur Deckung der stationären Wärmeverluste). Ein besonders gleichmäßiges Aufheizen der Strukturen wird durch eine zunächst weitgehend luftfreie Sattdampfatmosfera (Druck 1,7 bar entsprechend dem später gewünschten Dampfpartialdruck) erreicht. Durch Nachspeisen von Luft zum Ende der Aufheizphase wird die gewünschte Atmosphärenzusammensetzung (Dampfpartialdruck 1,7 bar, Luftpartialdruck 1,3 bar) hergestellt. Dauer der Aufheizphase: ca. 2 Tage;
2. Einspeisen von Metalloxid-Aerosolen (Einspeisemenge ca. 20 kg; Aerosolgenerator siehe Abschnitt 5.3). Dauer: max. 1 Stunde;
3. Eigentliche Versuchsphase: Messen des Abbaus der Aerosolkonzentration bei stationären thermischen Bedingungen (Containmentdruck 3 bar). Dauer: 1 bis 2 Tage;
4. Absenken des Drucks und Abkühlen der Containmentstrukturen durch Belüften bis zur Wiederbegehbarkeit des Modellcontainments; Dauer: 3 bis 4 Tage;

Durch Verkürzen der Aufheizphase (d. h. Einleiten der eigentlichen Versuchsphase noch bevor die Strukturtemperaturen ihren stationären Endwert erreicht haben) kann der Anteil des an den Strukturen kondensierenden Dampfes vergrößert und die daraus resultierende Auswirkung auf das Aerosolverhalten untersucht werden.

Zur Steuerung und Kontrolle des geschilderten Anlagenbetriebs dient eine spezielle Betriebsinstrumentierung. Einzelheiten siehe Tabelle 7 und Bild 4.

Die thermischen Vorgänge in der DEMONA-Versuchsanlage während aller vier oben genannten Betriebsphasen werden von der thermischen Versuchsinstrumentierung (Tabelle 8, Bild 5 a bis d) erfaßt und registriert. Diese umfaßt:

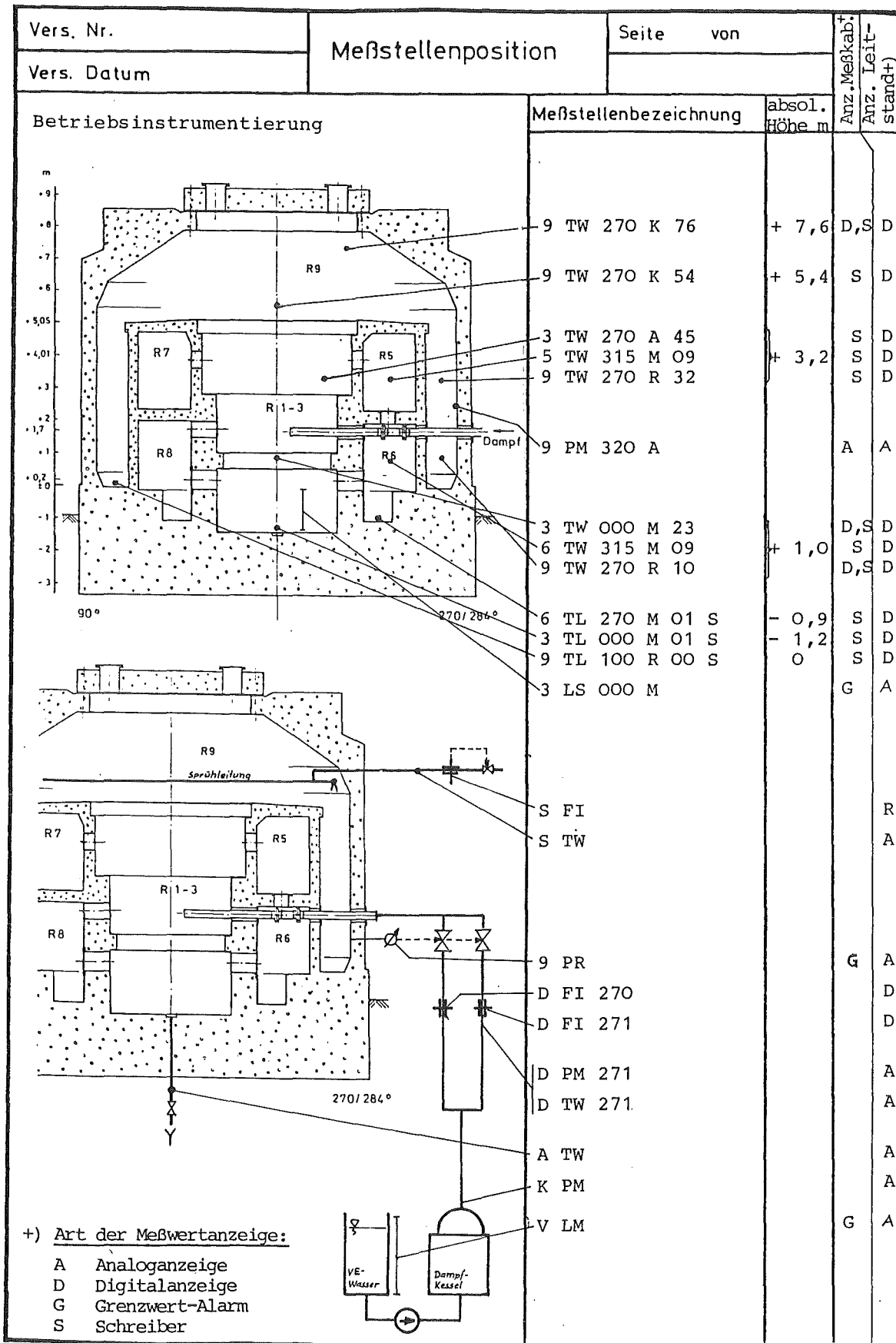


Bild 4: Meßstellenplan für die Betriebsinstrumentierung

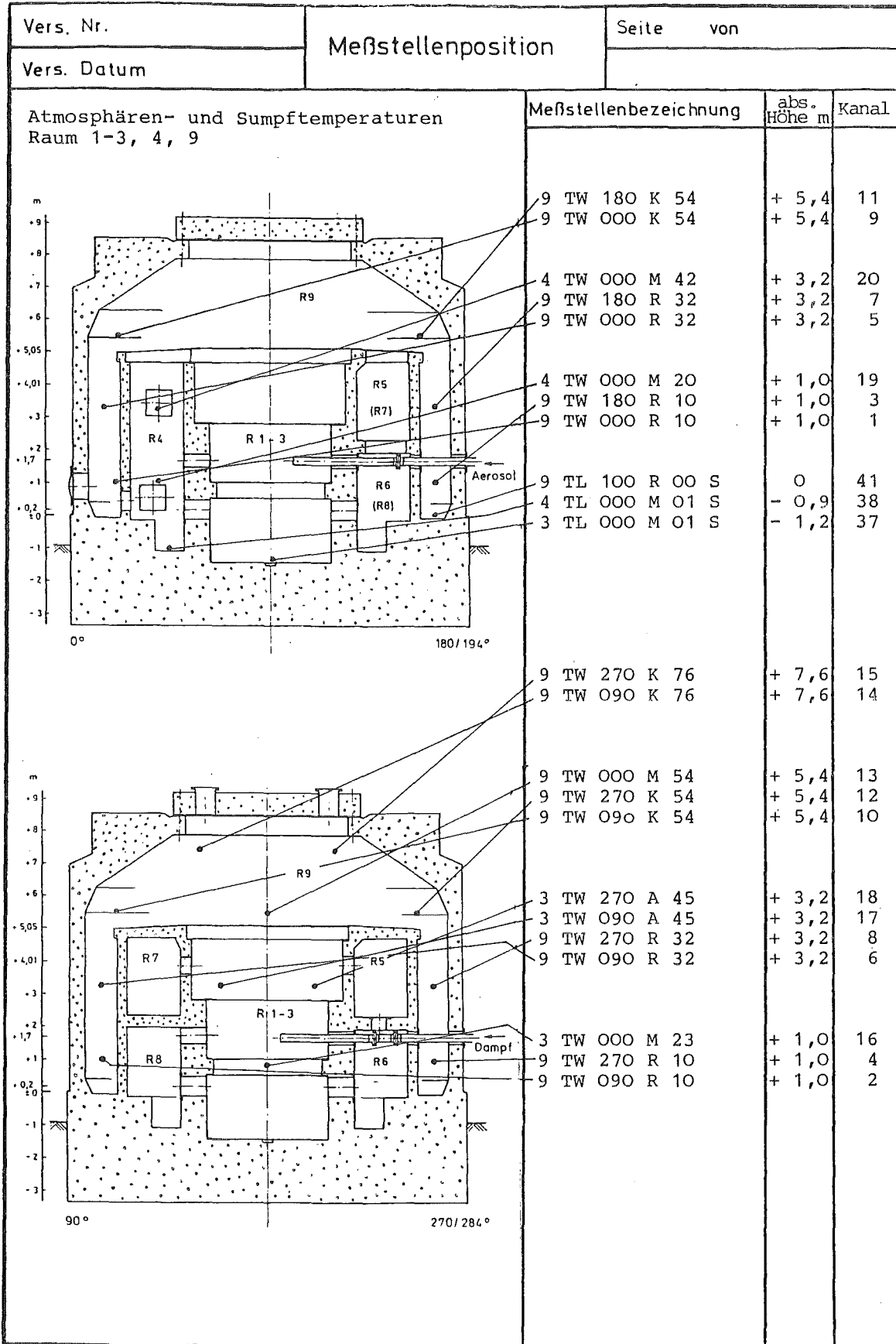


Bild 5 a: Messstellenplan für die thermische Versuchsinstrumentierung

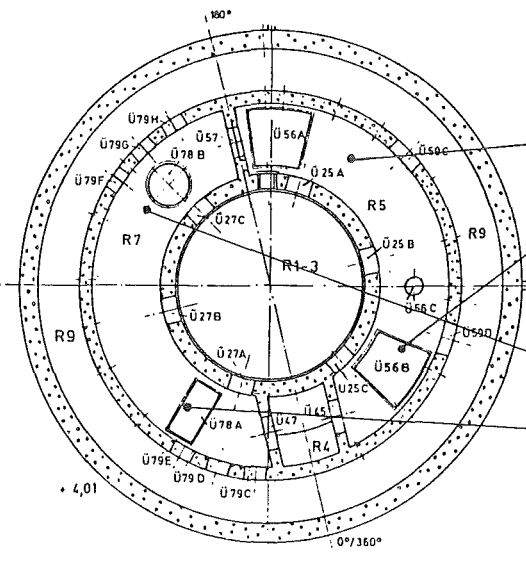
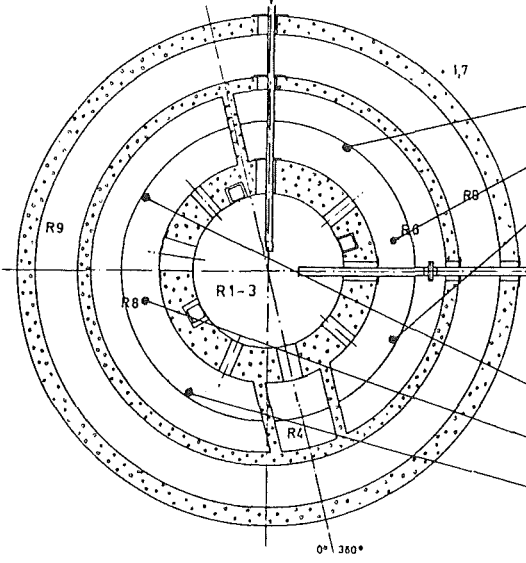
Vers. Nr.	Meßstellenposition	Seite von		
Vers. Datum				
Atmosphären- und Sumpftemperaturen Raum 5, 6, 7, 8		Meßstellenbezeichnung	abs. Höhe m	Kanal
		5 TW 225 M 09 5 TW 315 M 09 7 TW 135 M 09 7 TW 045 M 09	+ 3,2 + 3,2 + 3,2 + 3,2	27 28 22 23
		6 TW 225 M 20 6 TL 270 M 01 S 6 TW 315 M 20 8 TW 135 M 20 8 TL 090 M 01 S 8 TW 045 M 20	+ 1,0 - 0,9 + 1,0 + 1,0 - 0,9 + 1,0	25 39 26 22 40 21

Bild 5 b: Meßstellenplan für die thermische Versuchsinstrumentierung (Forts.)

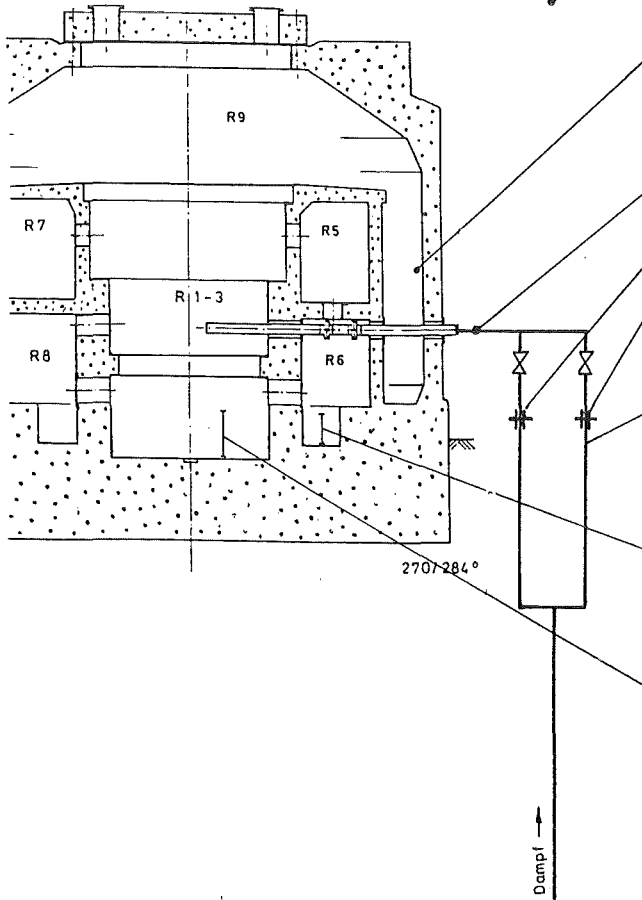
Vers. Nr.	Meßstellenposition	Seite von	
Vers. Datum			
<p>sonstige Meßgrößen der thermischen Versuchsinstrumentierung</p> 	Meßstellenbezeichnung		Kanal
	U TL		50
	9 PL		101
	9 PL		102
	D TL 269		51
	D FI 270		105
	D FI 271		106
	D TL 271		52
	D PI 271		107
	6 LK		109
3 LK		108	
3 LS 000 M		110	

Bild 5d: Meßstellenplan für die thermische Versuchsinstrumentierung
(Forts.)

Tabelle 7: Betriebsinstrumentierung (Meßsysteme)

Meßgröße	Zahl der Meßstellen	Meßbereich	Meßgenauigkeit	Beschreibung der Meßkette
Temperatur in Containment-atmosphäre und Containmentsumpf	{ 11 11	0-125 °C	± 1 K	Pt 100, Umformer mit Digitalanzeige im Leitstand
		0-125 °C	± 1 bzw. 1,5 K	Pt 100 bzw. Thermoelement, Mehrkanalschreiber in Meßkabine
Temperatur in Containmentstruktur	8	0-125 °C	$\pm 1,5$ K	Thermoelement, Mehrkanalschreiber in Meßkabine
Druck im Containment	2	1-4 bar	$\pm 0,05$ bar	Feinmeßmanometer in Leitstand u. Meßkabine
Wasserstand Containmentsumpf	1	0-1,5 m	$\pm 0,05$ m	Schwimmaufnehmer, Umformer mit Analoganzeige im Leitstand
Durchsatz Dampfleitung	{ 1 1	0,5-2,5 t/h	± 70 kg/h	Meßblende, Δp -Umformer, Rechenwerk, Digitalanzeige im Leitstand
		0,05-0,5 t/h	± 10 kg/h	
Druck Kessel u. Rohrleitung	2	1-11 bar	0,025 bar	Einbaumanometer im Leitstand
Temperatur vor Blende	1	0-150 °C	± 4 K	Pt 100, Umformer mit Analoganzeige im Leitstand
Wasserstand Speisewasservorratsbehälter	1	0-10 m	$\pm 0,2$ m	Δp -Aufnehmer mit Umformer, Analoganzeige im Leitstand
Durchsatz Sprühwasser	1	0-7 kg/s	$\pm 0,2$ kg/s	Meßblende Mengenregler
Temperatur Sprühwasser	1	0-25 °C	± 2 K	Pt 100, Umformer mit Analoganzeige im Leitstand
Temperatur Ablaufwasser	1	0-150 °C	± 4 K	Pt 100, Umformer mit Analoganzeige im Leitstand
Stromaufnahme Ablaufpumpe	1	0-20 A	$\pm 0,5$ A	Einbau-Ampereometer

Tabelle 8: Thermische Versuchsinstrumentierung (Meßsysteme)

Meßgröße	Zahl der Meßstellen	Meßbereich	Meßgenauigkeit	Beschreibung des Meßsystems
Temperatur in Containment-atmosphäre	28	0-125 °C	± 0,3 K	Pt 100/ 1/3-DIN
Temperatur in Containment-sumpf	5	0-125 °C	± 1,4 K	Thermoelement 1/2-DIN
Temperatur in Containment-struktur	8	0-125 °C	± 1,4 K	Thermoelement 1/2-DIN
Druck im Containment	2	1-4 bar	± 0,03 bar	Druckaufnehmer mit DMS-Vollbrücke
Wasserstand im Containmentsumpf	{ 1 2	0-1,5 m 0-1,3 bzw. 0,35 m		Schwimmer-Aufnehmer mit Stromausgang- Kapazitive Sonde mit Stromausgang
Durchsatz Dampfleitung	{ 1 1	0,5-2,5 t/h 0,05-0,5 t/h	{ ± 70 kg/h ± 10 kg/h }	Meßblende, Δp-Umformer, Rechenwerk mit Stromausgang
Druck vor Blende	1	1-10 bar	± 0,1 bar	p-Umformer mit Stromausgang
Temperatur Dampfleitung	ca. 3	0-180 °C		Thermoelement
Außentemperatur	1	± 30 °C		Thermoelement
Wärmeübergang im Containment:				
Temperatur	12	0-125 °C		Thermoelement 1/2-DIN
Wärmemenge	1			kommerzieller Wärmemengenmesser
Kondensationswasserstand	1			Schwimmer-Aufnehmer mit Stromausgang
Temperaturmessungen für Aerosolinstrumentierung	{ ca. 5 ca. 10	0-125 °C 0-125 °C	{ ± 0,5 K ± 2 K }	Pt 100 Thermoelement

1
4
1

Tabelle 9: Meßstellenbezeichnung für die Betriebs- und thermische Versuchsinstrumentierung

Die Meßstellen werden durch eine fortlaufende Kanalnummer und parallel dazu durch einen maximal zehnstelligen alphanumerischen Code für Meßstellenart und -ort gekennzeichnet.

z.B. 9 TW 090 R 10

Stelle 1 2.3 4.5.6 7 8.9 10.

