

Zur Kompressibilität und virtuellen Masse bei Blowdown-Beanspruchung von Reaktordruckbehälter-einbauten¹

Von Rolf Krieg und Ulrich Schumann*

Zusammenfassung

Bei der Störfallanalyse von Druckwasserreaktoren wird verlangt, daß der Bruch einer Primärrohrlleitung mit anschließendem Ausströmen des Kühlmittels (Blowdown) nicht zu starken Verformungen oder Zerstörungen der Druckbehältereinbauten (Kernmantel, Core-Stützen im oberen Plenum) führt. In dieser Arbeit wird gezeigt, daß hierbei Wellenausbreitungsphänomene, die auf der Kompressibilität des Kühlmittels beruhen, meist keine dominierende Rolle spielen. Die Fluid-Struktur-Wechselwirkung kann bei Vernachlässigung der Kompressibilität in guter Näherung anhand virtueller Fluidmassen beschrieben werden. Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich erhebliche Vereinfachungen der theoretischen Modelle. Bei Berücksichtigung der Kompressibilität ist dagegen die Methode der virtuellen Fluidmasse oder die Beachtung nur eines Wellendurchganges im allgemeinen unzulänglich.

Abstract

Compressibility and added masses in the blowdown analysis of nuclear reactor internals

In the safety analysis of pressurized water reactors, it is required that the failure of a primary coolant circuit with a subsequent blowdown must not result in major distortions or break of pressure-vessel internals such as the core barrel or core support columns. It is shown that in this case wave propagation effects which are based on the compressibility of the coolant usually play a minor role. In addition, for an incompressible coolant the phenomenon of fluid-structure interaction can be described approximately by added fluid masses. Both facts lead to considerable simplifications of the theoretical models. For a compressible fluid, however, the method of added fluid masses and the consideration of only the first wave passing the structures is, in general, inadequate.

INIS-EDB-DESCRIPTORS

PRESSURE VESSELS
BLOWDOWN
COMPUTERIZED SIMULATION
WAVE PROPAGATION
HDR REACTOR
FLUID-STRUCTURE INTERACTIONS
PRIMARY COOLANT CIRCUITS
RUPTURES
CONTINUITY EQUATION

COMPRESSIBLE FLOW
OSCILLATIONS
DIRAC EQUATION
PWR TYPE REACTOR
F CODES
SOUND WAVES
DEFORMATION
TIME DEPENDENCE
VELOCITY

1. Einführung

In den letzten Jahren wurden vom Kernforschungszentrum Karlsruhe eine Reihe von vertieften Untersuchungen zur Sicherheit von Leichtwasserreaktoren durchgeführt. Ein Schlüsselproblem sind die dynamischen Beanspruchungen von Reaktordruckbehältereinbauten beim Blowdown [1, 2, 3]. Es muß gezeigt werden, daß die zu erwartenden Verformungen der Reaktordruckbehältereinbauten die Beweglichkeit der Abschaltstäbe und die Abfuhr der Nachwärme nicht unzulässig beeinflussen.

Eine wesentliche Stütze sind hierbei die aufwendigen Blowdown-Experimente am stillgelegten Reaktor HDR [4]. Sie erfolgen

nahezu im Maßstab 1:1. Für sich allein wären die Blowdown-Experimente jedoch wenig sinnvoll. Sie würden Aussagen nur für einige einzelne Störfallsituationen liefern. Tatsächlich ist aber ein ganzes Spektrum von Störfallsituationen denkbar, z.B. können die Rohrbrüche an verschiedenen Stellen und verschieden schnell auftreten, die Temperaturverteilung kann verschieden sein usw. Auch die Konstruktion der einzelnen Reaktoren ist unterschiedlich. Insbesondere weicht die Geometrie des HDR nicht unerheblich von der Geometrie heutiger Leichtwasserreaktoren ab.

