

**SIMULATION OF DYNAMIC PRESSURE DIFFERENCES
IN FULL-PRESSURE CONTAINMENTS
AFTER A LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT,
COMPARISON BETWEEN THEORETICAL
AND EXPERIMENTAL RESULTS**

**(Simulation von dynamischen Druckdifferenzen in Volldrucksicherheitsbehältern
nach einem Kühlmittelverlustunfall, vergleich theoretischer
und experimenteller ergebnisse)**

G. MANSFELD

*Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung,
Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH. Forschungsgelände, D-8046 Garching, Germany*

SUMMARY

Since June 1974, integral large-scale experiments have been carried out under original conditions in a scale-model containment, simulating loss-of-coolant accidents (LOCA) in a subdivided full-pressure containment. The Battelle-Institut in Frankfurt is conducting these experiments on behalf of the German Ministry of Research and Technology, Bonn.

Up to the end of 1976 the test facility has been used for four trial runs and 16 PWR-LOCA experiments with single- and double-ended pipe ruptures of 100 mm diameter in a steam generator compartment, in the nozzle compartment, in the pressurizer compartment, in the reactor compartment and in the dome compartment.

The main objective of the experiments is the verification of the computer codes used up to now for the design of containment structures. These are built to prevent the release of radioactive materials into the environment of a power reactor in case of LOCA. In this case the containment system may be subject to a very strong fluid dynamic transient. This in turn causes the generation of pressure differentials during the pressurization process resulting finally in a rapid rise of the total pressure due to the release of the whole primary energy. The codes now in use in Germany to predict the fluid dynamic transient are ZOCO V or ZOCO VI, DDIFF and PREGA.

For the first time the Battelle-experiments have given the possibility to compare theoretical and experimental results for a subdivided full-pressure containment after a LOCA. These experimental results of the main tests C1 to C13 with PWR-configuration are, therefore, compared with the analytical simulation obtained from the computer codes ZOCO VI, DDIFF and newly developed COFLOW. With respect to generation of pressure differences an extensive study has been performed, which shows the influences of the following parameters: water entainment, vent flow coefficients and subnodalization of great compartments. In addition to this, it has been shown that it may be necessary in some arrangements of the compartments and the vent flow paths to incorporate the kinetic energy in the analytical model.

1. Einleitung

Bisher erfolgte die Auslegung von Sicherheitsbehältern ausschließlich aufgrund von Rechenergebnissen, die mit Containmentrechenprogrammen ermittelt wurden. Diese Rechenprogramme müssen alle wesentlichen physikalischen Effekte, die während eines Kühlmittelverlustunfalls auftreten, in Form von mathematischen Formulierungen berücksichtigen. Ergebnisse, die mit Hilfe dieser Rechenprogramme erhalten werden, sind jedoch mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet.

Um nun Informationen über die Zuverlässigkeit und über den informativen Wert solcher Rechenprogramme zu erhalten, wurden umfangreiche Experimente initiiert.

Im Rahmen des deutschen Forschungsprogramms RS 50 "Druckverteilung im Containment" werden im Battelle-Institut in Frankfurt an einem Modellcontainment, welches in starker Anlehnung an den Sicherheitsbehälter des Kernkraftwerkes Biblis erbaut wurde, seit Juni 1974 Versuche unter Originalbedingungen durchgeführt, die Kühlmittelverlustunfälle in einem vielfach unterteilten Volldrucksicherheitsbehälter simulieren. Dabei werden u.a. die zeitlichen Druck- und Temperaturverläufe in den einzelnen Räumen gemessen. Ziel des Versuchsprogrammes ist es, die vorhandenen Rechenprogramme zur Auslegung von realen Volldrucksicherheitsbehältern experimentell zu verifizieren und ggf. zu überarbeiten.

Zu diesem Forschungsprogramm wurden vom Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung bereits zahlreiche Beiträge während der Planungs- und Aufbauphase des Modellcontainments /1, 2, 3/ sowie der Durchführung der Experimente /4, 5/ geliefert.

In den nun folgenden Ausführungen werden die Versuchsanlage und das Versuchsprogramm kurz vorgestellt und anschließend experimentell ermittelte Ergebnisse der Hauptversuche C1, C5 und C6 mit den theoretischen Ergebnissen der Rechenprogramme ZOCO VI /6/, DDIFF /7/ und mit dem neu entwickelten Rechenprogramm COFLOW (Containment flow) während der Anfangsphase des Kühlmittelverlustunfalles verglichen, d.h. in der ersten Sekunde nach Blowdownbeginn, wobei auf das Rechenprogramm COFLOW etwas näher eingegangen wird. Die Ausführungen sollen zeigen, daß die instationären strömungsmechanischen Vorgänge in der Anfangsphase des Blowdowns, d.h. die dynamischen Effekte der Zweiphasen-Zweikomponentenströmung in einem vielfach unterteilten Volldrucksicherheitsbehälter zur Bestimmung von dynamischen Druckdifferenzen nicht ohne weiteres vernachlässigt werden dürfen.