1. Stelle: Meßobjekt: 3...9 Containment-Raum-Nr. (R 1-3 = "3")
- | | | | |
|---|-----------------------------|--|--|
| A | Ablaufleitung | | |
| C | Containment (Außenseite) | | |
| D | Dampfleitung | | |
| K | Dampfkessel | | |
| S | Sprühleitung | | |
| U | Umgebung | | |
| V | Speisewasservorratsbehälter | | |
- 2.+3. Stelle: Meßgröße und Art des Meßsystems:
- | | | | |
|----|------------------------------------|----|--------------------------|
| FI | Durchfluß (Blendenmessung) | PM | Absolutdruck (Manometer) |
| LH | Wasserstand (hydrostat. Messung) | PR | Druck-Regler |
| LK | Wasserstand (kapazitiv. Meßsystem) | TL | Thermoelement |
| LS | Wasserstand (Schwimmer) | TW | Widerstandsthermometer |
| PL | Absolutdruck (DMS-Aufnehmer) | | |
- 4.-6. Stelle: Polarwinkel des Meßorts in Winkelgrad, vom Mannloch (= 0°) aus im Uhrzeigersinn
7. Stelle: Radiale Lage des Meßorts
- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|-----------------------------|
| A | Nähe Außenwand | M | Raummitte |
| I | Nähe Innenwand | R | Ringraum-Mitte |
| K | Kuppel (zwischen Mitte + Außenwand) | W | am/im Wärmeübergangsmeßrohr |
- 8.+9. Stelle: Höhe in dm über Fußboden des Containmentraums (entspr. Raum-Nr. in 1.Stelle),
Tabelle zur Umrechnung in absolute Höhenkoten:
- | Raum | absolute Höhe Fußboden des Raums, dm |
|--------|--------------------------------------|
| 3 | -13 |
| 4 | -10 |
| 5 | +23 |
| 6 | -10 |
| 7 | +23 |
| 8 | -10 |
| 9 | ± 0 |
| C usw. | ± 0 |
10. Stelle: Besondere Art der Meßstellenanbringung:
- | | | |
|---|--------------------------------------|-------------------------------|
| S | zur Erfassung des Raumsumpfes | } im/am Wärmeübergangsmeßrohr |
| W | Wand-Einbau (z.B. bei Strukturtemp.) | |
| A | Nähe Außenseite | |
| I | Nähe Innenseite | |
| K | Kondensat | |
| Z | Kühlwasserzulauf | |
| U | Kühlwasserablauf | |

1. Druckmessung mit 2 redundanten Meßstellen
2. Temperaturmessung in Containmentatmosphäre und -sumpf. Größere Meßstellenzahl, in grobem Raster über das gesamte Containmentvolumen verteilt, siehe Bild 5 b und c, zur Untersuchung der Homogenität/Inhomogenität der Containmentatmosphäre.
3. Temperaturmeßstellen in den Betonstrukturen des Modellcontainments zur Überwachung der Temperaturverhältnisse in diesen Strukturen (Abschätzen der Wärmespannungen, Erkennen des Erreichens angenähert stationärer Temperaturverhältnisse).
4. Einrichtung zur Messung des Wärmeübergangs zwischen Containmentatmosphäre und Strukturen.
5. Rechnersystem zur Registrierung, Verarbeitung und Darstellung der Meßsignale der thermischen Versuchsinstrumentierung. Die Meßstellenbezeichnung ergibt sich aus Tabelle 9.

5.2 Aerosolmeßtechnik

Die Schwierigkeit der Aerosolmessung besteht darin, daß das Aerosolsystem dreiphasig ist. Außer der Gasphase (Luft-Wasserdampf-Gemisch) können feste Partikeln und/oder flüssige Aerosolpartikeln (im folgenden Tröpfchen genannt) sowie Tröpfchen mit festem Kern vorkommen. Die Aerosolmeßtechnik muß daher Geräte zur Messung der Parameter aller dieser Komponenten umfassen.

Folgende Aerosolparameter werden als Funktion des Ortes und der Zeit gemessen:

- Massenkonzentration der festen Partikeln und der Tröpfchen
- Größenverteilung der festen Partikeln und der Tröpfchen
- Dichte und Form der Partikeln
- Wasserablagerung (Wand und Boden)

Eine erste Schätzung der Massenkonzentration und des Partikelradius ist aus Rechnungen mit dem NAUA-Code zu ersehen. Besonders zu bemerken ist, daß im Modellcontainment

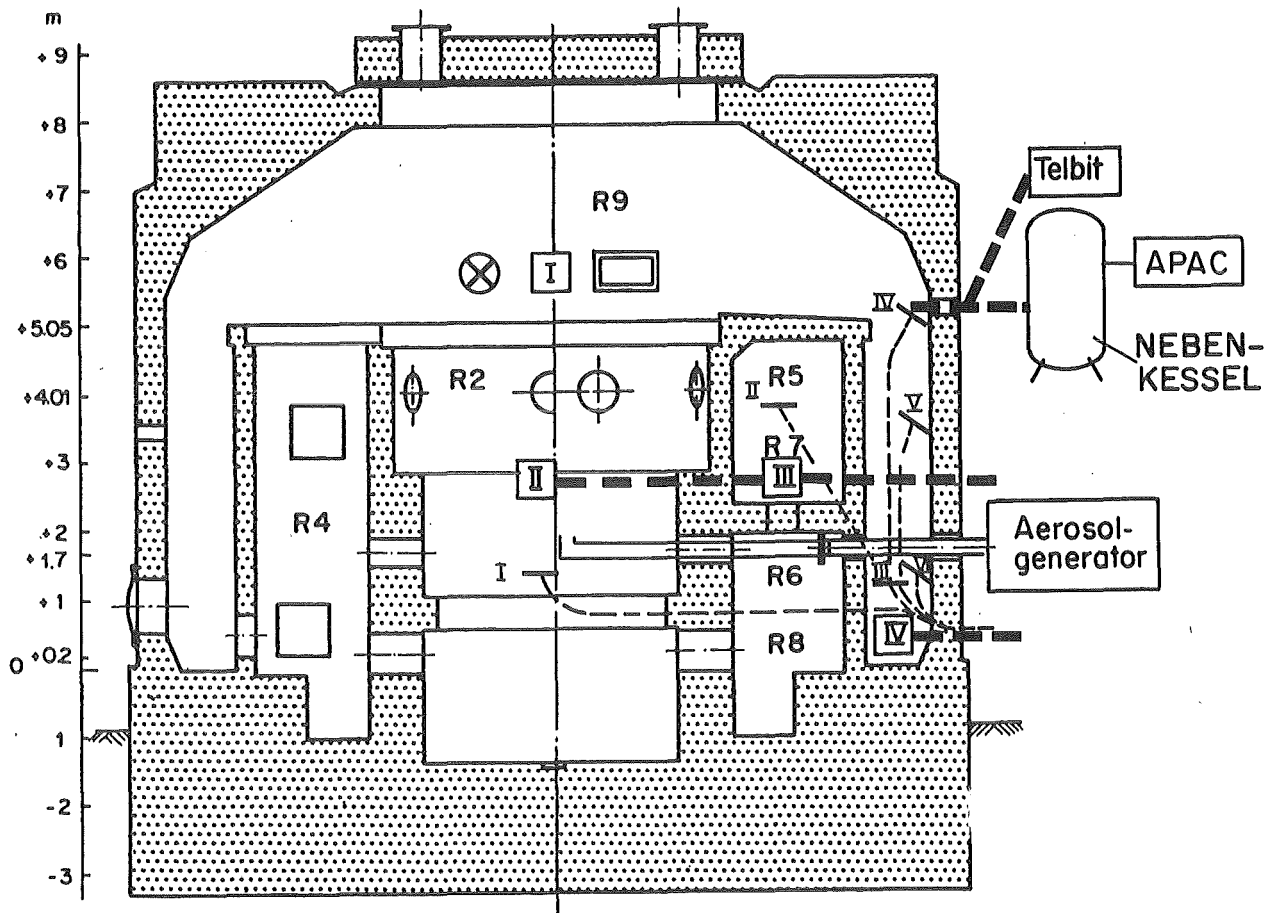
- die Massenkonzentration von 30 g/m^3 bis zu 1 mg/m^3 abnimmt, d. h. um 4 - 5 Größenordnungen,
- der mittlere geometrische Partikelradius als Funktion der Zeit zuerst von $0.3 \text{ } \mu\text{m}$ bis $0.8 \text{ } \mu\text{m}$ zu- und dann wieder bis $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ abnimmt (der aerodynamische Radius wird für diese Partikeln ungefähr 2 mal größer sein, d. h. $0.6 - 1.6 - 0.8 \text{ } \mu\text{m}$),
- die Aerosolpartikeldichte ungefähr 4 g/cm^3 beträgt:
- die Partikelkonzentration von $\sim 3 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ auf $< 10^{10} \text{ m}^{-3}$ abnehmen wird.

