

**ZUR ERMITTLUNG INSTATIONÄRER DRUCK- UND
TEMPERATURBELASTUNGEN VON REKTORSICHERHEITSBEHÄLTERN
NACH KÜHLMITTELVERLUSTUNFÄLLEN. VERGLEICH ZWISCHEN
THEORETISCHEN UND EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSEN**

D. BROSCHE,

Technische Universität München,

Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Garching, Germany

Abstract

Experimentally investigated pressure-time histories occurring during the short - term pressurisation following a loss-of-coolant accident at the primary system in full pressure containments and pressure suppression systems were compared with corresponding analytical results (computer code ZOCO V), yielding good agreement between theory and experiment.

The comparisons theory-experiment for full pressure containments yielded furthermore informations as regards the thermodynamic state of the steam-air-water-mixture in the containment (thermodynamic equilibrium or its rate of deviation) and the heat transfer conditions at and the temperature-time histories in the containment wall.

The comparisons theory-experiment for pressure suppression systems also yielded informations up to which point thermodynamic equilibrium in the wet-well can be assumed, as well as results concerning the values of pressure loss coefficients and the water carry-over of compressible one- and two-phase-two-component flows in the vent pipe which have a strong influence on the pressure-time histories.

All these informations obtained by the comparisons theory-experiment render a better insight into the physical phenomena occurring during a loss-of-coolant accident, and serve to calculate in advance with greater accuracy than until now the stresses upon the reactor containment wall caused by pressure and temperature-time histories.

It could be seen that these stresses caused by pressure and temperature are very strong and must be taken into account very carefully for the design of reactor containments.

1. Einführung

Aufgrund der großen Bedeutung, die Reaktorsicherheitsbehälter wassergekühlter Leistungsreaktoren für den Umgebungsschutz nach schweren Kühlmittelverlustunfällen am Primärsystem besitzen, ist auf ihre richtige Auslegung besonderes Augenmerk zu richten. Um maximale Druckspitzen und Differenzdrücke sowie Temperaturgradienten, die nach einem solchen Kühlmittelverlustunfall am Primärsystem im Sicherheitsbehälter und in dessen Wand auftreten und die als Auslegungsgrundlage dienen, genauer als bisher berechnen zu können, wurde das neue Digitalrechenprogramm ZOCO V /1/ entwickelt, das eine beträchtliche Verbesserung und Erweiterung der bisher vorliegenden Rechenprogramme ZOCO I /8,9/, ZOCO II /10/ und DRABSYS /7/ darstellt. Zweck der vorliegenden Untersuchung war es nun, die während des Kurzzeitverhaltens auftretenden und für die Auslegung von Reaktorsicherheitsbehältern (Volldrucksicherheitsbehälter und Druckabbausysteme) wichtigen instationären Druck- und auch Temperaturverläufe, die mit Hilfe des Rechenmodells ZOCO V ermittelt wurden, anhand von geeigneten Experimenten zu überprüfen und über gewisse Modellannahmen und Parameter quantitative Aussagen zu erhalten, um so zu einer gesicherteren Auslegungsgrundlage für Reaktorsicherheitsbehälter als bisher zu gelangen.

2. Theoretische Grundlagen

Das Rechenmodell ZOCO V gestattet die Berechnung der instationären Druck- und Temperaturverteilung in Volldrucksicherheitsbehältern und Druckabbausystemen sowohl für das Kurz- als auch das Langzeitverhalten, so daß Vergleiche zwischen analytisch und experimentell ermittelten instationären Druckverläufen für beide Arten von Sicherheitsbehältern durchgeführt wurden. Es wird aus Platzgründen nur kurz auf die für die vorliegenden Vergleiche Theorie-Experiment wichtigen Teile des Rechenmodells ZOCO V eingegangen. Dem Rechenmodell liegt das bereits bei den Modellen ZOCO I und ZOCO II angewandte Konzept eines Vielpunktmodells zugrunde, d. h. die einzelnen Räume eines Sicherheitsbehälters werden durch miteinander in beliebiger Weise verbundene Druckzonen

oder Punkte repräsentiert. In den einzelnen Druckzonen können sich Gas- und Wasserphase sowohl im thermodynamischen Gleichgewicht als auch Nichtgleichgewicht befinden, so daß im Rechenmodell mehrere Arten von Druckzonenmodellen vorhanden sind, deren jeweilige Verwendung mit Hilfe bestimmter Kriterien programmintern gesteuert wird. Die Differentialgleichungen zur Berechnung der zeitlichen Druck-, Temperatur- und Massenänderungen in den einzelnen Druckzonen ergeben sich mit Hilfe von Massen-, Energie- und Volumenbilanzen, den zu- und abgeführten Massen- und Enthalpieströmen und verschiedenen thermodynamischen Zustandsgrößen.

Die Massenströme zwischen den einzelnen Druckzonen werden dabei je nach Geometrie des Strömungsweges auf verschiedene Weise berechnet.

Bei der Strömung durch einen rohrförmigen Strömungskanal, wie er z. B. in Form der Überströmleitung bei einem Druckabbausystem vorliegt, wird der Massenstrom mit Hilfe der Kontinuitäts-, Energie- und Impulsgleichung unter Benützung der Gasgleichung und der Isentropenbeziehung für den Einlauf berechnet. Dabei können die beiden Fälle einer Einphasen-Zweikomponenten- sowie einer Zweiphasen-Zweikomponentenströmung behandelt werden, wobei beide Strömungsarten kompressible, reibungsbehaftete und eindimensionale Strömungen unter Berücksichtigung von variablen Strömungsquerschnitten sind.

Der Ausblasevorgang der Wassersäule aus der Überströmleitung bei Druckabbausystemen während der Anfangsphase des Unfallablaufes wird mit Hilfe der Grundgleichungen für instationäre, inkompressible und reibungsbehaftete Strömung berechnet.

Wärmeverluste durch Wände sowie deren zeitliche und örtliche Temperaturgradienten werden durch numerische Lösung der eindimensionalen instationären Wärmeleitungsgleichung (Fouriersche Wärmeleitungsgleichung) für die ebene Platte berechnet.

Das Reaktordruckgefäß wird durch ein spezielles Druckgefäßmodell simuliert, so daß es auf diese Weise mit Hilfe des Rechenmodells ZOCO V möglich ist, die in Wirklichkeit gleichzeitig ablaufenden Vorgänge: Ausströmen des Kühlmittels aus dem Primärsystem und dadurch verursachter Druckaufbau im Sicherheitsbehälter in einem Rechenmodell simultan zu berechnen. Bisher wurden ja beide Probleme stets getrennt mit Hilfe verschiedener Rechenmodelle behandelt.

3. Offene Probleme

Es wird nun auf einige offene Probleme eingegangen, die ebenfalls mit Hilfe der vorliegenden Vergleiche Theorie-Experiment behandelt werden sollten.

Die zeitlichen Druckverläufe in Volldrucksicherheitsbehältern und Druckabbausystemen und damit deren Auslegung hängen von zahlreichen Parametern ab wie z.B. von den geometrischen Verhältnissen des Sicherheitsbehälters, vom zeitlichen Verlauf des Kühlmittel- ausströmvorganges aus dem Primärsystem, von thermodynamischen Anfangszuständen (Luft, Wasser) im Sicherheitsbehälter usw.