2. Versuchsanlage und Versuchsprogramm RS 50

Die Versuchsanlage besteht aus einem Primärkühlmittelkreislauf und einem speziellen Modellcontainment mit einem Linearmaßstab 1 : 4, s. Abb. 1. Die Komponenten des Kühlmittelkreislaufs sind zwei Druckkessel, die Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger simulieren, Rohrleitungen mit den Durchmessern 100, 150 und 200 mm, welche die Druckkessel mit der Bruchstelle verbinden,

sowie ein Hilfskreislauf. Der Kühlkreislauf hat ein Volumen von ca. 7 m^3 und ist ausgelegt für einen maximalen Druck von 140 bar und einer maximalen Temperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Modellcontainment besteht aus schlauff bewehrtem Beton. Seine technischen Daten sind näherungsweise:

- Außendurchmesser	12 m	
- Gesamthöhe	12,5 m	
- Auslegungsdruck	6 bar	
- freies Volumen	580 m^3	} DWR-Konfi- guration
- Kondensationsflächen	1255 m^2	

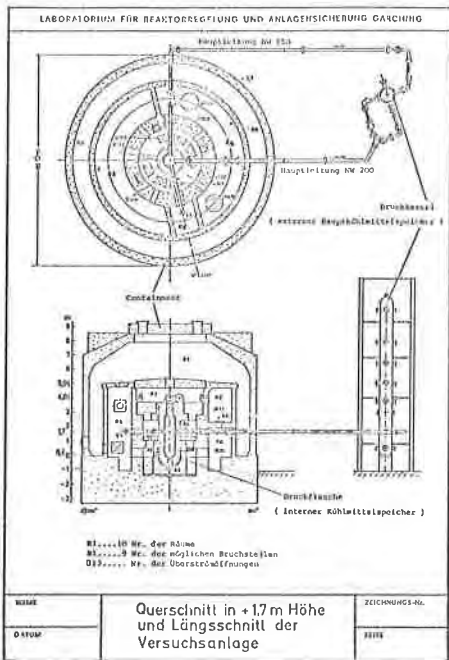


Abbildung 1

Das Containment ist durch Betonwände und austauschbare Einbauten in verschiedene Räume unterteilt, welche untereinander durch veränderliche Querschnittsflächen verbunden sind. Es ist möglich, durch Austausch der beweglichen Einbauten das Innere des Containments zu modifizieren, um somit verschiedene Containmentkonfigurationen zu simulieren.

In der ersten Versuchsreihe C wurde eine DWR-Konfiguration mit 9 repräsentativen Räumen gewählt. Sowohl für die Raumvolumina als auch für die Überströmflächen wurde ein Modellmaßstab von 1 : 64 auf der Basis der 1200 MW Anlage Biblis A angenommen. Dadurch entspricht die volumetrische Energiedichte des Containments, die durch das austretende Kühlmittel in der Containmentatmosphäre entsteht, derjenigen, die man bei einem Kühlmittelverlustunfall an einem DWR erwartet, d.h. der Zeitmaßstab der Druckverläufe in einer realen Anlage und der Modell-

anlage ist 1 : 1.

Bei weiteren Versuchen sollen auch SWR-Experimente und Strahlkraftexperimente, bei denen extrem hohe Belastungen von speziellen Betonstrukturen auftreten, durchgeführt werden.

In der C-Versuchsserie war das Containment mit hauptsächlich folgenden Meßfühlern instrumentiert:

- 45 Druckmeßgebern
 - 10 örtliche Druckdifferenzaufnehmer
 - 95 Thermoelemente
 - 4 Dichtemeßeinrichtungen
 - 4 Drag-body Meßeinrichtungen
 - 7 Wasserstandsmeßeinrichtungen
- } zur Bestimmung des
} Blowdown-Massenstroms
- in verschiedenen Räumen

Bis jetzt wurden 4 Inbetriebnahmeversuche und in der abgeschlossenen C-Versuchsserie 16 Hauptversuche, s. Tab. 1, durchgeführt. Dabei wurden einfach- und doppelendige Rohrleitungsbrüche mit einem Bruchöffnungsquerschnitt von je 100 mm Ø in dem Dampferzeugerraum R6, dem Stutzenraum R1, dem Reaktorraum R2, dem Druckhalterraum R4 sowie dem Kuppelraum R9 simuliert.