Aus diesem Grunde wurde zur Beschreibung der Blowdown-Vorgänge eine Reihe von theoretischen Modellen entwickelt und anhand der Blowdown-Experimente überprüft [1, 5, 6, 7]. Einige Arbeiten hierzu sind noch im Gange. Nur unter Verwendung solcher an Experimenten geprüfter theoretischer Modelle lassen sich ganze Störfall-Spektren mit vielen Parametervariationen untersuchen.

Vielfach herrscht die Meinung vor, daß theoretische Modelle mit Computerprogrammen identisch seien. Theoretische Modelle sind jedoch nichts anderes als möglichst klug ausgewählte Verknüpfungen von Naturgesetzen. Lediglich in Fällen, wo sehr viele Verknüpfungen notwendig sind, dienen Computerprogramme der Durchführung entsprechender numerischer Rechnungen.

Die Anzahl der Verknüpfungen, d.h. die Komplexität der Modelle und Programme, sollte dabei nicht größer sein, als zum Erreichen der gewünschten Aussage notwendig ist. Mit zunehmender Komplexität werden die Modelle immer weniger durchschaubar und überprüfbar. Die Wahrscheinlichkeit für Irrtümer nimmt zu. Was würde es da nützen, wenn ein oder zwei Experten von der Stichhaltigkeit einer Untersuchung überzeugt wären, niemand sonst dies aber nachvollziehen könnte?

Gute theoretische Modelle erlauben bereits ohne numerische Rechnungen den Einfluß zahlreicher Parameter abzuschätzen. Viele dieser Parameter brauchen dann in den weiteren Untersuchungen gar nicht variiert zu werden. Nur so gelangt man zu Analysen, bei denen wesentliche Effekte ausreichend genau und zuverlässig beschrieben werden können, der erforderliche Aufwand aber noch erträglich ist.

Die nachfolgenden Untersuchungen zu den Blowdown-Beanspruchungen versuchen obigen Überlegungen Rechnung zu tragen. Im Mittelpunkt steht deshalb das physikalische Verständnis der Vorgänge. Darauf aufbauend wird versucht, wesentliche und unwesentliche Effekte zu identifizieren. Hierzu werden sowohl Modellüberlegungen und Abschätzungen als auch Rechnungen mit umfangreichen Computerprogrammen eingesetzt. Insbesondere wird der Einfluß der Fluid-Kompressibilität studiert. Wäre sie vernachlässigbar, so würden sich die Rechenmodelle zum Teil erheblich vereinfachen. Man könnte dann der komplizierten dreidimensionalen Geometrie des Strömungsgebietes mehr Beachtung schenken.

Tatsächlich ergibt sich, daß unter gewissen Voraussetzungen die Fluid-Kompressibilität und der auf ihr beruhende Wellen-Charakter der Beschreibung unwesentlich ist. Daraus folgt weiterhin, daß unter einigen zusätzlichen Voraussetzungen auch die Fluid-Struktur-Wechselwirkung auf vereinfachte Weise, nämlich anhand konstanter virtueller Massen, beschrieben werden kann. Beides wird für die Beanspruchungen des Kernmantels beim Blowdown durch den Einlaßstutzen und für die Beanspruchungen der Core-Stützen (Steuerstabführungsrohre) beim Blowdown durch den Auslaßstutzen im einzelnen diskutiert.

¹ Überarbeitete Fassung eines Vortrags, gehalten auf der Jahrestagung Kerntechnik, Düsseldorf, 24.-26. März 1981.

* Dr. Rolf Krieg, Dr. Ulrich Schumann, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Reaktorenentwicklung, Postfach 36 40, D-7500 Karlsruhe.