In Betracht zu ziehen sind die folgenden, besonders erschwerenden Umgebungsbedingungen für die Messung:

- Atmosphärentemperatur: $115 - 130 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Atmosphärendruck: bis 3 bar
- Dampfsättigung

Um die obengenannten Aerosolkenngößen zu messen, sind folgende Meßgeräte vorgesehen (Bild 6a und b):

1. Filterprobenanlage
2. Größenklassierende Geräte
3. Tröpfchenspektrometer
4. Fotometer
5. Kondensatmeßgerät
6. Kontinuierliche Massenkonzentration und Größenverteilung (außerhalb des Containments)
7. Schleusen mit Filterprobenahme, Fotometer



- FS = Filterstation
- ▭ IS = Impactorstation
- ⊗ PT = Polytec
- P = Pluviometer

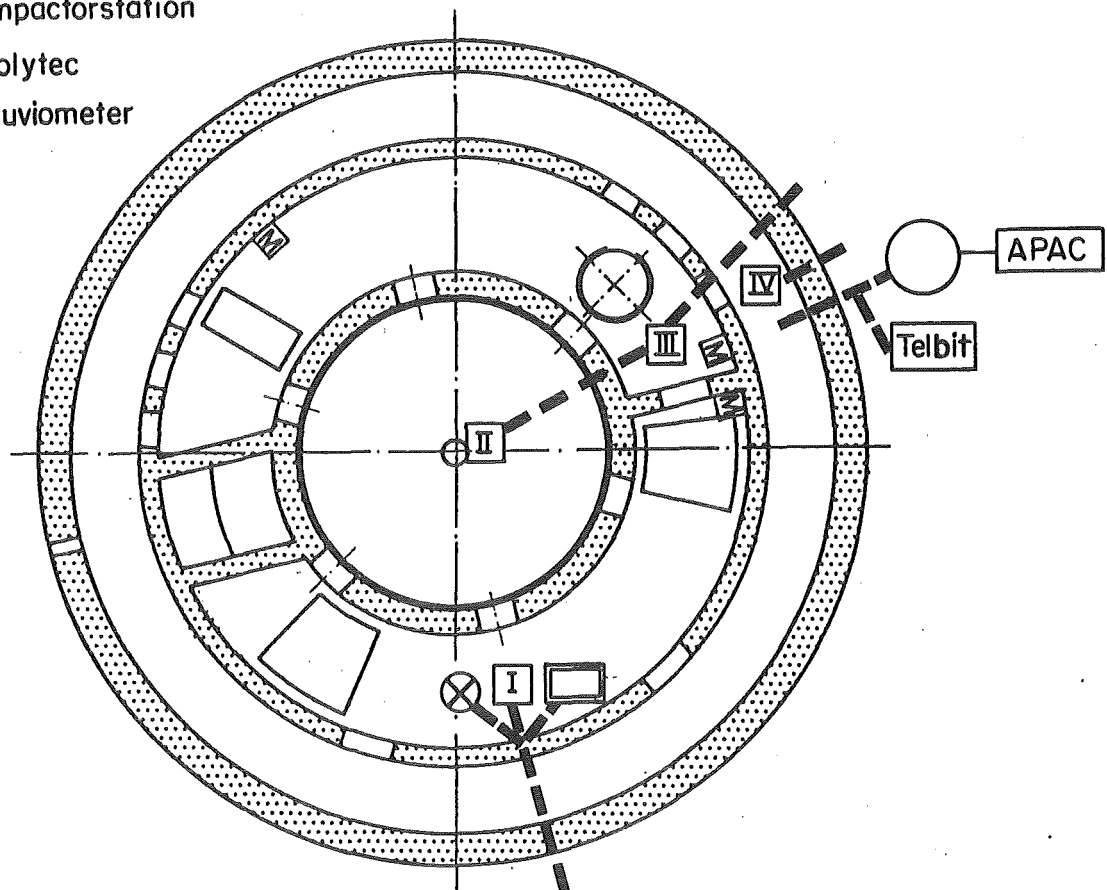


Bild 6a: Instrumentierung des Modellcontainments: Filterstationen, Impactorstation, optische Spektrometer, Pluviometer, Nebenkessel

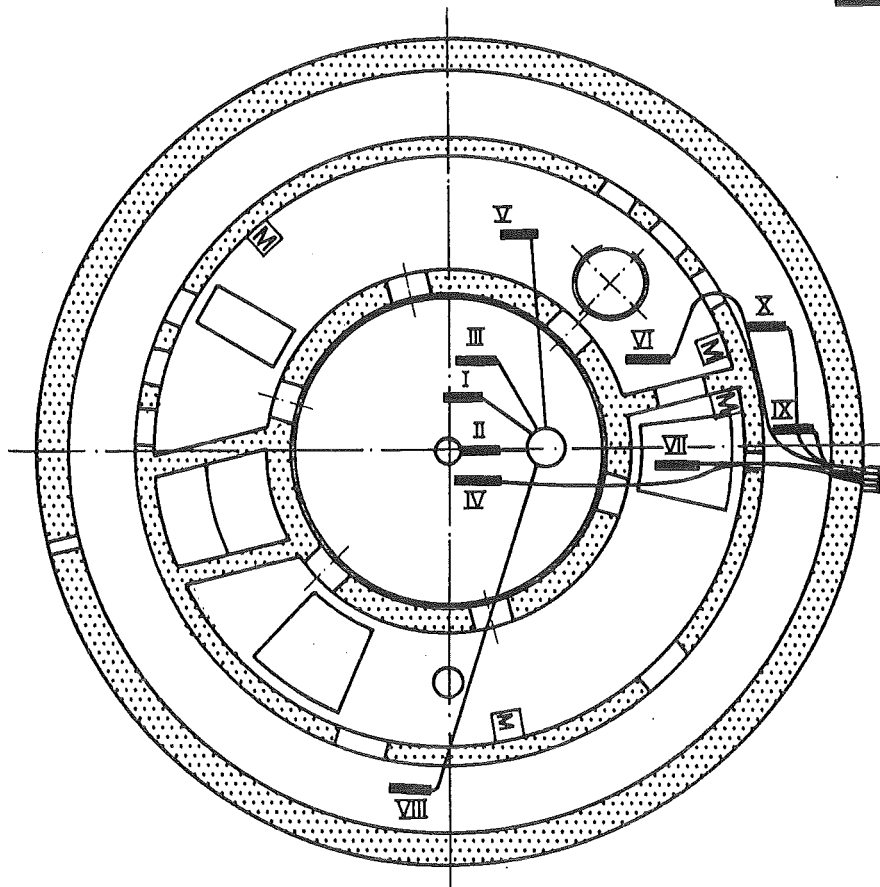
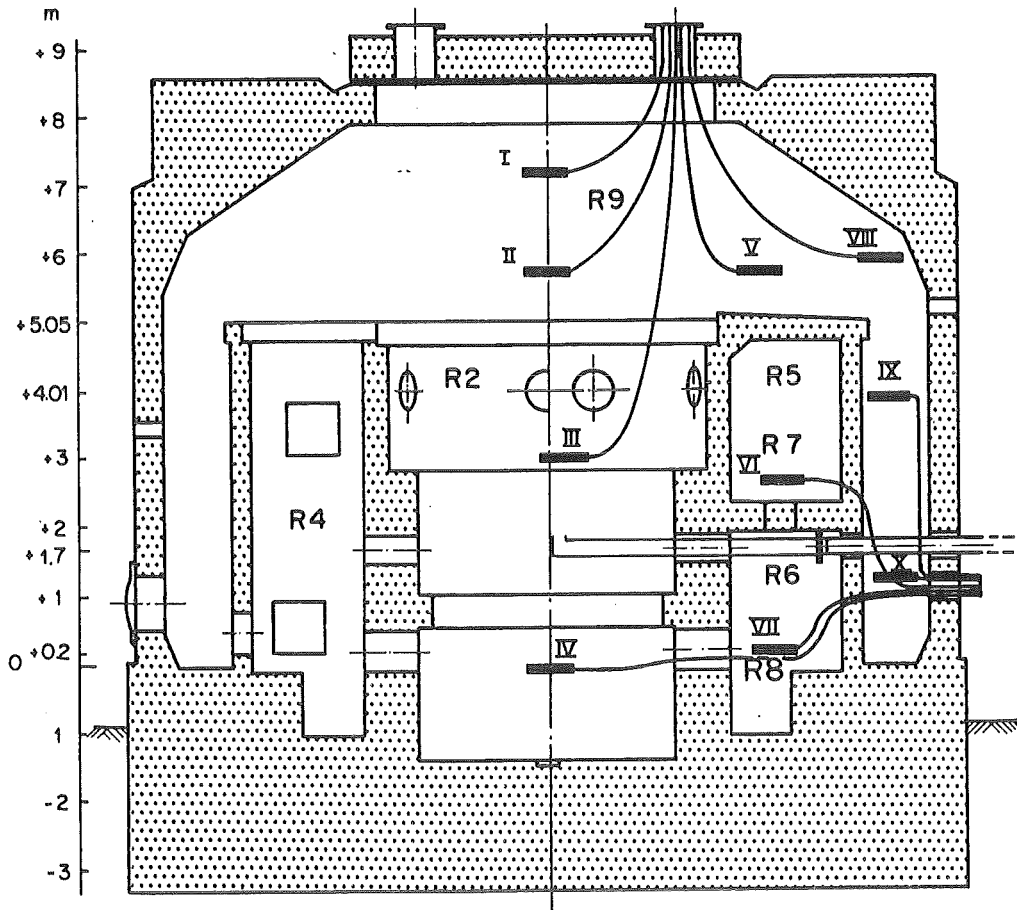


Bild 6b: Instrumentierung des Modellcontainments: Fotometer

5.2.1 Filterprobenanlage

Vier Meßplätze mit je fünf Filtergehäusen werden in einer vertikalen Halbebene im Kuppelvolumen des Modellcontainments angebracht. Massenkonzentration, Größenverteilung, evtl. Partikeldichte und Formfaktor werden durch Auswertung dieser Filter bestimmt. Die Massenkonzentration wird durch Wägung, Naßchemie (d. h. Spektrofotometer) und Neutronenaktivierungsanalyse gemessen.