3. Vergleich Theorie - Experiment

Die Nachrechnungen der Versuche C1 bis C6 mit dem Rechenprogramm ZOCO VI, wie sie z.B. für den Versuch C1 - C5 in ausführlicher Darstellung in /8, 9/ zu finden sind, die Nachrechnung des Versuchs C1 der Firma Kraftwerkunion mit dem Rechenprogramm DDIFF /10/ sowie die Vergleichsrechnungen /11/ zu den Versuchen C1, C3 und C5 mit den Rechenprogrammen PREGA und DDIFF zeigen, daß die

zeitlichen Druck- und Druckdifferenzverläufe zwischen verschiedenen Räumen des Modellcontainments in der Anfangsphase nach dem Blowdownbeginn noch beträchtliche Abweichungen zwischen theoretisch und experimentell ermittelten Kurvenverläufen aufweisen.

In Abb. 2 sind einige Vergleichsrechnungen dargestellt: Das obere Bild zeigt die gemessene Druckdifferenz zwischen Raum R4 und R2 des Versuchs C5 im Vergleich zu den theoretisch ermittelten Ergebnissen mit dem Rechenprogramm ZOCO VI (Kurven 1, 2). Es ist eine starke Überschätzung in der Rechnung um ca. 0,4 bar im Maximum festzustellen. Das mittlere Bild zeigt die Druckdifferenz zwischen Raum R4 und Raum R1 des Versuchs C1. Die errechneten Kurvenverläufe mit ZOCO VI (Kurve 1) und DDIFF (Kurve 2) ergeben eine Unterschätzung der maximalen Druckdifferenz bis zu 0,1 bar. Im unteren Bild ist die Druckdifferenz zwischen dem Raum R4 und dem Raum R7 des Versuchs

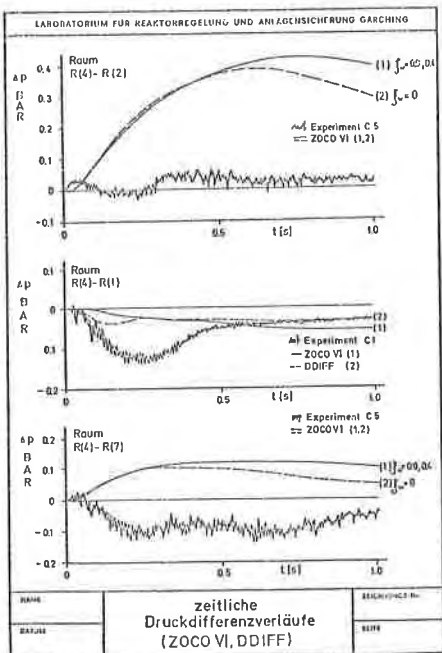


Abbildung 2

Experiment Nr.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Datum	29-8-74	13-9-74	30-10-74	22-1-75	25-2-75	6-3-75	26-3-75	3-7-75
Bruchgröße [mm]	1xØ 100	1xØ 100	1xØ 100	1xØ 100	2xØ 100	2xØ 100	1xØ 100	1xØ 75
Bruchraum	6	6	1	6	6	6	1	10
Überströmöffnungen (Biende)	Standard	Variation	Standard	Standard	Standard	Variation	Standard	Standard
Ausgeströmte Masse [kg]	4070	4100	4090	4820	5080	5090	5050	4650
Anfangsdruck im Druckbehälter [bar]	141	125	140	129	121	132	141,5	141
Mittlere Anfangstemperatur im Druckbehälter [°C]	292	287	294	286	292	292	292	295
Maximaler Containmentdruck [bar]	3,85	3,58	3,66	4,07	4,73	4,80	4,15	3,35
Experiment Nr.	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Datum	23-10-75	6-11-75	27-11-75	5-12-75	15-1-76	29-1-76	5-2-76	26-2-76
Bruchgröße [mm]	1xØ 100	1xØ 100	1xØ 100	1xØ 100	2xØ 100	1xØ 100	2xØ 100	1xØ 100
Bruchraum	4	4	2	2	1	1	1	9
Überströmöffnungen (Biende)	Standard	Standard	Variation	Variation	Standard	Standard	Variation	Standard
Ausgeströmte Masse [kg]	4830	4860	4750	4730	4885	4915	5023	4706
Anfangsdruck im Druckbehälter [bar]	119	140,5	140,5	140,5	141	139,5	139,5	135,5
Mittlere Anfangstemperatur im Druckbehälter [°C]	291	288	294	294	296	295	295	294
Maximaler Containmentdruck [bar]	4,56	4,42	4,35	4,56	4,84	4,40	4,80	4,72