2. Annahmen zur Störfalleinleitung

Bei dem zu untersuchenden Blowdown wird davon ausgegangen, daß die Hauptkühlmittelleitung versagt. Nach den Festigkeitsauslegungen und den weltweit vorliegenden Erfahrungen mit Hochdruckleitungen ist dies sehr unwahrscheinlich [8, 9]. Erschwerend wird weiter davon ausgegangen, daß der Bruch an der ungünstigsten Stelle erfolgt, d.h., am Einlaß- oder Auslaßstutzen, daß er zu einer vollen Öffnung der Strömungsquerschnitte führt und daß er schlagartig erfolgt. Da die Rißausbreitung eine gewisse Zeit braucht und die zu bewegenden Rohrwände trägheitsbehaftet sind, stellt letzteres einen in Wirklichkeit nicht zu erreichenden Grenzfall dar. Schließlich wird angenommen, daß an der Bruchstelle auch der Druck schlagartig auf den Sättigungswert abfällt.

Der so definierte Störfall ist deshalb als äußerst extrem anzusehen. Er hat jedoch einen wesentlichen Vorteil. Selbst einfache Modellüberlegungen zeigen, daß er im Vergleich zu vielen anderen denkbaren Störfällen zu besonders ausgeprägten Beanspruchungen führt. Dieser Störfall deckt somit eine große Zahl anderer Störfälle ab. Dadurch erhält er seine Berechtigung, obwohl er genau genommen unmöglich ist.

3. Bedeutung der Wellenausbreitungsphänomene

Infolge der plötzlichen Druckabsenkung am Einlaß- oder Auslaßstutzen laufen Druckentlastungswellen durch diesen Stutzen in das Innere des Reaktors, werden an Querschnittsänderungen (z.B. Übergang vom Stutzen zum Innenraum) und Wänden reflektiert, kommen zum Teil zur Bruchstelle zurück und laufen von dort erneut in das Innere des Reaktors usw. Das Fluid wird hierbei zur Bruchstelle hin mehr und mehr beschleunigt. Ein größerer Anfangsbereich dieser Beschleunigungsphase soll hier untersucht werden. Er wird häufig als die kritische Phase angesehen. Der nachfolgende Übergang zur quasi-stationären Ausströmungsphase, bei der dann im Inneren des Reaktors bereits ein Teil des Fluides verdampft, wird nicht betrachtet.

Unmittelbar nach der Druckabsenkung sind die Druckentlastungswellen besonders scharf ausgeprägt, d.h., die Druckverteilung hat sprunghaftigen Charakter, und die Beschleunigung erfolgt diskontinuierlich in Schüben. Bereits nach wenigen Reflexionen aber führen die vielen auftretenden Überlagerungen sowie gewisse Dämpfungseffekte zu einer Glättung. In manchen Arbeiten wird die erste Wellenausbreitung unmittelbar nach der Druckabsenkung deshalb als Wellenausbreitungsphase bezeichnet.

Sowohl für diesen Zeitbereich als auch darüber hinaus bis zum Erreichen erheblicher Fluidgeschwindigkeiten gelten die Kontinuitätsgleichung und die Impulsgleichung

$$\frac{1}{c_0} \frac{\partial p}{\partial t} = - \operatorname{div} (\rho_0 \vec{u}),$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = - \operatorname{grad} p$$

Hierin ist \vec{u} der Geschwindigkeitsvektor und p der Druck. Beide Größen sind Funktionen des Ortes und der Zeit t . Ferner ist ρ_0 die mittlere Dichte und c_0 die mittlere Schallgeschwindigkeit. Nichtlineare Glieder sind vernachlässigt. Dies ist zulässig, solange die Dichteschwankungen klein sind gegenüber der mittleren Dichte und der Term $\rho_0 \vec{u}^2/2$ klein ist gegenüber den charakteristischen Druckdifferenzen. Die Fluid-Viskosität wird nicht berücksichtigt. Die Lösungen dieser Gleichungen sind die oben beschriebenen Druckentlastungswellen einschließlich aller ihrer Reflexionen. Auch sie gelten nicht nur für wenige Wellendurchgänge, sondern für ein Gutteil der Beschleunigungsphase bis zum Erreichen erheblicher Fluidgeschwindigkeiten.