Viele dieser Parameter lagen durch die verwendeten Versuchsapparaturen bzw. -bedingungen fest, so daß sich schließlich auch aufgrund der Art der durchgeführten Versuche folgende fünf Punkte ergaben, die bezüglich der Druckverläufe während des Kurzzeitverhaltens von besonderer Bedeutung sind und über die mit Hilfe der Vergleiche Theorie-Experiment eine Aussage erhalten wurde.

- a) Inwieweit befinden sich Gas- und Wasserphase in einer Druckzone im thermodynamischen Gleichgewicht?
- b) Wie hoch sind die Wärmeübergangszahlen insbesondere für den Fall der Kondensation von Wasserdampf an kalten Wänden und bei Anwesenheit der nicht kondensierbaren Luft?

- c) Wie hoch ist die Druckabbauwirkung von kalten Wassermassen, die sich zu Beginn des Druckaufbauvorganges im Sicherheitsbehälter befinden?
- d) Sind insbesondere bei Druckräumen von Druckabbausystemen Dampf und Luft während der Anfangsphase des Druckaufbauvorganges homogen durchmischt oder nicht?
- e) Wie groß ist der Wasseranteil oder Wassermittels der Strömung vom Druck- in den Kondensationsraum eines Druckabbausystems und wie hoch ist der Gesamtdruckverlustbeiwert der Überströmleitung?

Diese Punkte a) bis e) beeinflussen mehr oder weniger stark die Druckverläufe im Sicherheitsbehälter sowie die Temperaturverläufe in der Wand (Punkt b) und damit die Auslegung und stellen gewisse Unsicherheiten bei Rechnungen mit entsprechenden Rechenmodellen dar.

Die Stellungnahmen zu diesen Problemen erfolgen dann im Verlauf der weiteren Ausführungen.

4. Experimentelle Grundlagen für Volldrucksicherheitsbehälter

Für die Vergleiche Theorie-Experiment wurden jeweils zwei Versuche für Volldrucksicherheitsbehälter und Druckabbausysteme herangezogen, wobei zunächst auf die Vergleiche Theorie-Experiment für Volldrucksicherheitsbehälter eingegangen wird.

Geeignete Experimente, die sich mit dem instationären Druckaufbau in Volldrucksicherheitsbehältern befassen, und die bei den vorliegenden Untersuchungen verwendet wurden, sind von Kolflat 1960 /2/ veröffentlicht worden. Hierbei wurde der Reaktorsicherheitsbehälter durch einen Behälter dargestellt, der nicht durch Zwischenwände in einzelne Räume unterteilt war.

Es ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, daß experimentelle Arbeiten, die sich mit dem instationären Druckaufbau in mehrfach unterteilten Sicherheitsbehältern befassen, bis jetzt nicht durchgeführt wurden, so daß die Experimente von Kolflat mit einem nicht unterteilten Sicherheitsbehälter für die Vergleiche Theorie-Experiment für Volldrucksicherheitsbehälter herangezogen werden mußten.

Das Primärsystem wurde bei diesen Experimenten durch ein Druckgefäß simuliert, das zu Beginn eines Versuches ein separiertes Wasser-Dampf-Gemisch unter einem bestimmten Druck erhielt und das innerhalb des Sicherheitsbehälters angeordnet war, wie aus Abb. 1 zu entnehmen ist.

Während eines Versuches strömte nun das Wasser-Dampf-Gemisch aus dem Druckgefäß in den Sicherheitsbehälter ein, in dem der zeitliche Druckaufbau gemessen wurde, wobei die aus dem Druckgefäß austretenden Massen- und Enthalpieströme leider nicht bestimmt wurden. Stattdessen wurden die zeitlichen Druckverläufe im Druckgefäß zusätzlich von jenen im Sicherheitsbehälter für jeden Versuch gemessen.

Da nun zur Berechnung des Druckaufbaus im Sicherheitsbehälter die Kenntnis der zeitlichen Massenstrom- und Enthalpieverläufe aus dem Druckgefäß von großer Bedeutung ist, mußten diese mit Hilfe der gemessenen Druckverläufe im Druckgefäß und sonstigen Informationen berechnet werden. Dies wurde mit Hilfe des im Rechenmodell ZOCO V mitsimulierten Druckgefäßmodells durchgeführt, das die Berechnung dieser zeitlichen Verläufe gestattet. Zu diesem Zweck mußten gemessene und gerechnete Druckverläufe für das Druckgefäß in möglichst gute Übereinstimmung gebracht werden. Wenn diese Übereinstimmung der gemessenen und gerechneten Druckverläufe erreicht ist, stehen die bei den Versuchen aufgetretenen zeitlichen Massenstromverläufe zur Verfügung und können direkt zur Berechnung des Druckaufbaus im Sicherheitsbehälter verwendet werden. Die ebenfalls zur Berechnung des Druckaufbaus im Sicherheitsbehälter nötigen zeitlichen Enthalpieverläufe ergeben sich dann unmittelbar aus den zeitlichen Druckverläufen im Druckgefäß. Nach diesen einleitenden Bemerkungen soll nun kurz auf die Versuchsanordnung eingegangen werden, wobei eine ausführliche Beschreibung mit entsprechenden Daten /2/ zu entnehmen ist.

Das Druckgefäß zur Simulation des Reaktordruckgefäßes hatte ein Volumen von $4,58 \text{ m}^3$ und bei den hier verwendeten Versuchen eine nach unten gerichtete Ausströmöffnung und enthielt ein Dampf- Wassergemisch unter einem Anfangsdruck von $42,3 \text{ bar}$. Der Sicherheitsbehälter bestand aus einem Stahlgefäß mit einem freien Volumen von 121 m^3 . Die Größen G bzw. Q in Abb. 1 symbolisieren den Massenstrom aus dem Druckgefäß bzw. den Wärmeverlust an die Wand. Die Anfangsmenge an kaltem Wasser im Sicherheitsbehälter betrug bei Versuch Nr. 4 4536 kg und bei Versuch Nr. 11 0 kg .

Die Versuche Nr. 4 und Nr. 11 unterschieden sich nun im wesentlichen dadurch, daß verschiedene Anfangswassermengen im Druckgefäß vorhanden waren und vor allem, daß bei Versuch Nr. 4 eine beträchtliche Anfangsmenge kalten Wassers im Sicherheitsbehälter vorlag, die bei Versuch Nr. 11 fehlte.

Versuch Nr. 11 repräsentiert also den Normalfall eines Volldrucksicherheitsbehälters, während bei Versuch Nr. 4 die Anfangswassermenge im Sicherheitsbehälter, wie noch gezeigt wird, einen partiellen Druckabbau durch teilweise Kondensation des Dampfpartialdrucks bewirkte.

Bei der nun folgenden Beschreibung der Ergebnisse des Vergleiches zwischen Theorie und Experiment soll daher zunächst Versuch Nr. 11 behandelt werden.

5. Vergleich Theorie - Experiment für Volldrucksicherheitsbehälter

Abb. 2 zeigt die Druckverläufe im Sicherheitsbehälter für Versuch Nr. 11. Das starke Pulsieren des gemessenen Druckverlaufes bis zum Zeitpunkt von etwa $t = 1 \text{ s}$ wurde dabei von allen entsprechenden Versuchen aus $/2/$ nur bei diesem Versuch Nr. 11 beobachtet.