Tabelle 1: DWR Containment-Experimente C1 bis C16

C5 dargestellt. Der theoretisch ermittelte Kurvenverlauf mit dem Rechenprogramm ZOCO VI (Kurven 1, 2) ergibt eine Vorzeichenumkehr in der Druckdifferenz, d.h. der absolute Druck in Raum R4 ist theoretisch größer als jener in Raum R7. Dies entspricht jedoch nicht den experimentellen Ergebnissen.

Da die für die sicherheitstechnische Betrachtung von Sicherheitsbehältern zu ermittelnden maximalen Druckdifferenzen zwischen den einzelnen Räumen des Containments in der ersten Sekunde nach Blowdownbeginn auftreten - wie auch diese Versuchsergebnisse Rs 50 zeigen - muß der Simulation der physikalischen Vorgänge in Rechenmodellen in diesem Zeitraum besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

3.1 Rechenmodelle

Im folgenden wird kurz auf die Modelleigenschaften des neu entwickelten Rechenprogramms COFLOW eingegangen, um anschließend einige Rechenergebnisse mit COFLOW im Vergleich zu ZOCO VI, DDIFF und den experimentellen Ergebnissen vorzustellen. Dabei werden die wesentlichen Merkmale der Rechenprogramme ZOCO VI und DDIFF zur Berechnung von Druckdifferenzen als bekannt vorausgesetzt, wobei hier für beide Rechenmodelle die Kennzeichen "Simulation von Ruhedruckzonen" und "quasi-stationäre Blendenströmung" angegeben werden können.

3.11 Physikalische Modelleigenschaften des Rechenmodells COFLOW

Die wesentlichen Merkmale des Rechenprogramms COFLOW sind:

- Vielpunktmodell in Form eines Netzwerkes
- Thermodynamischer Sättigungs- sowie überhitzter Zustand in einem Kontrollvolumen
- die Anzahl der Kontrollvolumina und ihrer Verbindungen sind beliebig wählbar, d.h. es können auch große bzw. langgestreckte Räume beliebig unterteilt werden, wie es bei den bisherigen Auslegungsrechnungen von Sicherheitsbehältern nicht üblich war, um eine detaillierte Betrachtung des instationären Strömungsverlaufes vornehmen zu können.
- Berücksichtigung von Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb einzelner Kontrollvolumina im Gegensatz zu den Rechenprogrammen DDIFF und ZOCO VI.
- Die Strömung zwischen zwei Kontrollvolumina kann sowohl als eindimensionale, instationäre, inkompressible und reibungsbehaftete Strömung unter Berücksichtigung von kinetischen Energietermen als auch als quasistationäre, kompressible Blendenströmung behandelt werden.
- Es wird eine homogene Zweiphasen-Zweikomponentenströmung mit begrenzt zulässigem Wasseranteil angenommen.
- Die Berechnung von Wärmeströmen an feste Strukturteile ist möglich.

3.12 Mathematische Formulierung

Bei der mathematischen Formulierung des Rechenmodells, wie sie in Abb. 3 für den Sättigungszustand dargestellt ist, erhält man 4 Differentialgleichungen für jedes Kontrollvolumen. Dies sind die 3 Massenbilanzen für Dampf (Gl.1) Wasser (Gl.2) und Luft (Gl.3) sowie die Energiebilanz (Gl.4), wobei der Index