Sind die Randbedingungen zeitunabhängig, d.h., werden Strukturnachgiebigkeiten vernachlässigt, so folgt aus den vorangegangenen Gleichungen, daß Änderungen der Schallgeschwindigkeit die Formen und Amplituden der Beschleunigungs- und Druckverteilungen nicht beeinflussen. Lediglich die Zeit wird umgekehrt proportional zur Schallgeschwindigkeit gerafft oder gestreckt. Geht die Schallgeschwindigkeit gegen Unendlich, so werden die Beschleunigungs- und Druckverläufe über der Zeit immer stärker schwankend (Fig. 1). Ihre Mittelwerte – nur sie haben hier eine physikalische Bedeutung – müssen zur Lösung für ein inkompressibles Fluid konvergieren. Diese aber ist in Beschleunigungen und Drücken zeitlich konstant.

Aus diesem Sachverhalt folgt: Bei endlicher Schallgeschwindigkeit, d.h. bei kompressiblem Fluid existieren zeitliche Mittelwerte der Beschleunigungen und Drücke. Diese Mittelwerte sind für denselben Ort gleich und stimmen mit der Lösung für ein inkompressibles Fluid überein.

Die Zeitintervalle zur Bildung dieser Mittelwerte müssen allerdings ausreichend groß sein. Die untere Grenze ist die größte charakteristische Wellenausbreitungszeit im Fluid. Dies ergibt sich anhand verschiedener Beispiele. Ist diese Zeit wesentlich kleiner als die kleinste relevante Schwingungsperiode der Struktur, so hat die Mittelwertbildung, die bei der inkompressiblen Rechnung automatisch durchgeführt wird, keinen Einfluß auf das dynamische Verhalten der Struktur. In diesem Zeitbereich kommt es nämlich wegen der Trägheit der Struktur auf einzelne Lastspitzen nicht an.

Dies bedeutet: Ist die größte charakteristische Wellenausbreitungszeit im Fluid wesentlich kleiner als die kleinste relevante Schwingungsperiode der Struktur, so ist es für die Strukturbeanspruchung unerheblich, ob bei den fluiddynamischen Analysen das Fluid als kompressibel oder inkompressibel behandelt wurde.

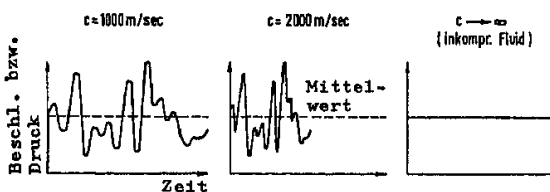


Fig. 1: Beispiel für einen Beschleunigungs- oder Druckverlauf über der Zeit für verschiedene Schallgeschwindigkeiten c

Unter der Annahme, daß die an der Struktur angreifenden Kräfte immer in derselben Richtung wirken, läßt sich sogar abschätzen, welches Verhältnis zwischen der größten charakteristischen Wellenausbreitungszeit T_w und der kleinsten Schwingungsperiode T_s zulässig ist. Die konstante Mittelwertlast L_0 aus einer inkompressiblen fluiddynamischen Analyse hat Strukturbeanspruchungen der Form

$$S_0 = \frac{L_0}{k} (1 - \cos 2\pi \frac{t}{T_s})$$

zur Folge. Die zeitliche Lastverteilung, die am meisten von der konstanten Mittelwertlast abweicht und für die die Strukturbeanspruchungen am größten sind, ist eine Folge von Dirac-Stößen in den Zeitabständen T_w und mit den Impulsen $L_0 T_w$. Nach N Stößen haben sie Strukturbeanspruchungen der Form

$$S = \frac{L_0}{k} 2\pi \frac{T_w}{T_s} \sum_{n=1}^N \sin 2\pi \frac{t - (n-1)T_w}{T_s}; \quad t \geq (N-1)T_w$$

zur Folge. In beiden Gleichungen ist k eine Struktursteifigkeit. Die inkompressiblen fluiddynamischen Analysen sind nun offenbar so lange zulässig, als $\operatorname{Max}(S_0) \approx \operatorname{Max}(S)$ ist. Unter Beachtung

der Beziehungen für S_0 und S liefert diese Bedingung das Kriterium

$$\frac{T_w}{T_s} < \frac{1}{\pi}$$

Unter der Annahme, daß die an der Struktur angreifenden Kräfte ihr Vorzeichen dagegen ändern, sollte dieses Verhältnis einen entsprechend kleinen Wert nicht überschreiten.