Die Größenverteilung wird mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopie bestimmt. Die optimale Beladung des Filters liegt bei 1 mg. Für einen Volumenstrom zwischen 1 und 15 l/min beträgt die Probenahmezeit zwischen 1 und 100 Minuten

Die abgesaugte Luft wird nach dem Filter weitertransportiert und außerhalb des Containments gemessen: Die Wassermenge mit einer Waage, die Luftmasse mit einem Flowmeter. Dazu kommen noch verschiedene Druck- und Temperaturmessungen an verschiedenen Orten. Während der Aufheizphase werden die 20 Filtergehäuse beheizt und vor Wasser geschützt. Während des Experimentes werden die Filter mit trockener Luft geschützt.

5.2.2 Größenklassierende Geräte

Es wird ein Meßplatz mit fünf größenklassierenden Trägheitsabscheidern installiert. Zwei Typen sind vorgesehen:

1. Inertialspektrometer nach Prodi (INSPEC)

Dieses Spektrometer hat außer dem Luftführungs-System für das Aerosol ein solches für Reinluft, die in einer Ringdüse um die Aerosoldüse geführt wird und dort auf gleiche Geschwindigkeit wie der Aerosol-Lufstrom zu regeln ist. Hierbei hat man:

- Gesamter Durchfluß: 3, 6 oder 9 l/min,
- Aerosoldurchfluß: viel kleiner, regelbar,
- max. Beladung: 10 - 50 mg.

2. Impaktor Andersen Mark III (N.B.: 1 ACFM = 28 l/min)

Dies ist ein zehnstufiger Kaskadenimpaktor, der nur von Aerosol durchströmt wird, also keine Reinluftzumischung erhält.

- Durchfluß: 3 - 20 l/min
- max. Beladung: 50 mg

Die Impaktoren werden wie die Filter in ein geheiztes Gehäuse installiert. Die Durchflußmenge wird ebenso gemessen wie bei den Filtern.

Es werden 3 INSPEC-Geräte für die höheren Konzentrationen und 2 Impaktoren für die kleineren Konzentrationen benützt.

5.2.3 Tröpfchenspektrometer

Zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung sind optische Verfahren am besten geeignet. Es wird ein optisches Größenspektrometer des Types HC70 der Firma Polytec eingesetzt werden. Das Gerät wird innerhalb des Containments installiert, weswegen ein Schutz vor Temperatur und Feuchtigkeit benötigt wird. Der Gerätemeßkopf wird deshalb in einem Druckkessel installiert, der innen wassergekühlt und außen beheizt wird. Der Durchfluß wird nach demselben Prinzip wie bei den Filtern gemessen. Die Flußgeschwindigkeit in der Meßkammer ist durch das Gerät vorgegeben (2 - 10 m/s). Spülluft und abgesaugtes Aerosol müssen dieselbe Geschwindigkeit haben.

5.2.4 Fotometer

Zehn Fotometer werden im Containment installiert. Sie werden die Opazität der Atmosphäre an verschiedenen Orten messen. Das Fotometer besteht aus Meßkopf, Lichtleiter und Elektronik.

Der Meßkopf enthält die Sende- und Empfangsoptik mit Lichtleitern und einer Meßstrecke von 15 cm. Das Glasfaskabel zwischen Containment-Durchführung und Meßkopf ist 5 m lang und besteht wie die Lichtleiter des Meßkopfes aus dem Fasertyp B3 (Schott) mit 0,6 dB/m optischer Dämpfung. Lichtquelle und Detektor befinden sich außerhalb des Containments. Lichtquelle ist eine Diode mit 50 mW/sr Leistung bei $\lambda = 930$ nm (Vermeidung einer starken H₂O Absorptionsbande um 950 nm), mit 25 kHz moduliert. Detektor ist ein Fototransistor. Der Verstärker (Erni, RLS-B-50) hat einen Analogausgang 0-5 V zum Anschluß an die Datenerfassung.

5.2.5 Kondensatmessung

Kondensat wird im Containment mit drei Pluviometern und an drei Meßstellen an der Wand auf je 1 m³ große Fläche aufgefangen und der zeitliche Verlauf der Massenzunahme mit je einer Feinwaage gemessen. Beide Sammler-Typen besitzen Dampfabscheider mit Schwimmer-Ventilen als Druckbarrieren.

Die im Volumen - an den Aerosolpartikeln - kondensierte Wassermasse wird kalorimetrisch gemessen. Dazu wird die mit Tröpfchen beladene Atmosphäre durch ein zweistufiges Kalorimeter (Doppelkalorimeter) gesaugt, in dessen erster Stufe eine naßadiabatische Aufheizung und in der zweiten Stufe eine trockenadiabatische Aufheizung erfolgt. Aus Temperaturmessungen und aus den Heizleistungen läßt sich die Massenkonzentration der Tröpfchen bestimmen. Es werden drei Doppelkalorimeter an verschiedenen Stellen eingesetzt. Die Kalorimeter sind Spezialentwicklungen für das DEMONA-Projekt, die von der Universität Karlsruhe geliefert werden.

5.2.6 Kontinuierliche Messung der Massenkonzentration und der Größenverteilung

Aerosole werden auch nach außen abgesaugt und mit verschiedenen Geräten gemessen. Wegen des Druck- und Feuchtigkeitsunterschiedes erfolgt die Absaugung in einen Nebenkessel über eine Schleusenstrecke im Chopperbetrieb (Bild 7). Am Nebenkessel sind folgende Aerosol-Meßapparaturen angeschlossen:

- zur Messung der Massenkonzentration das Beta-Staubmeter Telbit,
- für die Größenverteilung ein INSPEC, sowie
- der Aerosol-Partikel-Analysator (APA) von California Instruments.

Diese Messungen werden in regelmäßigen Zeitabständen während der Experimente durchgeführt und liefern on-line-Daten.

5.2.7 Schleusen (Meßlanzen)

Vier Schleusen werden installiert und im Notfall benützt, um:

- Filterproben von Hand zu entnehmen
- Fotometer (batteriebetrieben) einzubringen

Während des Restes der Zeit werden sie gebraucht, um:

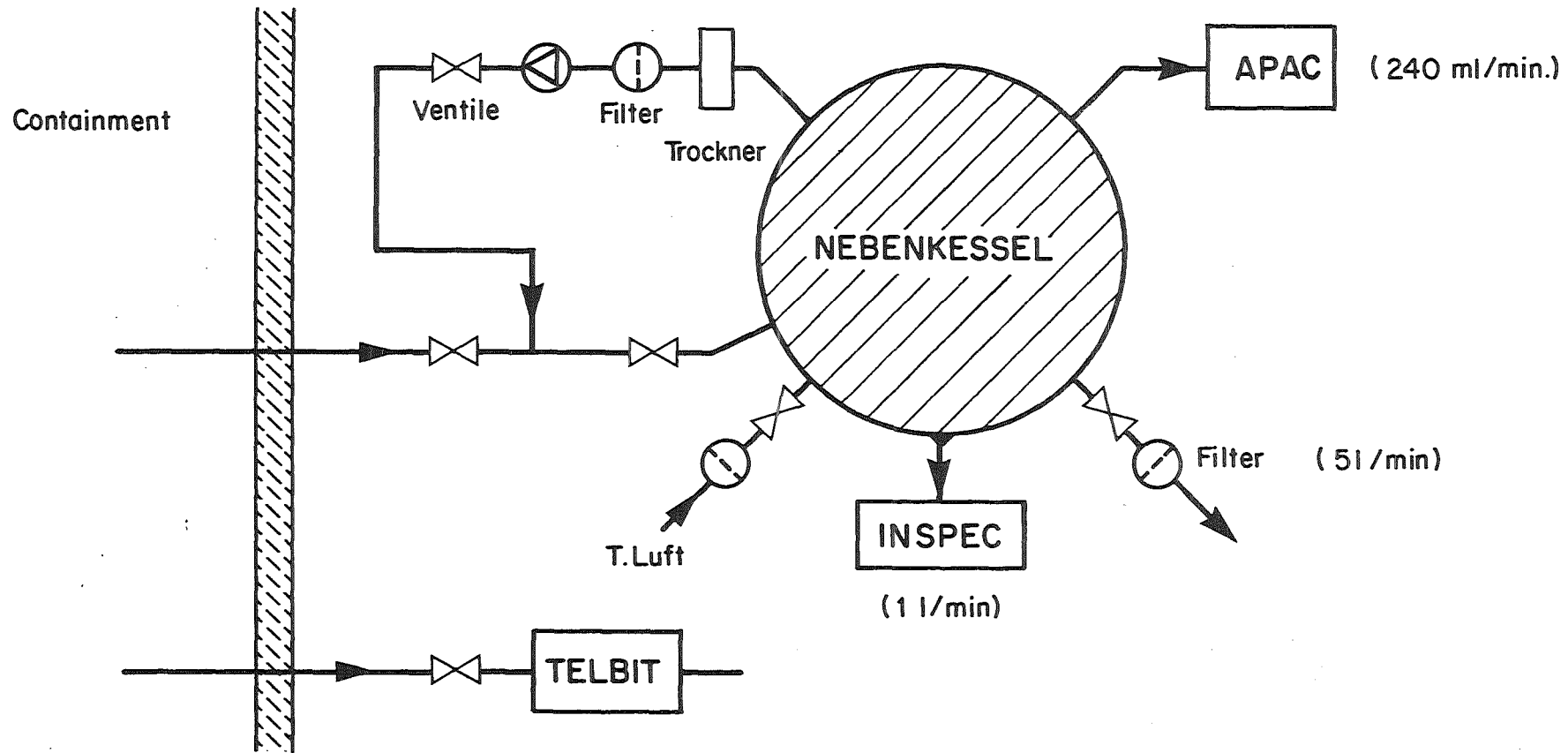


Bild 7.: Schematische Darstellung des Nebenkessel-Systems

- Messungen mit einem Laser-Fotometer durchzuführen
- Filmaufnahmen zu machen
- ins Containment mit einem Endoskop hineinzusehen.

Für die vier Schleusen werden bereits bestehende Durchführungen durch die Seitenwände und das Dach benutzt.

5.2.8 Datenerfassung

Von den Dateninterfaces der sechs Meßgeräte-Typen bzw. deren Mehrfachbatterien gelangen die Daten zum Meßwert-Erfassungsprozessor, von wo aus sie mit einer mittleren Rate von 600 Bd (max. 19'200 Bd) dem HP 9836 Datenprozessor zugeführt werden. An diesen angeschlossen sind der 9138A, 8" Winchester Disk Drive, sowie ein Drucker.

Die analog und die digital anfallenden Meßdaten werden getrennt via GESPAC-Interfaces unter RS232 C dem HP Datenprozessor zugeführt.

Die allgemeine Zykluszeit beträgt ca. 30 Sekunden. Sie ist aufgeteilt in die Dialogbereiche für BF, EIR I (analog), EIR II (digital) und die Abspeicherung.

Analoge inputs liefern: 4 Flowmeter, 4 Temperaturmeßstellen, das Telbit- β -Staubmeter und die 10 Fotometer.

Digitalinput liefert das APA, die 7 Mettlerwaagen (inklusive Pluviometer-Batterie), das Polytec-Spektrometer und die verschiedenen Ventilzustandsmeldungen.

5.3 Aerosolerzeugung

5.3.1 Grundlagen

Die im DEMONA-Programm eingesetzten Aerosolgeneratoren sollen ein Modell-aerosol erzeugen, welches im Aufbau und Verhalten, dem im hypothetischen Störfall vorliegenden Aerosol weitgehend entsprechen. Dabei sind bei der Wahl der chemischen Zusammensetzung des erzeugten Misch-aerosols aus Sicherheitsgründen Grenzen gesetzt. Entsprechend den Gegebenheiten im hypothetischen Störfall müssen metallische bzw. oxidische Kondensationsaerosole erzeugt werden. Metalle werden in einem Edelgasplasma verdampft. Durch spontane Kondensation entstehen polydisperse Aerosole mit der gewünschten Größenverteilung von 0,2 - 0,5 μm der Primärpartikeln. Im allgemeinen wird in

einem Edelgasplasma ein Aufschmelzen von Metallpartikeln erreicht (Plasma-spritzen). Mischt man jedoch Sauerstoff in den Plasmaraum, so erfolgt durch die exotherme Oxidationsreaktion ein zusätzlicher Energiegewinn, der eine Verdampfung der Metalltröpfchen bewirkt. An den kühleren Randzonen der Plasmafackel wird eine Kondensation, verursacht durch den Sauerstoffpartialdruck im Gasgemisch, nun als Oxidaerosol stattfinden. Dies gilt für Metalloxidsysteme mit entsprechend niedrigem Dissoziationsdruck (Fe, Sn, Ce). Die Menge des erzeugten Aerosols wird durch die Menge an verdampftem Metall bestimmt. Daraus resultiert die Abhängigkeit der Aerosolausbeute von der zugeführten thermischen Energie in Relation zur zugeführten Metallpulvermenge. Die "äußeren" Faktoren Pulverzufuhr rate, Pulverkorngröße, Zusammensetzung des Plasmagases und elektrischer Wirkungsgrad der Plasmaanlage bestimmen die maximal generierbare Aerosolmenge pro Zeiteinheit.

Die im Brennerraum erzeugten Aerosole sind bedingt durch die hohe Konzentration instabil. Um Verluste durch Koagulation gering zu halten, muß die Partikelkonzentration möglichst schnell durch Verdünnung erniedrigt werden. Als die zur NAUA-Demonstration erforderliche maximale Aerosolkonzentration im Modellvolumen werden $12 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ gefordert /20/. Diese Konzentration sollte nach den bei ORNL vorliegenden Ergebnissen und nach den bei LAF I gewonnenen experimentellen Resultaten mit dem beschriebenen Verfahren erreichbar sein.

5.3.2 Ausführung der Aerosolgeneratoren

Ein wesentlicher Bestandteil der Aerosolgeneratoren ist eine kommerzielle Plasmaanlage, wie sie üblicherweise zum Beschichten von Werkstoffen eingesetzt wird (Plasmaspritzen). Es werden, um die im Projekt Aerosol-Release and Transport (ART) bei ORNL gewonnenen Erfahrungen /20/ nützen zu können, drei Anlagen der Firmen Metco mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 240 kW eingesetzt. Dabei werden die vom Hersteller bereits optimierten Anlagenteile zur Pulverzufuhr unverändert übernommen und in die eigens konzipierte Kammer zur oxidierenden Verdampfung integriert. Die Aerosol-erzeugung erfolgt in dieser "Brennkammer" aus hochtemperaturbeständiger Magnesiumoxidformmasse (Magnesital). In den zylinderförmigen Brennraum, in welchen ein Ar-He-Plasma eintritt, wird Sauerstoff durch ringförmig um die Brenneranode verteilte Sauerstoffdüsen zugeführt.

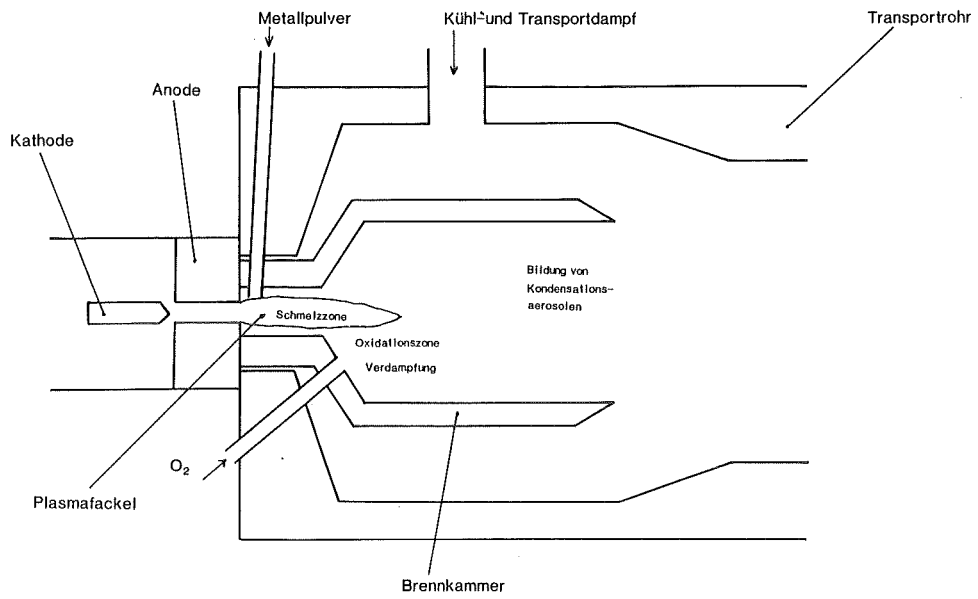


Bild 8: Schematische Darstellung eines Aerosolgenerators

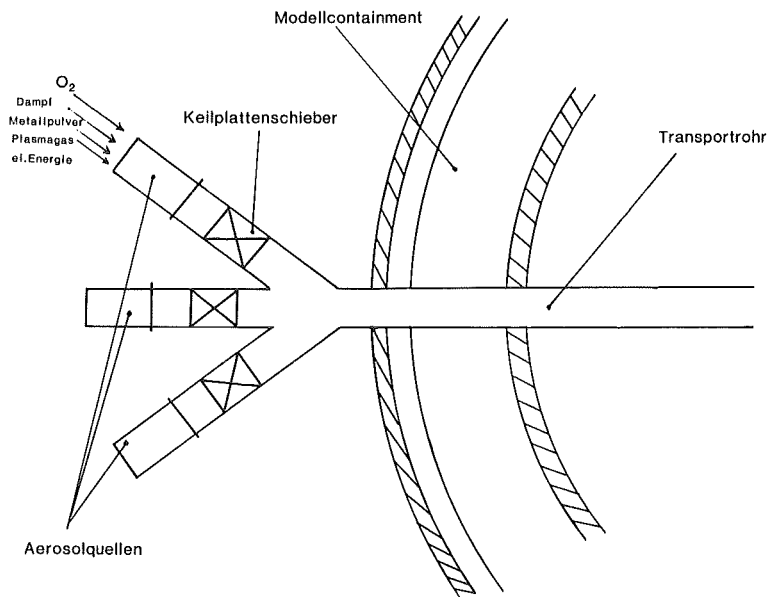


Bild 9: Anordnung der drei Generatoren am Modellcontainment

Die Brennkammer wird in einem Gehäuse aus Edelstahl montiert und von einem Kühlmedium umspült. Der als Kühlmedium vorwiegend benutzte Wasserdampf hat drei Funktionen zu erfüllen. Neben der Kühlung wird durch eine geeignet gewählte Konstruktion eine Verdünnung des Aerosols am Brennkammerausgang erreicht. Weiterhin wirkt der Wasserdampf als Aerosoltransportmedium (Bild 8).