LABORATORIUM FÜR REAKTORREGELUNG UND ANLAGENSICHERUNG GARCHING		
Mathematische Formulierung für das Rechenmodell COFLOW:		
$\left(\frac{dM_o}{dt}\right) = \sum_j^{in} G_{o,ij} - \sum_j^{out} G_{o,ij} + G_{v,ij} \quad (1)$		
$\left(\frac{dM_w}{dt}\right) = \sum_j^{in} G_{w,ij} - \sum_j^{out} G_{w,ij} - G_{v,ij} \quad (2)$		
$\left(\frac{dM_h}{dt}\right) = \sum_j^{in} G_{h,ij} - \sum_j^{out} G_{h,ij} \quad (3)$		
$\frac{d}{dt} \left[M_o \left(i_o + \frac{w_o^2}{2} \right) + M_w \left(i_w + \frac{w_w^2}{2} \right) + M_h \left(i_h + \frac{w_h^2}{2} \right) \right] - V \cdot \frac{d\rho}{dt} =$ $\frac{dQ}{dt} + \sum_j^{in} \left[G_{o,ij} \left(i_{o,ij} + \frac{w_{o,ij}^2}{2} \right) + G_{w,ij} \left(i_{w,ij} + \frac{w_{w,ij}^2}{2} \right) + G_{h,ij} \left(i_{h,ij} + \frac{w_{h,ij}^2}{2} \right) \right] - \sum_j^{out} \left[G_{o,ij} \left(i_{o,ij} + \frac{w_{o,ij}^2}{2} \right) + G_{w,ij} \left(i_{w,ij} + \frac{w_{w,ij}^2}{2} \right) + G_{h,ij} \left(i_{h,ij} + \frac{w_{h,ij}^2}{2} \right) \right] \quad (4)$		
$\frac{dG_{i,j}}{dt} = \frac{1}{\sqrt{F_i(z)}} \left[p_i - p_{i+1} + \frac{F_i}{2} (w_{i,j}^2 - w_{i+1,j}^2) + \beta_i g (h_i - h_{i+1}) - \int_{V_i} \frac{1}{\sqrt{F_i(z)}} G_j G_j \right] \quad (5)$		
$G_j = \alpha_o \cdot F_j \sqrt{\frac{z}{k_i} \left[\left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \right] \sqrt{2 p_i \cdot p_i}} \quad (6)$		
NAME	Basisgleichungen COFLOW	Berechnung des SOLVE

Abbildung 3

i das Kontrollvolumen, j die Verbindung zwischen den Kontrollvolumina i und i+1 und s die Bewegungsrichtung bedeuten. Für den Massenstrom der Verbindung j zwischen den Kontrollvolumina i und i+1 erhält man über den Ansatz der Impuls- und Kontinuitätsgleichung schließlich die Bewegungsgleichung (Gl.5), die verwendet wird, wenn Beschleunigungs- und kinetische Energieanteile bedeutsam sind. Alternativ dazu kann eine quasistationäre kompressible Blendgleichung (Gl. 6) angesprochen werden.

Die Differentialgleichungen (Gl. 1-5) werden simultan mit der am Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung entwickelten Integrationsprozedur IMEX /12/ gelöst.

3.2 Rechenergebnisse

Die ersten Rechnungen mit dem Rechenprogramm COFLOW sollten zeigen, ob der oben beschriebene Weg zur Ermittlung von dynamischen Druckdifferenzen bei instationären mehrdimensionalen Strömungsvorgängen zu einer besseren Übereinstimmung Theorie - Experiment führt, als dies bei den Rechenprogrammen ZOCO VI und DDIFF der Fall ist. Bei den Rechnungen mit ZOCO VI und DDIFF wurde ein Containment als ein Kontrollvolumen behandelt. Für die in der Anfangsphase die Druck- und Druckdifferenzverläufe wesentlich beeinflussenden Parameter wurden neben den Auslegungsdaten von realen Volldrucksicherheitsbehältern, d.h. Durchflußzahl $\alpha_D = 0.6$ für alle Überströmöffnungen und Wassermittelfaktor $\xi_w = 0.9$ im Bruchraum bzw. $\xi_w = 0.4$ in allen übrigen Räumen, auch physikalisch sinnvolle Variationen der Durchflußzahl für die verschiedenen Überströmöffnungen und des Wassermittelfaktors ξ_w in den einzelnen Räumen vorgenommen, d.h. Durchflußzahl $\alpha_D = 0.6$ und Wassermittelfaktor ξ_w variiert zwischen 0.9 und 0.

Für die Rechnungen mit dem neuen Rechenprogramm COFLOW wurden die einzelnen Räume des Modellcontainments nochmals in mehrere Kontrollvolumina unterteilt.

Die Abb. 4 zeigt die für das Rechenprogramm COFLOW vorgenommene Aufteilung des Raumes R6 in 7 und des Raumes R4 in 6 Kontrollvolumina. Diese Diskretisierung wurde entsprechend den möglichen Strömungswegen vorgenommen. Die