Eine Erklärung für dieses Pulsieren wird von Kolflat nicht gegeben, jedoch ist anzunehmen, daß es durch hochgeschleuderte Wassermassen und die damit verbundene Komprimierung der Gasatmosphäre hervorgerufen wurde, da beim Vorhandensein von Druckwellen die Frequenz der Schwingung sehr viel höher hätte sein müssen. Die Druckspitze im Sicherheitsbehälter wird

nach ca. $t = 2,75$ s erreicht, danach sinkt der Druck aufgrund der Wärmeverluste durch die Stahlwand des Sicherheitsbehälters wieder ab. Die dabei aufgetretenen Wärmeübergangszahlen liegen in der gleichen Größenordnung wie jene, die auch bei anderen Experimenten von Kolflat und Chittenden /3/ mit Hilfe von Temperaturmessungen in der Wand und in der Behälteratmosphäre festgestellt wurden und sind bedeutend höher als jene, die sich mit Hilfe der aus der Literatur wie z. B. /4/ bekannten Beziehungen für ruhende Gasatmosphäre ergeben. Der Einfluß der während des Kurzzeitverhaltens auftretenden starken Durchwirbelung der Gasatmosphäre im Sicherheitsbehälter auf die Höhe der Wärmeübergangszahl an der Wand ist also beträchtlich, (Punkt b in Kapitel 3).

Bei dem gerechneten Druckverlauf lag die Annahme zugrunde, daß sich Dampf, Luft und Wasser im thermodynamischen Gleichgewicht befinden.

Diese Annahme ist also bei dem vorliegenden Versuch, bei dem sich zu Beginn der Druckaufbauphase kein kaltes Wasser im Sicherheitsbehälter befand, aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment bestätigt worden (Punkt a in Kapitel 3).

Die zu dem gerechneten Druckverlauf in Abb. 2 gehörenden zeitlichen und örtlichen Temperaturverläufe in der Sicherheitsbehälterwand sind aus Abb. 3 zu entnehmen. Diese Temperaturverläufe wurden bei keinem der Versuche aus /2/ gemessen, so daß für diese ein Vergleich Theorie-Experiment nicht durchgeführt werden konnte.

Die Buchstaben in Abb. 3 haben folgende Bedeutung:

- i Innenseite der Wand
- 1,2,3: Temperaturzonen im Inneren der Wand
- a : Außenseite der Wand
- u : Umgebung

Im linken Teil der Abb. 3 sind die Temperaturprofile oder örtlichen Temperaturgradienten in der Wand zu verschiedenen Zeitpunkten aufgetragen. Dabei zeigt sich, daß die Aufheizung an der Innenseite der Wand aufgrund der guten Wärmeübergangsbedingungen relativ schnell erfolgt. Die zeitlichen Temperaturgradienten an den

fünf Punkten 1, 1, 2, 3 und a der Wand sind aus dem rechten Teil der Abb. 3 zu entnehmen. Aus beiden Darstellungen ist deutlich zu ersehen, daß in der Wand beträchtliche örtliche und zeitliche Temperaturgradienten auftreten, die zu beachtlichen Wärmespannungen im Wandmaterial führen können.

Die Druckverläufe im Sicherheitsbehälter für Versuch Nr. 4 sind aus Abb. 4 zu entnehmen. Da bei Beginn dieses Versuches eine beträchtliche Menge an kaltem Wasser im Sicherheitsbehälter vorhanden war, wurde der Dampfpartialdruck teilweise abgebaut, so daß der Gesamtdruck niedriger war als ohne Anfangswassermenge.

Die Ausströmöffnung aus dem Druckgefäß lag allerdings während des gesamten Transienten oberhalb des Wasserspiegels im Sicherheitsbehälter, so daß eine vollständige Kondensation des Wasserdampfes wie bei einem Druckabbausystem nicht zu erwarten war, oder anders ausgedrückt, nur ein Teil der Anfangswassermenge, nämlich 65 % im vorliegenden Fall, nahm am Dampfkondensationsprozeß teil, befand sich also mit der Gasatmosphäre im thermodynamischen Gleichgewicht (Punkt c in Kapitel 3). Die Gesamtwassermenge hatte daher eine niedrigere Temperatur als die Gasatmosphäre, so daß sich Gasphase und Gesamtwasserphase nicht mehr im thermodynamischen Gleichgewicht befanden (Punkt a in Kapitel 3).

Als Ergebnis des Vergleiches Theorie-Experiment für den Versuch Nr. 4 kann daher festgestellt werden, daß beim Vorhandensein einer größeren Anfangsmenge kalten Wassers im Verhältnis zum Druckgefäßinhalt nicht mehr mit thermodynamischem Gleichgewicht zwischen Luft, Dampf und der gesamten Wassermenge gerechnet werden kann (Punkt a in Kapitel 3).

Die zu dem gerechneten Druckverlauf in Abb. 4 gehörenden zeitlichen und örtlichen Temperaturverläufe in der Sicherheitsbehälterwand sind der Abb. 5 zu entnehmen. Die Bezeichnungen sind die gleichen wie bei Abb. 3. Es zeigt sich dabei, daß die Temperaturgradienten schwächer sind als die bei Versuch Nr. 11, was darauf zurückzuführen ist, daß der zeitliche Temperaturgradient in der Sicherheitsbehälteratmosphäre schwächer und somit die Aufheizgeschwindigkeit der Wand geringer als bei Versuch Nr. 11 war.

6. Experimentelle Grundlagen für Druckabbausysteme

Der instationäre Druckaufbau in Druckabbausystemen wurde ziemlich umfangreich experimentell untersucht, wobei die Humboldt Bay und Bodega Bay Versuche von Bedeutung sind. Versuchsergebnisse von den Humboldt Bay Versuchen sind in der einschlägigen Literatur veröffentlicht worden /5, 6/ und zwei von ihnen, nämlich die Versuche Nr. 25 und Nr. 44 wurden für den Vergleich Theorie-Experiment herangezogen.

Das Druckabbausystem bestand bei diesen Versuchen entsprechend Abb.6 aus zwei Behältern, dem Druck- und dem Kondensationsraum mit dem Kondensationswasserbecken, die durch eine Überströmleitung miteinander verbunden waren. Die freien Volumina von Druck- und Kondensationsraum betragen 5,632 bzw. 29,25 m³ sowie die Länge der Überströmleitung 15,55 m. Das Reaktordruckgefäß wurde ähnlich wie bei den vorher beschriebenen Experimenten für Volldrucksicherheitsbehälter durch ein Druckgefäß simuliert, das jeweils zu Beginn eines Versuches ein separiertes Wasser-Dampf-Gemisch unter einem Druck von 87,2 bar enthielt und das über eine Rohrleitung mit dem Druckraum in Verbindung stand und ein Volumen von 1,54 m³ besaß. Während eines Versuches strömte das Wasser-Dampf-Gemisch aus dem Druckgefäß in den Druckraum ein, um von dort durch die Überströmleitung in den Kondensationsraum zu gelangen. Dabei wurden die zeitlichen Druckverläufe im Druckgefäß sowie jene im Druck- und Kondensationsraum gemessen. Ähnlich wie bei den Versuchen für Volldrucksicherheitsbehälter wurden auch hier die zeitlichen Massenstrom- und Enthalpieverläufe aus dem Druckgefäß nicht gemessen. Sie wurden daher ähnlich wie bereits in Kapitel 4 geschildert mit Hilfe des im Rechenmodell ZOCO V mit-simulierten Druckgefäßmodells und den gemessenen Druckverläufen im Druckgefäß ermittelt und zur Berechnung des Druckaufbaus im Druckabbausystem verwendet. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Versuchen Nr. 25 und Nr. 44 lag darin, daß die Einbauten im Druckraum bei beiden Versuchen verschieden gestaltet waren, so daß bei Versuch Nr. 25 praktisch kein Wasser in Tröpfchenform von der Gasströmung durch die Überströmleitung mitgerissen und vom Druck- in den Kondensationsraum transportiert wurde im Gegensatz zu Versuch Nr. 44, bei dem ein beträchtlicher Wassermitriß auftrat.