Genügen T_w und T_s dieser Bedingung, so kann bei der Berechnung der Strukturbeanspruchung die Fluidkompressibilität vernachlässigt werden. Die auf ihr beruhenden Wellenausbreitungsmodelle können durch einfache Beschleunigungsmodelle ersetzt werden. Die erste Wellenausbreitung unmittelbar nach der Druckabsenkung führt nicht zu den maximalen Strukturbeanspruchungen.

Unter Beachtung dieser Erkenntnisse läßt sich der erforderliche Rechenaufwand in manchen Fällen erheblich reduzieren. Insbesondere müssen für das Fluid, das in der Regel einen größeren Raum einnimmt als die Struktur, keine unabhängigen Freiheitsgrade eingeführt werden.

Auf der anderen Seite folgt, daß es bei Analysen der maximalen Beanspruchungen häufig nicht genügt, sich auf erste Druckentlastungswelle zu beschränken.

Anders ist dies bei den Wellenausbreitungsphänomenen, die auf der Nachgiebigkeit der Struktur beruhen. Sie haben unmittelbaren Einfluß auf die Strukturbeanspruchung. Bei Bewegungen normal zur Strukturoberfläche müssen auch die anliegenden Fluidmassen mit beschleunigt werden. Dieser Effekt ist bekannt unter dem Begriff Fluid-Struktur-Wechselwirkung [10].

Hierbei ist zu beachten, daß in einem kompliziert umrandeten Fluidbereich das Beschleunigungsfeld ungleichmäßig ist. Die bei der Fluid-Struktur-Wechselwirkung effektiven Fluidmassen sind deswegen im allgemeinen nicht identisch mit den tatsächlichen Fluidmassen. Fluidbereiche, deren Beschleunigung höher ist als die zugehörige Strukturbeschleunigung, liefern größere Beiträge zu diesen effektiven Fluidmassen; Fluidbereiche, deren Beschleunigung kleiner ist, liefern geringere Beiträge. Nur bei inkompressiblem Fluid und kleinen Verschiebungen sind die effektiven Fluidmassen von dem aktuellen Bewegungszustand unabhängige, konstante Größen [11]. Sie werden meist als virtuelle Fluidmassen bezeichnet. Nur bei inkompressiblem Fluid kann deshalb von den damit verbundenen Rechenvereinfachungen Gebrauch gemacht werden.

Sind die effektiven Fluidmassen klein gegenüber den entsprechenden Strukturmassen, so kann der Einfluß der Fluid-Struktur-Wechselwirkung vernachlässigt werden. Bei den vorliegenden Problemen sind die effektiven Fluidmassen aber häufig ein Mehrfaches der Strukturmassen. Die Fluid-Struktur-Wechselwirkung hat deswegen häufig einen dominierenden Einfluß auf die dynamischen Vorgänge.

4. Beanspruchung des Kernmantels

Die größten Beanspruchungen des Kernmantels werden bei einem Blowdown durch den Einlaßstutzen erwartet. Die auftretenden Differenzdrücke haben ihr Maximum in der Nähe des Stutzens. Wie in Fig. 2 dargestellt, unterscheidet man zwischen globalen und lokalen Verformungen. Die globalen Verformungen ergeben sich, wenn der ganze Kernmantel als oben eingespannter schwingender Biegebalken beschrieben wird. Von Bedeutung ist hier vor allem die niedrigste Schwingungsordnung.