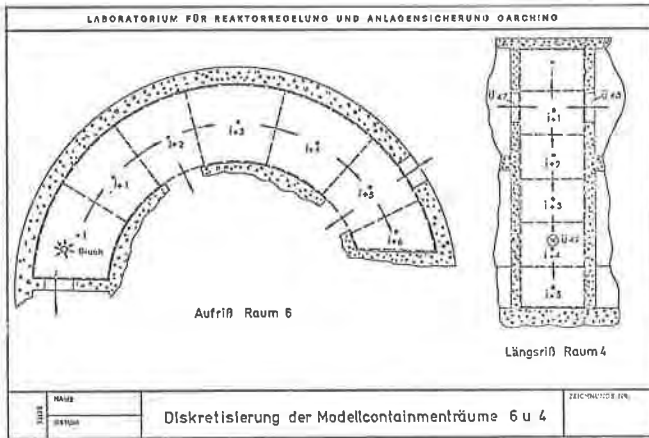


Abbildung 4

Diskretisierung des Raumes R4, bei dem die Möglichkeit einer direkten Durchströmung auf kurzem Wege durch die beiden Überströmöffnungen U45 und U47 besteht, erweist sich für die weiteren Rechnungen besonders wichtig, da der Raum R4 als Referenzraum für die gemessenen Druckdifferenzen gilt. Bei den Experimenten werden nur

die Druckdifferenzen zwischen Raum R4 und allen anderen Räumen direkt gemessen, da der Raum R4 zu allen anderen Räumen benachbart ist.

Die in dem Rechenmodell verwendeten Strömungsgeschwindigkeiten in einzelnen Kontrollvolumina werden mit Hilfe der zu- und abströmenden Massenströme ermittelt. Die Trägheitsterme in der Bewegungsgleichung werden entsprechend den Strömungswegen eingesetzt. Die Druckverlustbeiwerte in der Bewegungsgleichung werden zum Teil der Literatur entnommen.

Abb. 5 zeigt den Druckverlauf in Raum R4 in der ersten Sekunde bei dem Versuch C5. Die Kurven 1 und 2 wurden mit dem Rechenprogramm ZOCO VI ermittelt, wobei die Kurve 1 mit einer Was-

serbeladung $\xi_w=0.9$ im Bruchraum bzw. $\xi_w=0.4$ in allen übrigen Räumen entsprechend den Auslegungsdaten von Volldrucksicherheitsbehältern und die Kurve 2 mit einer vollkommenen Wasserabscheidung im Bruchraum, d.h. $\xi_w=0$, gerechnet wurden. Für die Wärmeübertragungsvorgänge wurde die Tagami-Korrelation ange-

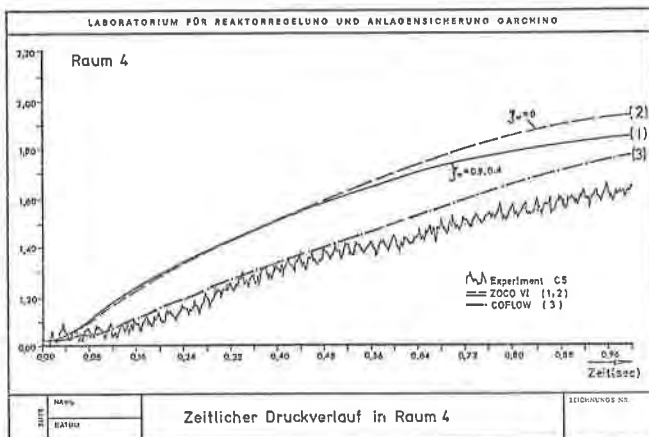


Abbildung 5

setzt. Weitere physikalisch sinnvolle Variationen der Durchflußzahl α_D im Rechenprogramm ZOCO VI führten zu keiner wesentlich besseren Annäherung der theoretischen und experimentellen Druckverläufe in diesem Raum R4. Die Kurve 3 wurde mit dem neuen Rechenprogramm COFLOW ermittelt. Es ist ersichtlich, daß der gerechnete Druckverlauf in der ersten halben Sekunde sehr gut und im weiteren Verlauf wesentlich besser mit dem experimentellen Druckverlauf übereinstimmt als die mit ZOCO VI berechneten Druckverläufe 1 und 2. Die Abweichungen nach der ersten halben Sekunde sind durch stärkere Kondensationsvorgänge zu erklären, als sie in dieser Rechnung berücksichtigt wurden.

Zur besseren Erklärung der starken Druckreduzierung in Raum R4 sind in der Abb. 6 die Geschwindigkeitsverläufe in dem Raum R4 in dem Kontrollvolumen i+1 aufgezeichnet. Es zeigt sich eine starke Durchströmung des Raumes R4 in

der x-Richtung von der Ü45 zur Ü47 mit Geschwindigkeiten über 100 m/s (Kurve 1), während die Geschwindigkeit des Fluids in der vertikalen z-Richtung 2-3 m/s beträgt. Dies bedeutet, daß das Fluid, welches bei dem Versuch C5 durch die Ü45 einströmt, größtenteils durch die Ü47 aufgrund der kinetischen Strömungsenergie wieder ausströmt und damit nicht zum Druckaufbau in Raum R4 beiträgt. Das Rechenprogramm COFLOW berücksichtigt, wie bereits erwähnt, diese kinetische Strömungsenergie in der Massenstromberechnung zwischen den einzelnen Kontrollvolumina.