Bei der Beschreibung der Ergebnisse des Vergleiches zwischen Theorie und Experiment soll zunächst Versuch Nr. 25 behandelt werden.

7. Vergleich Theorie-Experiment für Druckabbausysteme

Die zeitlichen Druckverläufe im Druckraum sind aus der Abb. 7 zu entnehmen. Zunächst findet bis ca. $t = 0.3$ s ein sehr schneller Druckanstieg statt, da während dieses Zeitraumes die Wassersäule in der Überströmleitung ausgeblasen wird.

Nach dem Ausblasen der Wassersäule (Freiblastevorgang der Überströmleitung) beginnt die Gasströmung zwischen Druck- und Kondensationsraum, wobei der Druck im Druckraum absinkt und jener im Kondensationsraum ansteigt, wie aus Abb. 8 zu entnehmen ist.

Bei der Berechnung der Druckverläufe im Druck- und Kondensationsraum wurde nun zwischen zwei Fällen unterschieden.

Fall I: Hierbei wurde angenommen, daß die Luft im Druckraum durch das vom Druckgefäß kommende Dampf-Wassergemisch wie durch einen Kolben sehr schnell aus dem Druckraum in den Kondensationsraum gedrückt wird.

Fall II: In diesem Fall gilt die gewöhnlich im Rechenmodell getroffene Annahme, daß im Druckraum während des gesamten Transienten Luft und Dampf homogen durchmischt sind. An dieser Stelle ist zu bemerken, daß der Einfluß der Art der Durchmischung von Dampf und Luft im Druckraum auf die Druckverläufe im Druck- und Kondensationsraum bereits früher in /7/ theoretisch untersucht wurde.

Für den Vergleich Theorie-Experiment der Versuche Nr. 25 und 44 ist jedoch Fall I maßgebend, da aufgrund der Druckraumeinbauten dieser Fall auch beim Experiment vorlag.

Fall II wurde lediglich als Vergleich zusätzlich gerechnet. In Abb. 8 sind die zeitlichen Druckverläufe im Kondensationsraum dargestellt. Hier zeigt sich vor allem für die Anfangsphase von $t=0,3$ s bis $t=4$ s ein deutlicher Unterschied zwischen den Druck-

verläufen der Fälle I und II, wobei klar zu ersehen ist, daß Fall I bis $t = 0,6$ s sehr gut mit dem Experiment übereinstimmt, da, wie bereits erwähnt, dieser Fall I auch im Experiment vorgelegen hat.

Die Art der Durchmischung von Dampf und Luft im Druckraum hat also in erster Linie einen Einfluß auf den Druckverlauf im Kondensationsraum, wobei ein plötzliches Ausschleichen der Luft aus dem Druckraum (Fall I) einen schnelleren Druckanstieg im Kondensationsraum zur Folge hat als bei Fall II zu beobachten ist, bei dem Dampf und Luft im Druckraum homogen durchmischt sind (Punkt d in Kapitel 3).

Eine interessante Feststellung kann noch aus Abb. 8 entnommen werden. Der gemessene und der gerechnete Druckverlauf (Fall I) unterscheiden sich nach $t = 3$ s noch um ca. $0,08$ bar voneinander. Dieser Unterschied wird mit fortlaufender Versuchsdauer immer kleiner, und zwar nahezu linear. Nach $t = 16$ s stimmen gerechneter und gemessener Druckverlauf praktisch überein.

Diese Tatsache ist dadurch zu erklären, daß sich bei Beginn des Transienten nur ein Teil des Kondensationswassers im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Gasatmosphäre befand, wobei thermodynamisches Gleichgewicht mit fortlaufender Versuchsdauer immer besser erreicht wurde. Bei der Rechnung hingegen wurde von Anfang an mit thermodynamischem Gleichgewicht zwischen Gasphase und gesamter Wassermenge gerechnet (Punkt a in Kapitel 3).

Entsprechend /5, 6/ waren sowohl der Druck- als auch der Kondensationsraum wärmeisoliert, so daß bei den Rechnungen für Versuch Nr. 25 und Nr. 44 Wärmeverluste nicht berücksichtigt und somit auch Temperaturgradienten in den Wänden nicht erhalten wurden.

Es zeigt sich, daß die zeitlichen Druckverläufe im Druckraum vor und im Kondensationsraum unmittelbar nach dem Freiblesevorgang der Überströmleitung beachtliche Werte erreichen und somit zu einer beträchtlichen Belastung des Sicherheitsbehälters führen.

Die zeitlichen Druckverläufe für Versuch Nr. 44 sind im Prinzip ähnlich jenen, die sich bei Versuch Nr. 25 ergaben, so daß sie hier nicht dargestellt wurden und auch nur kurz auf sie eingegangen wird. Der Hauptunterschied dieses Versuches Nr. 44 gegenüber Versuch Nr. 25 war der, daß nun aufgrund der bei diesem Versuch verwendeten Druckraumeinbauten ein hoher Wassermiß bei der Strömung vom Druck- in den Kondensationsraum auftrat.

Anhand von zahlreichen theoretischen Untersuchungen stellte sich dabei heraus, daß sich die Höhe des Wassermißes während der Versuchsdauer änderte, wobei sich für den Massenanteil an Wasser ein mittlerer Wert von etwa 0,47 bis zu einem Zeitpunkt von $t = 23$ s ergab (Punkt e in Kapitel 3).

Bei dem zeitlichen Druckverlauf im Kondensationsraum ergab sich im Gegensatz zu Versuch Nr. 25, daß bereits in der Anfangsphase der gemessene und der gerechnete Druckverlauf recht gut übereinstimmen, was darauf hinweist, daß thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Gas- und Wasserphase hier eher erreicht wurde als bei Versuch Nr. 25 (Punkt a in Kapitel 3).

Bei Beiden Versuchen Nr. 25 und Nr. 44 zeigte sich, daß sich die Druckverlustbeiwerte für die Überströmleitung aus jenen der einzelnen Leitungselemente ergeben, wobei es allerdings Schwierigkeiten bereiten kann, diese in ausreichend genauer Form aus der einschlägigen Literatur zu erhalten.