Die Brennkammer wird durch Absperrorgane gegen das Modellcontainment (Keilpattenrundschieber) abgeschlossen. Es werden simultan drei der beschriebenen Aerosolgeneratoren eingesetzt. Die Zusammenführung der Einzelquellen in das gemeinsame Aerosolzuführungsrohr zum Modellcontainment wird als planare Einmündung ausgeführt. Die Aerosolquellenanordnung ist in einem Winkel von 10 Grad zur Horizontalen geneigt. Der Durchmesser des Aerosolzuführungsrohres wurde nach Verlustrechnungen des LAF I auf 250 mm festgelegt. Die Länge des Einspeiserohres bis in das Zentrum des Modellcontainments wird etwa 450 cm betragen (Bild 9). Die Erprobung der gesamten Aerosolerzeugungsanlage wird am Modellcontainment erfolgen.

5.4 Das Versuchsprogramm

Wegen der hohen Versuchskosten und der begrenzten insgesamt zur Verfügung stehenden Zeit wurde ein Versuchsprogramm mit sieben Einzelversuchen und drei Reserveversuchen aufgestellt. Im einzelnen sind dies:

1. Thermodynamiktest
2. Trockenversuch
3. Basisversuch, FK6 ähnlich
4. Versuch mit verringerter Aerosolquelle
5. Versuch mit transienter Thermodynamik
6. Versuch mit komplexer Geometrie
- 7-9. Reserveversuche, falls notwendig
10. Demonstrationsversuch

Diese Versuchsmatrix besteht aus Variationen jeweils einzelner Parameter, ausgehend von einem Basisversuch (Nr. 3), der wie folgt definiert ist:

Basisversuch, FK6 ähnlich

Die Freisetzungskategorie FK6 ist mit mehr als 99 % Eintrittswahrscheinlichkeit die häufigste aller in /21/ berücksichtigten Versagensarten des Containments. Bei FK6 erfolgt der allein natürliche Aerosolabbau über den längsten Zeitraum von ca. 5 Tagen. Wenn es gelingt, den Aerosolabbau über so lange Zeiträume richtig zu berechnen, dann ist dies auch für die anderen Freisetzungskategorien mit größeren Lecks im Containment zu erwarten.

Die Übertragung des FK6-Szenarios auf das Modellcontainment erfolgt so, daß nur die Phase des Aerosolabbaus simuliert wird; die Vorlaufphase dazu richtet sich nach den technischen Möglichkeiten der Versuchsanlage. Bei FK6 sind zu Beginn der Aerosolfreisetzung die transienten thermodynamischen Vorgänge (Blowdown, Aufheizung der inneren Oberflächen) abgeschlossen. Dieser Zustand wird auch im Basisversuch hergestellt, ehe die Aerosoleinspeisung beginnt. Dazu wird das Modellcontainment durch Einspeisen von Dampf aufgeheizt und unter Druck gesetzt. Dieser Vorgang dauert 40 - 50 Stunden.

Nach dieser Zeit ist ein quasistationärer thermodynamischer Zustand erreicht, der Druck beträgt 3 Bar abs, die Temperatur 115 °C. Es folgt die Phase der Aerosolerzeugung, die maximal 1 h dauert. In dieser Zeit wird eine Aerosolmassenkonzentration von ca. 12 g/m³ Feststoffpartikeln eingestellt.

Die dritte Phase ist die Aerosolabbauphase. Bedingt durch die kleineren Dimensionen des Modellcontainments (verglichen mit einem LWR-Kernkraftwerk) erfolgt der Abbau schneller als im Reaktorcontainment. Nach spätestens zwei Tagen hat die Aerosolkonzentration soweit abgenommen, daß eine Messung nicht mehr möglich ist.

Nach Beendigung der Aerosolabbauphase wird das Modellcontainment durch Abblasen und Belüften soweit abgekühlt, daß es begehbar wird und die innen befindlichen Probenahmegeräte geborgen werden können.

Ausgehend von diesen Basisversuchen sind die anderen Versuche wie folgt definiert:

Trockenversuch, ohne Dampf

Dieser Versuch liefert einen Referenzdatensatz zum Vergleich mit den späteren nassen Versuchen, um die richtige Modellierung der dampfbezogenen Aerosolprozesse (Kondensation, Diffusiophorese, Kompaktierung der Partikeln) zu überprüfen sowie ihren abbaufördernden Beitrag zu demonstrieren.

Versuch mit kleiner Aerosolquelle

Die Anfangsmassenkonzentration des Aerosols spielt eine wichtige Rolle im Hinblick auf den radiologischen Quellterm. Der dabei aufgezeigte nichtlineare Zusammenhang wird durch das dynamische Verhalten des Aerosolsystems geprägt. Ein Versuch mit einer gegenüber dem Basisversuch um ca. eine Größenordnung verringerten Anfangskonzentration soll zeigen, daß der NAUA-Code die Aerosoldynamik richtig berechnet.

Versuch mit transienter Thermodynamik

Das Zusammenspiel des COCMEL- und des NAUA-Codes auch bei instationären Verhältnissen soll durch diesen Versuch überprüft werden. Dazu kann die Aerosoleinspeisung bereits erfolgen, ehe stationäre, thermodynamische Verhältnisse erreicht werden, oder später durch Veränderung der Dampfungzufuhr eine Transiente erzeugt werden. Das genaue Vorgehen wird anhand der bis dahin gewonnenen Erfahrungen festzulegen sein.

Versuch mit komplexer Geometrie

Während bei den ersten fünf Versuchen alle Abdeckungen und Überströmöffnungen des Modellcontainments offen sind (s. Bild 3), um eine Einraumgeometrie zu approximieren, wird im sechsten Versuch eine Mehrraumgeometrie mit mindestens drei Compartments untersucht. Ziel des Versuchs ist die Überprüfung der durch Abschätzungen belegten Aussage, daß zumindest beim Fk6 eine Einraum-NAUA-Rechnung genügend genaue Ergebnisse liefert.

Demonstrationsversuch

Dieser Versuch ist eine Wiederholung des Basisversuchs. Es soll als Demonstration für die interessierte Öffentlichkeit die Wirksamkeit des natürlichen Aerosolabbaus vorführen. Dazu ist voraussichtlich eine Zusatzinstrumentierung (Videoaufzeichnung, Innenbeleuchtung) notwendig.

Der Zeitplan sieht vor, daß nach Vorversuchen zur Meßtechnik, Aerosolzeugung und Leckagefunktion im Jahre 1983, Anfang 1984 das eigentliche Versuchsprogramm beginnt und Ende 1984 endet. Auswertung, Dokumentation und Publikation der Ergebnisse, die schon nach jedem Versuch beginnen, werden 1985 abgeschlossen (siehe Bild 10).

6. Schlußbemerkung

Das DEMONA-Programm wird im Rahmen des Projekts Nukleare Sicherheit (PNS) der Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH durchgeführt. Es soll dazu dienen, die bedeutende Rückhaltefunktion eines LWR-Containments für im Störfall freigesetzte Aktivität, die sich allein aus natürlichen Abbauprozessen ableitet, zu demonstrieren. Die Grundlagen, die Ziele und die Vorgehensweise im DEMONA-Programm sind in diesem Bericht zusammengefaßt dargestellt.