¹⁾ Tatsächlich erfüllt dieses Kriterium die folgenden Bedingungen:
 $\text{Max}(S_0) \approx \text{Max}(S)$, wenn nur ein Dirac-Stoß beachtet wird;
 $\text{Max}(S_0) \approx \sin 1 \cdot \text{Max}(S)$, wenn die ganze Folge von Dirac-Stößen beachtet wird.

Sie führt zu axialen Membranspannungen an der Kernmantel-Einspannung. Die lokalen Verformungen treten insbesondere als Ausbuchtungen in Stützennähe auf. Sie lassen sich als Schalen-schwingungen höherer Umfangs- und Axialordnung beschreiben und führen im wesentlichen zu Schalen-Biegespannungen.

Die größte charakteristische Wellenausbreitungszeit bei einem typischen Druckwasserreaktor der 1300-MW-Klasse wird abgeschätzt zu $T_w = 16$ ms. Dies entspricht einem Wellenhin- und rücklauf zwischen Blowdown-Stutzen und unterem Rost. Die Schwingungsperiode für die globale Kernmantelverformung beträgt etwa $T_s = 100$ ms. Für die globale Kernmantelverformung und die daraus resultierenden axialen Membranspannungen darf deswegen nach dem Kriterium in Abschnitt 3 das Fluid als inkompressibel behandelt werden. Die kleinste Schwingungsperiode für die wesentlichen lokalen Kernmantelverformungen beträgt etwa $T_s = 3$ ms. Für die lokalen Kernmantelverformungen und die daraus resultierenden Schalen-Biegespannungen muß deswegen nach dem Kriterium in Abschnitt 3 das Fluid als kompressibel behandelt werden.

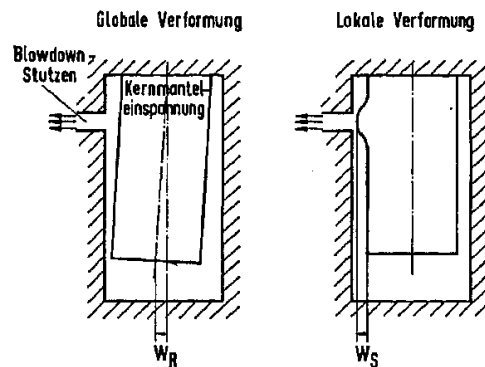


Fig. 2: Globale und lokale Kernmantelverformungen (die Auslenkungen sind stark übertrieben)

In den letzten Jahren wurde die Kernmantelbeanspruchung bei einem Blowdown intensiv untersucht. Zur Analyse wurde das Computerprogramm FLUX entwickelt [12, 13]. Es basiert auf einem kompressiblen Potentialsströmungsmodell und beschreibt die Fluid-Struktur-Wechselwirkung durch simultane numerische Integration der entsprechend gekoppelten Bewegungsgleichungen. Die Geometrie des Druckbehälters wird dreidimensional erfaßt. Die dynamischen Parameter des Kernmantels werden mit dem Schalenmodell CYLDY2 [14] ermittelt. FLUX wurde inzwischen anhand der HDR-Experimente und durch Vergleich mit anderen Computerprogrammen überprüft [7].

4.1. Vernachlässigung der Fluidkompressibilität

Das Rechenprogramm FLUX ist sowohl für kompressibles als auch inkompressibles Fluid anwendbar. Es kann daher zur quantitativen Überprüfung obiger Aussagen über die Vernachlässigung der Kompressibilität benutzt werden.