8. Schlußfolgerungen

Abschließend ist zu den Vergleichen Theorie-Experiment festzustellen, daß die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und gerechneten Druckverläufen durchwegs gut ist, wobei darüber hinaus wichtige und interessante Aussagen über die thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgänge während des instationären Druckaufbaus im Sicherheitsbehälter erhalten wurden, die bei ent-

sprechenden Auslegungsrechnungen verwendet werden können.

Es wurde weiterhin nachgewiesen, daß die getroffenen Annahmen, die mathematische Formulierung und das verwendete Lösungsverfahren des Rechenmodells ZOCO V geeignet sind, das Kurzzeitverhalten genügend genau mathematisch zu erfassen. Durch die Vergleiche Theorie-Experiment für Volldrucksicherheitsbehälter wurde darüber hinaus nachträglich nachgewiesen, daß die früher erschienenen, einfacheren Rechenmodelle ZOCO I /8,9/ und ZOCO II /10/ ebenfalls richtig und brauchbar sind, da das bei der vorliegenden Untersuchung verwendete Druckzonenmodell (thermodynamisches Gleichgewicht) zur Simulation des Sicherheitsbehälters bei allen drei Rechenmodellen verwendet wird. Ähnliches gilt für die Vergleiche Theorie - Experiment für Druckabbau-systeme und das Rechenmodell DRABSYS /7/.

Es zeigte sich bei den Untersuchungen, daß die Belastungen von Sicherheitsbehälterwänden durch zeitliche Druckverläufe sowie örtliche und zeitliche Temperaturverläufe beachtliche Werte erreichen, so daß erhebliche Spannungen im Wandmaterial auftreten können, die bei der Auslegung sehr sorgfältig zu berücksichtigen sind.

Der nächste Schritt auf der experimentellen Seite insbesondere für Volldrucksicherheitsbehälter sind entsprechende Versuche zur Bestimmung des instationären Druckaufbaus in einem in mehrere miteinander in Verbindung stehende Räume unterteilten Sicherheitsbehälter, um auch die Strömungsvorgänge zwischen den Druckzonen und die dabei auftretenden Probleme sowie das Zusammenwirken mehrerer Druckzonen bei Variation verschiedener Parameter experimentell untersuchen und dadurch entsprechende theoretische Ergebnisse, die mit Hilfe der oben genannten Rechenmodelle zu erhalten sind, überprüfen zu können.

Literaturverzeichnis

- / 1 / D. Brosche,
ZOCO V; Ein Rechenmodell zur Berechnung von zeitlichen und örtlichen Druckverteilungen in Reaktorsicherheitsbehältern, Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung, Technische Universität München, Oktober 1970, Interner Bericht, Veröffentlichung in Vorbereitung
- / 2 / A. Kolflat,
Results of 1959 Nuclear Power Plant Containment Tests, Nuclear Engineering and Science Conference, 4. - 7. April 1960, New York, Preprint Paper Nr. 10, S. 1 - 13
- / 3 / A. Kolflat, W. A. Chittenden,
A New Approach to the Design of Containment Shells for Atomic Power Plants, Proceedings of the American Power Conference, Vol. XIX, 1957, S. 651 - 659
- / 4 / C. L. Henderson, J. M. Marchello,
Film Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas, Journal of Heat Transfer, Aug. 1969, S. 447 - 450
- / 5 / D. B. Barton, C. P. Ashworth, E. Janssen, C. H. Robbins, Predicting Maximum Pressures in Pressure Suppression Reactor Containment, Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, 26. Nov. - 1. Dez. 1961, ASME Paper Nr. 61-WA-222, S. 1 - 19
- / 6 / C. P. Ashworth, D. B. Barton, C. H. Robbins, Pressure Suppression, Nuclear Engineering, 1962, S. 313 - 321
- / 7 / D. Brosche,
Dynamischer Druckaufbau in Druckabbausystemen, MRR 44, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Technische Hochschule München, Mai 1968
- / 8 / D. Brosche, H. Karwat,
The Development of Pressure Differentials Across Containments of Large Water-Cooled Power Reactors, Proceedings of a Symposium on the Containment and Siting of Nuclear Power Plants, Wien, Conference Paper Nr. SM-89/12, April 1967, International Atomic Energy Agency, Wien und: MRR 32, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Technische Hochschule München, April 1967
- / 9 / D. Brosche, H. Karwat,
Dynamischer Druckaufbau in Sicherheitsbehältern großer wassergekühlter Leistungsreaktoren, MRR 32-d, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Technische Hochschule München, Mai 1967
- / 10 / D. Brosche,
ZOCO II, Ein Rechenmodell zur Berechnung des dynamischen Druckaufbaus in Sicherheitsbehältern großer wassergekühlter Leistungsreaktoren, MRR 66, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Technische Hochschule München, Dez. 1969