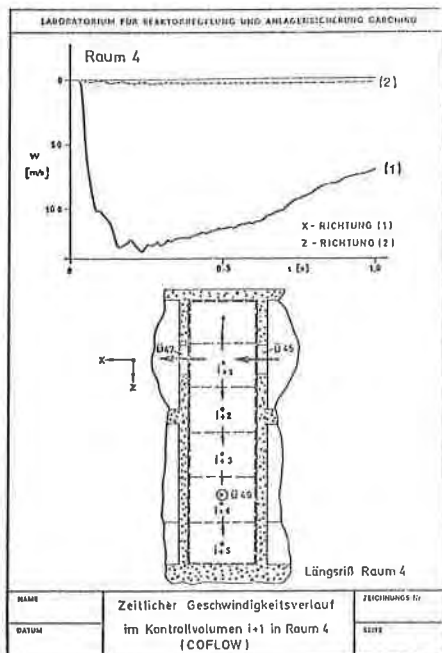
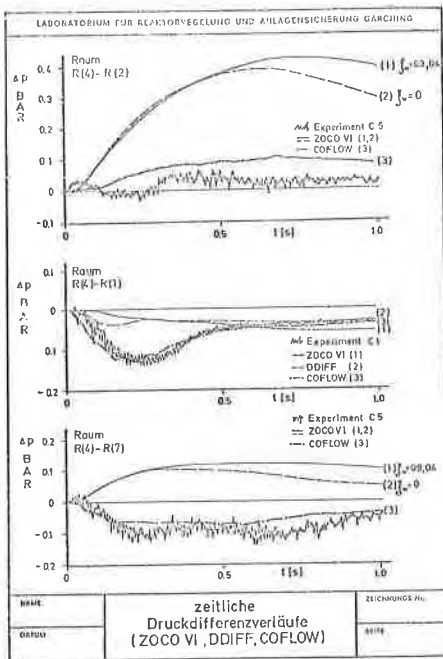


Abbildung 6

Die Abb. 7 zeigt die zu Beginn des Berichtes vorgestellten theoretischen und experimentellen zeitlichen Druckdifferenzverläufe im Vergleich zu den berechneten Druckdifferenzverläufen mit dem Rechenprogramm COFLOW.

Das obere Bild zeigt, daß die starke Überschätzung der mit dem Rechenprogramm ZOCO VI gerechneten

Druckdifferenzen zwischen Raum R4 und Raum R2 bei dem Versuch C5 (Kurven 1 und 2) durch den mit dem Rechenprogramm COFLOW ermittelten Kurvenverlauf 3 erheblich abgebaut wird. Die dargestellten Druckdifferenzverläufe 1 und 2 unterscheiden sich durch die Höhe des Wassermitrißfaktors. Das mittlere Bild zeigt, daß die Unterschätzung des mit ZOCO VI und DDIFF berechneten Druckdifferenz-



verlaufes zwischen Raum R4 und Raum R1 bei der Rechnung mit dem Rechenprogramm COFLOW (Kurve 3) nicht mehr erheblich ist. Der theoretische (Kurve 3) und experimentelle Kurvenverlauf stimmen gut überein. Im unteren Bild sieht man, daß die Vorzeichenumkehr im zeitlichen Druckdifferenzverlauf zwischen Raum R4 und Raum R7 bei dem Versuch C5 (Kurven 1 und 2) bei der Rechnung mit dem Rechenprogramm COFLOW (Kurve 3) ebenfalls korrigiert wird, d.h. daß der zeitliche Druckverlauf in Raum R4 entsprechend den experimentellen Ergebnissen unterhalb dem des Raumes R7 liegt.