Daneben soll auf zwei andere PNS-Programme hingewiesen werden, das BETA-Programm und das SASCHA-Programm. Während die Ergebnisse des SASCHA-Programms zur Untersuchung der Aktivitätsfreisetzung aus einer Kernschmelze bereits

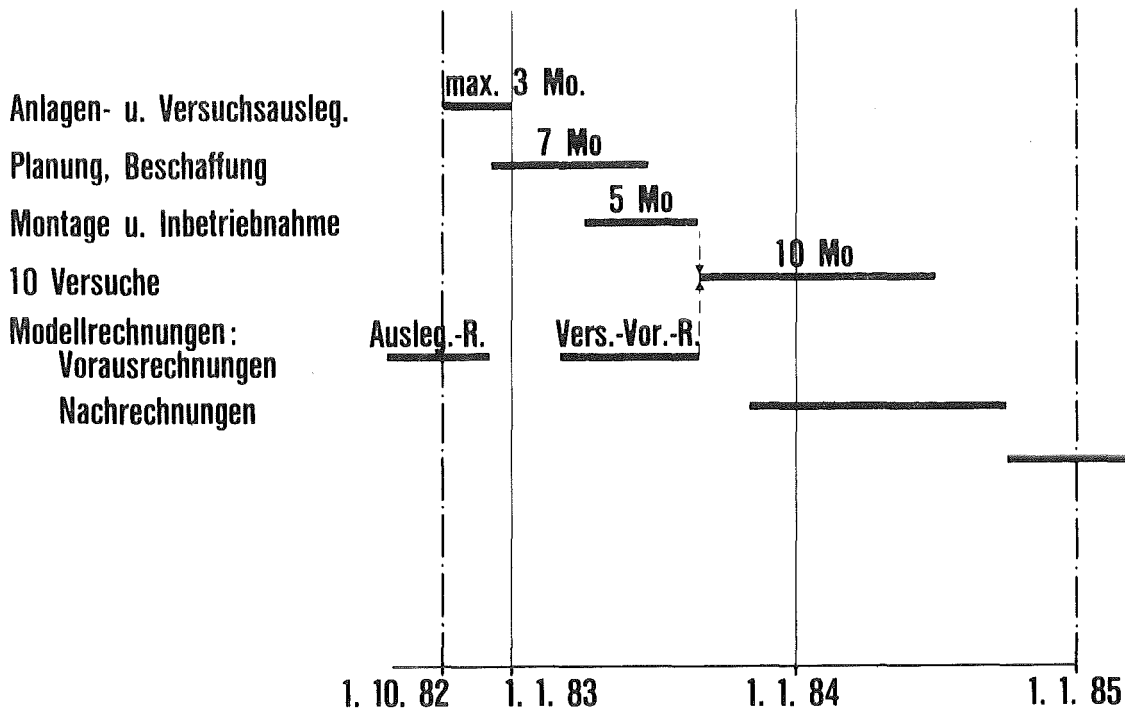


Bild 10: Zeitplan des DEMONA-Programms (Stand:Anfang 1983)

weitgehend vorliegen /22/, werden die Ergebnisse des BETA-Programms /23/ zur Untersuchung der Wechselwirkung der Kernschmelzen mit BETON für 1985 erwartet. Da dann auch die Ergebnisse des DEMONA-Programms vorliegen werden, ist davon auszugehen, daß 1985 die drei wesentlichen Bestimmungsstücke zur Absicherung der Modelltheorie eines hypothetischen LWR-Störfalls verfügbar sind. Mit den Ergebnissen aus BETA, SASCHA und DEMONA sowie den zugehörigen Codes NAUA und WECHSL wird es dann in Verbindung mit einem geeigneten Containment-Code möglich sein, den radiologischen Quellterm - auch für hypothetische LWR-Störfälle - zuverlässig durch eine experimentell verifizierte Modelltheorie zu berechnen.

7. Literatur

- /1/ W. Schikarski: "The Karlsruhe Research Program on Nuclear Aerosols and its Relation to the Hazard of Fast Sodium Reactors", IAEA-Symposium on Treatment of Airborne Radioactive Wastes, SM 110/61, New York, USA (1968)

- /2/ S. Jordan, W. Schikarski, H. Wild: "The Behavior of Nuclear Aerosols in the Post-accident Atmosphere of Fast Breeder Reactor Containments - Experimental and Theoretical Results", VII. Congress International, Société Française de Radioprotection, Versailles (1974)

- /3/ Nuclear Aerosols in Reactor Safety, A State-of-the-Art Report by a Group of Experts of NEA/CSNI, OECD 1979

- /4/ Supplementary State-of-the-Art Report on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, OECD/CSNI/NEA, 1983 (in print)

- /5/ W. Schikarski, "The Aerosol Behavior in LMFBR Accidents: Results of TUNA Experimental Program and Comparison with PARDISEKO-Code", 14th Air Cleaning Conference, Sun Valley, Idaho (1976)

- /6/ F. Gelbard, I. H. Seinfeld: The General Dynamic Equation for Aerosols, Journal of Colloid and Interface Science 68 (1979), S. 363-382

- /7/ Messung von Partikeln, Prüfkriterien und Prüfmethode zum Bestimmen partikelförmiger Beimengungen in Gasen, Begriffe und Definitionen, VDI 3491 (1975)

- /8/ H. Bunz: Paradiseko IIIb: Ein Computerprogramm zur Berechnung des Aerosolverhaltens in geschlossenen Behältern, KfK 2903 (April 1980)

- /9/ H. Bunz, M. Koyro, W. Schöck: NAUA Mod3 - Ein Computerprogramm zur Beschreibung des Aerosolverhaltens in kondensierender Atmosphäre, KfK 3154 (September 1981)

- /10/ Fast Reactor Code Comparison, CEC/CONT, to be published as EUR-report
- /11/ H. Jordan, W. Schikarski, H. Wild, "Nukleare Aerosole in geschlossenen Systemen", KfK-1989 (1974)
- /12/ W. Cherdron, Jahrestagung Kerntechnik 1984, zur Veröffentlichung eingereicht
- /13/ H. Sauter, H. Bunz: Aerosol Behavior in a Closed Vessel Under the Regime of Natural Turbulent Convection, Jahrestagung 1983 der Gesellschaft für Aerosolforschung, München, 14-16.09.1983, to be published by Journal of Aerosol Science
- /14/ B.I. Mason: "The Physics of Clouds" Clarendon Press (1971)
- /15/ W. Schöck, H. Bunz, M. Koyro: "Messungen der Wasserdampfkondensation an Aerosolen unter LWR-unfalltypischen Bedingungen, KfK 3153 (August 1981)
- /16/ L. Waldmann: "Über die Kraft eines inhomogenen Gases auf kleine suspendierte Kugeln", Z. Naturforschg. 14a (1959), S. 589-599
- /17/ K.H. Schmitt, L. Waldmann: "Untersuchungen an Schwebstoffteilchen in diffundierenden Gasen", Z. Naturforschg. 15a (1960), S. 843-851
- /18/ G. Stetter: "Staubabscheidung durch Druck- und Thermodiffusion", Staub, Reinhaltung der Luft 20 (1960), S. 244-252
- /19/ H. Bunz, M. Koyro, W. Schöck: "NAUA Mod4: A Code for Calculating Aerosol Behaviour in LWR Core Melt Accidents Code Description and Users Manual", KfK 3554 (August 1983)

- /20/ R.E. Adams, M.L. Tobias: Aerosol Release and Transport Program
Quarterly Progress Report for April-June 1982, NUREG/CR-2809,
Vol. 2
- /21/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Verlag TÜV Rheinland, 1979
- /22/ H. Albrecht: Aktivitätsfreisetzung und Aerosolbildung beim
LWR-Kernschmelzen, in: Sammlung der Vorträge zum Jahreskolloquium
1983 des Projekts Nukleare Sicherheit, KfK 3670, im Druck
- /23/ H. Alsmeyer, M. Peehs, D. Perinic: Untersuchung der Wechsel-
wirkung einer Kernschmelze mit Beton in der BETA-Versuchsanlage,
in: Sammlung der Vorträge zum Jahreskolloquium 1982 des Projekts
Nukleare Sicherheit, KfK, 3470, 1983
- /24/ H. Bunz, M. Koyro, W. Schöck: NAUA-Mod4, A Code for Calculating
Aerosol Behavior in LWR Core Melt Accidents, Code Description
and Users Manual, KfK 3554 (1983)

8. Anhang

Liste der verwendeten Symbole

$n(r, \vec{R}, t)$:	Dichte der Partikeln der Größe r am Ort \vec{R} zur Zeit t in P/cm^3
$n(r_i, t)$:	Konzentration von Partikeln der Klasse i zur Zeit t in P/cm^3
r_i :	Volumenäquivalenter Radius der Partikeln der Klasse i in cm .
V_i :	Volumen der Partikeln der Größenklasse i in cm^3
$\alpha_x(r_i)$:	Abscheidekoeffizient der Partikeln der Klasse i bzw. des Prozesses x in $1/sec$.
F_x :	Abscheidefläche zu Abscheideprozeß x in cm^2 ; $x = D, S, DPh, L$
V :	Volumen des Containments in cm^3
f :	Koagulationsformfaktor
κ :	dynamischer Formfaktor
η :	Viskosität des Trägergases in Poise
ρ :	Materialdichte der Partikeln in g/cm^3
g	Erdbeschleunigung in cm/sec^2
δ_D :	Diffusionsgrenzschicht in cm
$K(r_i, r_k)$:	Koagulationswahrscheinlichkeit zwischen Partikeln der Größen r_i und r_k in $cm^{-3} sec^{-1}$
β_{ij}^k :	Interpolationskoeffizient bei Koagulationsrechnung
$S(r_i, t)$:	Quelle von Partikeln der Klasse i zur Zeit t in $P/cm^3 \cdot sec$
k :	Boltzmann-Konstante in $erg/grad$
$\dot{V}_k(t)$:	Volumenwachstumsgeschwindigkeit der Partikeln der Klasse k aufgrund von Wasserdampfkondensation in cm^3/sec
S :	Übersättigung
σ :	Oberflächenspannung des Wassers in erg/cm^2
M :	Molgewicht des Wassers
R :	Allgemeine Gaskonstante in $erg/grad \cdot mol$
L :	Latente Wärme des Wassers beim Übergang Dampf/Wasser in erg/g
ρ_w :	Dichte des Wassers in g/cm^3
K :	Wärmeleitfähigkeit des Trägergases in $erg/cm \cdot sec \cdot grad$
D :	Diffusionskoeffizient des Trägergases in cm^2/sec
$P_s(T)$:	Sättigungsdruck des Wasserdampfes in dyn/cm^2