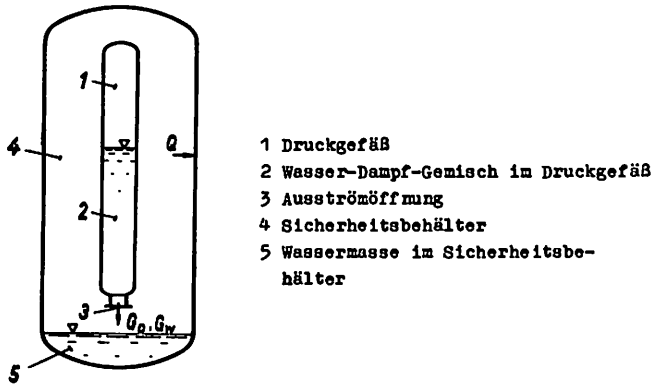


Abb. 1 : Schema der Versuchsanordnung,
Volldrucksicherheitsbehälter

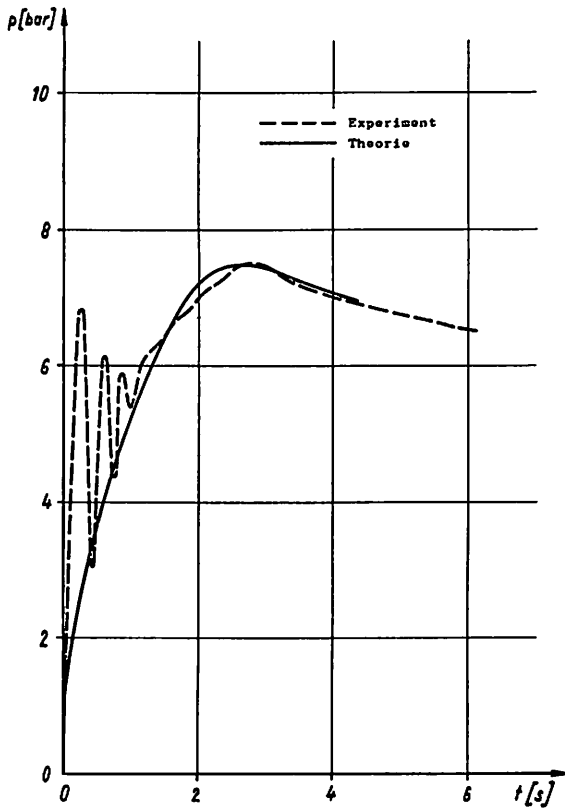


Abb. 2 : Druckverlauf im Sicherheitsbehälter,
Versuch Nr. 11

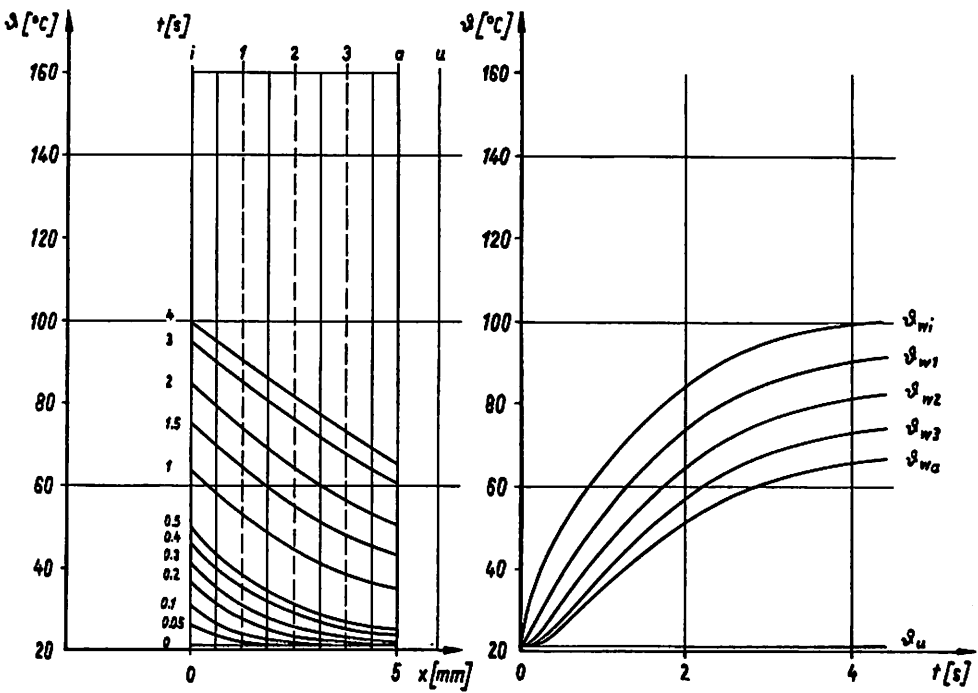


Abb. 3 : Temperaturverläufe in der Sicherheitsbehälterwand,
Versuch Nr. 11

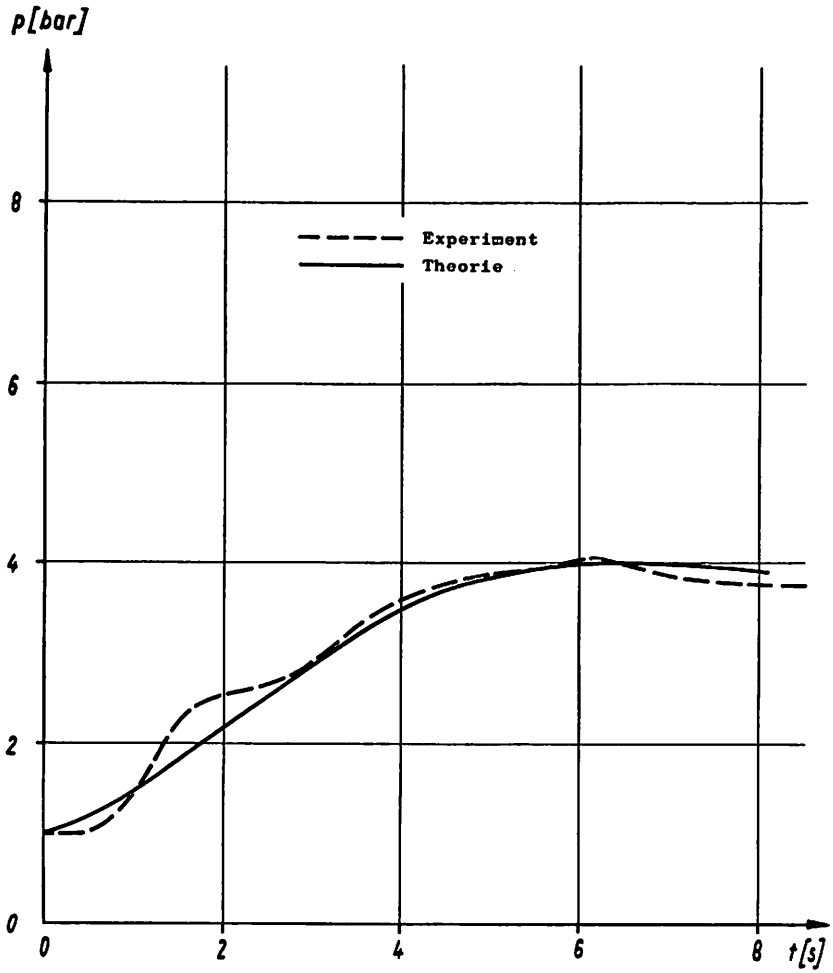


Abb. 4 : Druckverlauf im Sicherheitsbehälter,
Versuch Nr. 4

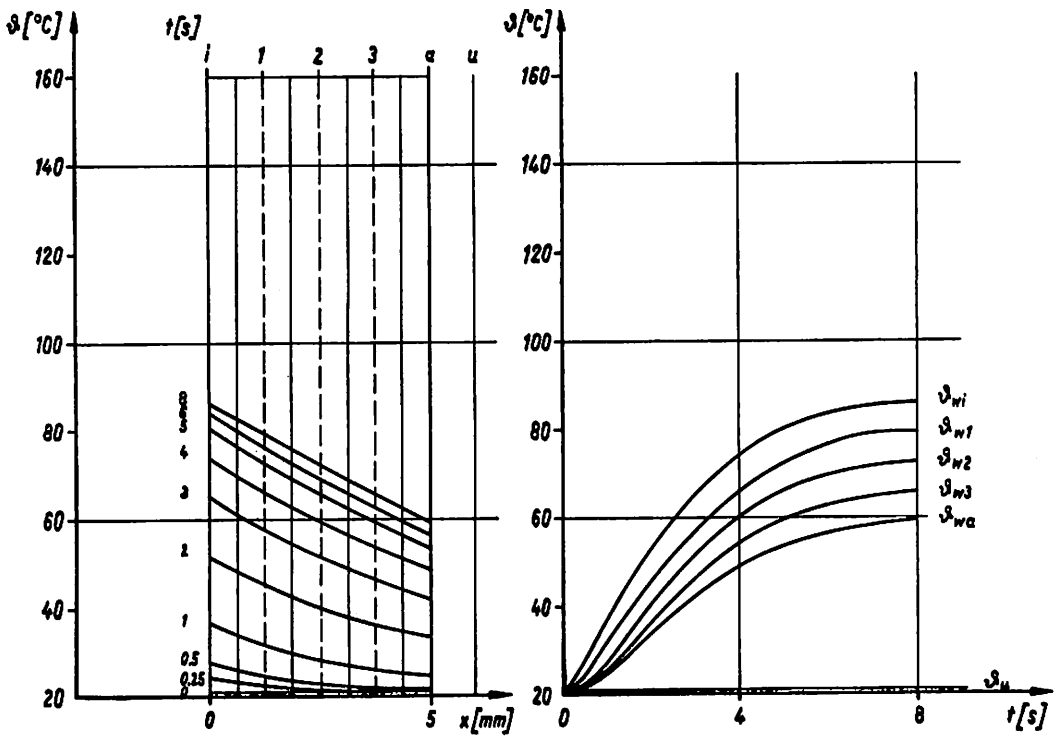


Abb. 5 : Temperaturverläufe in der Sicherheitsbehälterwand, Versuch Nr. 4

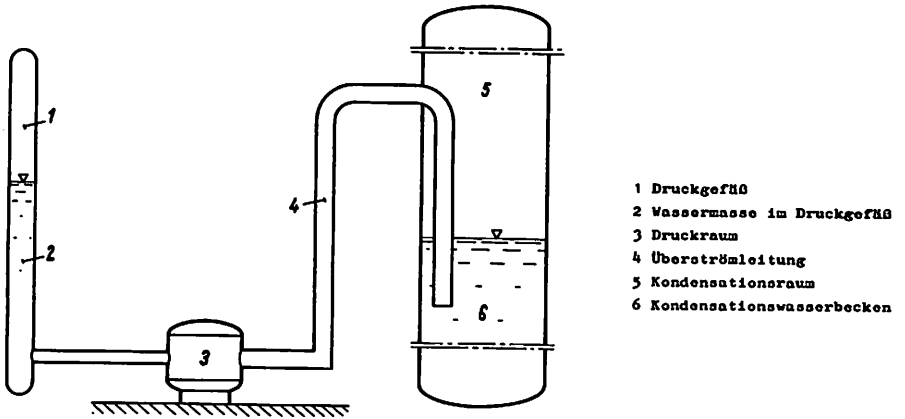


Abb. 6 : Schema der Versuchsanordnung,
Druckabbausystem

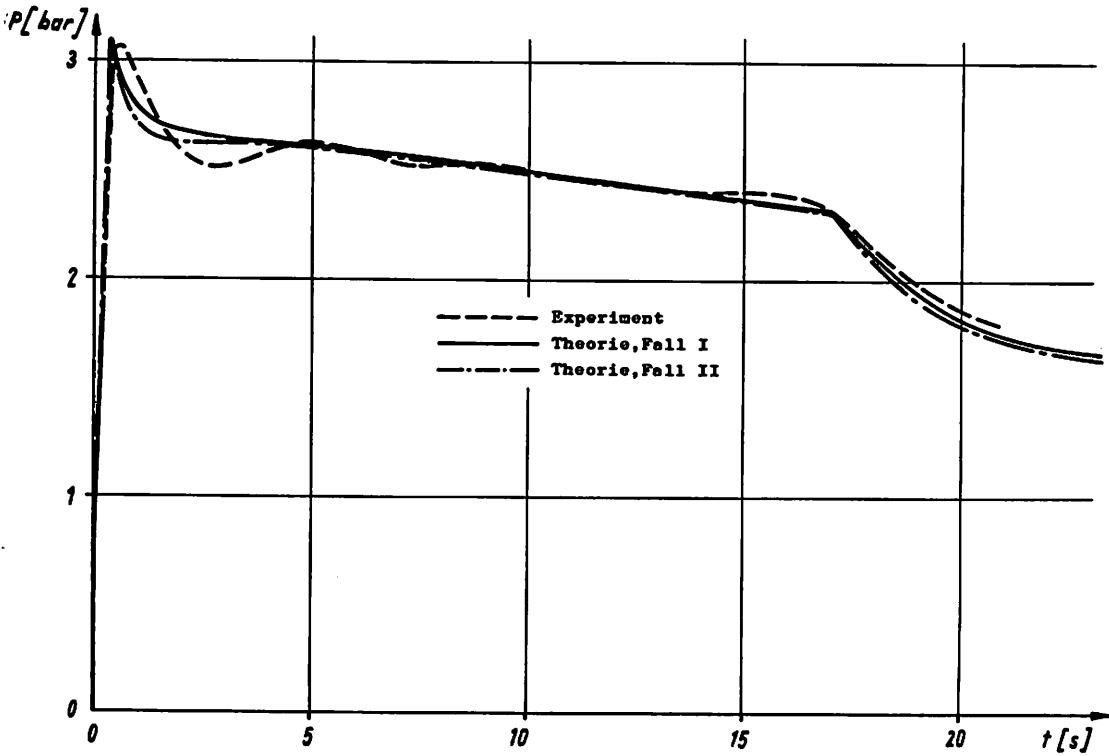


Abb. 7 : Druckverläufe im Druckraum,
Versuch Nr. 25

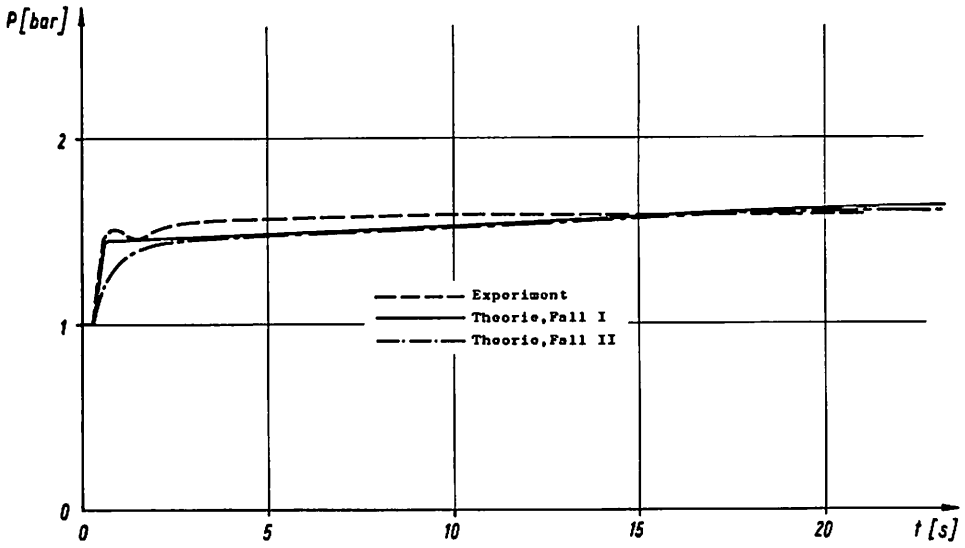


Abb. 8 : Druckverläufe im Kondensationsraum,
Versuch Nr. 25

DISCUSSION

M. S. RAO, India

Q

The pressure suppression system described in the paper is to lead the steam into a mass of water. Could dousing not be considered in place of this system? Are any experiments conducted on the dousing systems? Which of the above two systems is more advantageous and for what conditions of pressure rise?

D. BROSCHE, Germany

A

For nuclear power reactors normally two kinds of containments are used, the full pressure containment and the pressure suppression containment (pressure suppression system).

In order to get a tolerable value for the design pressure of the containment two different principles can be used:

- a) the free volume of the containment building is large enough (full pressure containment) or
- b) the steam is condensed with the aid of a pool of cold water (pressure suppression system described in the paper) or with the aid of ice (ice containment).