Abbildung 7

4. Schlußfolgerung

Die Rechenergebnisse zeigen, daß die in den Rechenmodellen ZOCO VI und DDIFF angewandte Behandlung der Druckzonen als Ruhedruckzonen und die quasi-stationäre Berechnung der Massenströme zwischen den Druckzonen mit Hilfe der sog. Blendenströmung die physikalischen Vorgänge in der Anfangsphase des Blowdowns nicht vollständig erfassen. Eine physikalisch sinnvolle Variation der Parameter ξ_w und α_D in dem Rechenprogramm ZOCO VI kann nicht zu jener Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment führen, wie sie mit dem Rechenprogramm COFLOW erreicht wird, in dem dynamische Effekte der Zweiphasen-Zweikomponentenströmung berücksichtigt werden. Mit dieser ersten Version des Rechenprogramms COFLOW steht ein zufriedenstellendes Approximationsmodell zur Berechnung von experimentell ermittelten dynamischen Druckdifferenzen zur Verfügung.

Formelzeichen:

- D Durchmesser
- F Fläche
- g Erdbeschleunigung
- G Massenstrom
- h Höhe
- i spez. Enthalpie
- L Länge
- M Masse
- p Druck
- Q Wärme
- s Längskoordinate
- V Volumen
- w Geschwindigkeit
- t Zeit
- α_D Durchflußzahl
- ρ Dichte
- ξ_w Wassermitrißfaktor
- ζ_w Druckverlustbeiwert
- κ Isentropenexponent

Indizes:

- a ausströmen
- D Dampf
- e einströmen
- i Volumen i
- i+1 Volumen i+1
- j Verbindung
- L Luft
- V Verdampfung bzw. Kondensation
- W Wasser

Literaturverzeichnis

- /1/ G. MANSFELD, Begleitende Arbeiten zur Planung und Auslegung der Versuche des Forschungsvorhabens RS 50 "Druckverteilung im Containment" im Zeitraum von August 1971 bis Mai 1973, Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-I-6, Juli 1973, LRA-Interner Bericht
- /2/ G. MANSFELD, Untersuchungen zu den Inbetriebnahmeversuchen des Forschungsvorhabens RS 50 "Druckverteilung im Containment", Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-I-9, Dezember 1973, LRA-Interner Bericht
- /3/ G. MANSFELD, Überlegungen zu der zulässigen Gesamtbelastung des Containments unter Berücksichtigung der Kondensationsergebnisse aus den Inbetriebnahmeversuchen (Forschungsvorhaben RS 50), Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-I-14, Februar 1974, LRA-Interner Bericht
- /4/ G. MANSFELD, Voraussrechnungen zu den Hauptversuchen C1 bis C3 des Forschungsvorhabens RS 50 "Druckverteilung im Containment", Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-I-30, Oktober 1974, LRA-Interner Bericht
- /5/ H. BAUER, G. MANSFELD, C. STELLMACH, Voraussrechnungen zu den Hauptversuchen C4, C7, C8, C9, C11, C14, C16 des Forschungsvorhabens RS 50 "Druckverteilung im Containment", Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-I-67, Mai 1976, LRA-Interner Bericht
- /6/ G. MANSFELD, ZOCO VI - Ein Rechenprogramm zur Berechnung von zeitlichen und örtlichen Druckverteilungen in Volldrucksicherheitsbehältern wassergekühlter Kernreaktoren, Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-P-14, Programmbeschreibung, Dezember 1974
- /7/ K.F. MEYER-BORRMANN, Beschreibung des Rechenprogramms DDIFF zur Berechnung von Druckdifferenzen in Reaktorgebäuden nach Kühlmittelverlustunfällen, KWU-Arbeitsbericht R11, Nr. 17/74, Erlangen, 5.3.1974
- /8/ G. MANSFELD, Instationäre Druck-, Druckdifferenz- und Temperaturverläufe in vielfach unterteilten Volldrucksicherheitsbehältern, Vergleich Theorie und RS 50-Experiment C1, Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-149, Mai 1975
- /9/ H. BAUER, C. STELLMACH, Nachrechnungen zu den Hauptversuchen C2, C3, C5 des Forschungsvorhabens RS 50 "Druckverteilung im Containment", Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, MRR-I-56, Dezember 1975, LRA-Interner Bericht
- /10/ K.F. MEYER, KW Biblis - Nachrechnungen des dynamischen Druckaufbaus für den Battelle-Versuch C1 (RS 50), KWU-Arbeitsbericht R11, Nr. 110/75, Erlangen, 29.7.1975
- /11/ G. BAIER, Nachrechnungen von Druck-, Druckdifferenz- und Temperaturverläufen in einem Volldrucksicherheitsbehälter, Battelle-Versuche RS 50, C1, C3 und C5, IRS-Arbeitsbericht Nr. 267, Köln, März 1976
- /12/ E. HOFER, A Partially Implicit Method for Large Stiff Systems of ODEs with Only Few Equations Introducing Small Time-Constants, SIAM J. Numer. Anal., Vol. 13, No. 5, 1976