These two kinds of heat sinks (water and ice) for pressure suppression systems are used to reduce the pressure during the short-term pressure build-up in the containment. The short-term pressure build-up is the period from the beginning of the loss-of-coolant accident until the end of the blow-down of the primary system and pressure-equalisation between primary system and the different rooms of the containment. During the long-term pressure behaviour, which follows the short-term pressure build-up dousing or spray cooling systems are used to keep the pressure in the containment within the design limit, because the post shut-down heat from the reactor otherwise would rise the pressure.

My paper deals only with the short-term pressurisation and therefore no spray cooling systems are taken into account, which were also not used in the experiments described.

To investigate the efficiency of spray cooling systems during the long-term pressure behaviour, experiments have been made in the U. S. A. . Finally one can say, that for the reduction of the pressure during the short-term pressurisation, water pools and ice condensers are the best methods, if the steam is forced to flow through these heat sinks. If the pressure of a hot steam-air atmosphere during the long-term pressure behaviour must be reduced spray cooling systems seem to be the best method.

E. KOCH, Germany

Q

Bei den Versuchen zum Volldruck-Sicherheitsbehälter wurde ein teilweiser Druckabbau beobachtet, als unten im Behälter kaltes Wasser stand und der Ausfluss auf diese Wasservorlage gerichtet war. Diese Feststellung deckt sich mit Ergebnissen der Bodega-Bay-Versuche, wo noch fast vollständige Kondensation in der Kondensationskammer beobachtet wurde.

Abweichungen Ihrer Rechnungen von den Messergebnissen, die bei den Humbolt-Bay-Versuchen aufgenommen wurden, führen Sie über einen Zeitbereich von mehreren Sekunden auf thermodynamisches Ungleichgewicht zurück. Ich vermute hier andere Einflüsse, z.B. anderen Verlauf der Ausströmrates als der Rechnung zugrundegelegt; denn die gemessenen Temperaturen an der Wasseroberfläche lagen unter der mittleren Wassertemperatur, die gemessenen Temperaturen im Luftraum der Kondensationskammer noch unter der Wassertemperatur.

D. BROSCHE, Germany

A

Zum ersten Teil Ihrer Bemerkungen ist noch hinzuzufügen, dass auch bei den Kondensationsversuchen der Humbolt-Bay-Tests unvollständige Kondensation des Dampfes festgestellt wurde, wie den einschlägigen Veröffentlichungen zu entnehmen ist. Falls man die Versuchsbedingungen des Koflat-Versuches Nr. 4, auf den sich Ihre Ausführungen beziehen, näher ins Auge fasst, nämlich eine im Vergleich zum Druckgefässinhalt hohe kalte Wassermasse im Sicherheitsbehälter, eine kurze Dauer des Ausströmvorganges (einige Sekunden) sowie eine Ausströmöffnung aus dem Druckgefäss, die sich beträchtlich oberhalb des Wasserspiegels im Sicherheitsbehälter befand, leuchtet es unmittelbar ein, das thermodynamische Gleichgewicht zwischen gesamtter Wassermasse und Gasatmosphäre innerhalb des untersuchten und dargestellten Zeitbereiches nicht zu erwarten ist.

Aus Zeitgründen konnte ich nicht näher auf diesbezügliche Einzelheiten auch im Hinblick auf Ergebnisse anderer Autoren eingehen.

Die (geringfügige) Abweichung des gerechneten vom gemessenen Druckverlauf im Kondensationsraum bei Versuch Nr. 25 dürfte kaum von dem der Rechnung zugrundegelegten Massenstromverlauf aus dem Druckgefäss herrühren, da dieses, wie auch dem Manuskript zu entnehmen ist, sehr sorgfältig bestimmt wurde. Dagegen läuft im Kondensationswasserbecken ein Mischvorgang zwischen dem anfänglich kalten Wasser und dem hinzutretenden kondensierenden Dampf ab. Da ein solcher Mischvorgang, der häufig z. B. in der Verfahrenstechnik auftritt, nicht plötzlich erfolgt, sondern allmählich vonstatten geht (oft "lineare" Durchmischung), ist er sehr wahrscheinlich die Ursache entsprechend den diesbezüglichen Ausführungen im Manuskript für die mit fortlaufender Versuchsdauer sich nähernden theoretisch und experimentell ermittelten Druckverläufe.

H. BARNERT, Germany

Q

Vermag das von Ihnen beschriebene Programm auch die durch weitere Wärmeproduktion des Cores, zunächst noch volle Leistung dann Nachwärme, hervorgerufenen Effekte zu beschreiben? Wenn ja, welche Auswirkungen hat die nichtadiabate Entspannung im Vergleich zu den von Ihnen durchgeführten Untersuchungen?

D. BROSCHE, Germany

A

Die weitere Wärmeproduktion des Cores kann ohne weiteres im Rechenmodell

berücksichtigt werden, ebenso natürlich auch die dadurch hervorgerufenen thermodynamischen und strömungsmechanischen Effekte.

Das mathematische Modell zur Simulierung des instationären Verhaltens des Druckgefäßinhaltes (Wasser-Dampf-Gemisch) ist so formuliert, dass z. B. die Wärmeerzeugung des Cores (volle Leistung und Nachwärme) mit Hilfe von entsprechenden Zeitfunktionen, die in das Rechenprogramm ZOCO V einzugeben sind, simuliert wird. Ebenso kann die Wärmezufuhr von heißen Druckgefäßeinbauten und -wänden entweder durch weitere Zeitfunktionen vorgegeben oder vom Programm durch Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung selbst berechnet werden. Weitere Wärmequellen wie z. B. exotherme chemische Reaktionen (Metall-Wasser-Reaktionen) können ebenfalls berücksichtigt werden.

Bei den von mir durchgeführten Untersuchungen lagen Experimente zugrunde, bei welchen die Wärmeerzeugung durch das Core nicht simuliert wurde, da bei den verwendeten Druckgefäßen keinerlei Einbauten (also auch keine Cores) vorlagen. Falls eine solche Wärmeerzeugung zu berücksichtigen ist, was der von Ihnen genannten nichtadiabaten Entspannung entspricht, würde sich das zeitliche Verhalten des Dampf-Wasser-Gemisches im Druckgefäß und des Ausströmvorganges dieses Gemisches aus dem Druckgefäß vermutlich nur geringfügig ändern, da aufgrund der kurzen Ausströmzeit (einige Sekunden) das Zeitintegral der Wärmeerzeugung verglichen mit dem Energieinhalt des Wasser-Dampf-Gemisches klein ist.

C

E. KOCH, Germany

Bei den Humbolt-Bay-Versuchen, die durch ein kleines Verhältnis von Druckkammervolumen zu Luftvolumen der Kondensationskammer ($V_{DK}/K_{KKL} \approx 0,3$) gekennzeichnet waren - im Gegensatz zu der repräsentativeren Bodega-Bay-Versuchen mit $V_{DK}/K_{KKL} \approx 1,6$ - trat ein kurzzeitiges Überschwingen des Kondensationskammerdrucks auf, siehe Skizze, das über 0,3 - 0,5 s beobachtet wurde. Dies ist sicher durch noch nicht vollkommenes Auskondensieren des Dampfes in den Luftblasen unter dem Wasserspiegel zu erklären, zum Teil auch durch Massenkräfte. Die anschließende Abweichung über mehrere Sekunden sollte für uns Anlass einer tiefergehenden Diskussion sein.