In Fig. 3 bis 7 sind ausgewählte Ergebnisse einer Parameterstudie dargestellt. Der untersuchte Fall entspricht einem typischen Druckwasserreaktor. Allerdings ist der Reaktorkern nicht im einzelnen modelliert. Im Gegensatz zu den Spezifikationen in Abschnitt 2 wird der Druck an der Bruchstelle innerhalb von 5 ms auf den Satteldampfdruck abgesenkt. Gezeigt sind jeweils die Kernmantelverschiebungen für vier Fälle. Es interessieren zunächst nur die dicken Kurven. Sie gehören zu den Fällen mit vollständiger Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung. Die durchgezogenen Kurven wurden für kompressibles Fluid, die gestrichelten für inkompressibles Fluid errechnet. Im

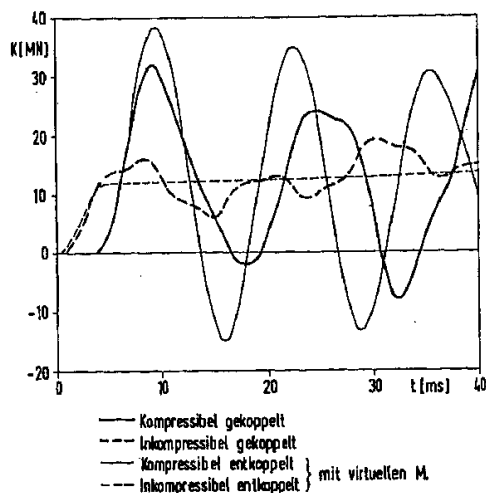


Fig. 3: Integrale Druckkraft K am Kernmantel in Richtung auf den Blowdown-Stutzen als Funktion der Zeit t

inkompressiblen Fall wird der Druck am Deckel konstant gehalten. Diese Randbedingung erscheint realistisch, da der Druck im Inneren erst nach rund 100 ms auf den Seitendampfdruck abfällt. Der zu diskutierende Zeitbereich ist aber deutlich kürzer.

Wie erwartet, erreichen die kompressibel berechneten Drucklasten am Kernmantel sehr viel größere Maximalwerte als die inkompressibel berechneten (Fig. 3). Sie oszillieren aber um die inkompressiblen Ergebnisse. Die berechneten Verschiebungen am unteren Ende des Kernmantels stimmen dagegen recht gut überein (Fig. 4). Bei der kompressiblen Rechnung setzt die Bewegung entsprechend der Laufzeit der Welle später ein als bei der inkompressiblen und enthält hochfrequente Anteile. Diese stammen übrigens von Biegebalkenschwingungen höherer Ordnung, für die das Kriterium in Abschnitt 3 nicht erfüllt ist. Die Abweichungen in den Maximalwerten sind kleiner als 20%. Diese relativ gute Übereinstimmung war nach den Überlegungen in Abschnitt 3 zu erwarten. Recht erstaunlich ist jedoch die Tatsache, daß auch die Kernmantelverschiebungen in der Nähe des Stutzens noch einigermaßen übereinstimmen (Fig. 5).

Ähnlich verhält es sich mit den Maximal-Spannungen, die zu verschiedenen Zeiten im allgemeinen auch an verschiedenen Stellen des Kernmantels auftreten. Die Zeitverläufe der Maximalspannungen haben deswegen Knicke (Fig. 6 und 7). Die Übereinstimmung bei den Membranspannungen, die bei der Beurteilung der Kernmantel-Integrität von ausschlagender Bedeutung sind, war zu erwarten. Überraschend ist aber wieder, daß auch die maximalen Gesamtspannungen übereinstimmen. Bei beiden Spannungsarten treten die absoluten Maximalwerte bei kompressibler und inkompressibler Analyse zwar zu verschiedenen Zeiten auf; die Beträge unterscheiden sich aber um weniger als 3%.

4.2. Beschreibung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung mit Hilfe virtueller Fluidmassen

Die Diskussion in Abschnitt 4.1 betraf die Ergebnisse gekoppelter Fluid-Struktur-Rechnungen. In der Praxis arbeitet man bisher meist mit entkoppelten Analysen. Hierbei wird die Fluidlast für starre Wände berechnet und dann der Struktur aufgebracht, ohne die Rückwirkung auf das Fluid zu berücksichtigen. Wie früher [12, 13] bereits erläutert, werden bei dieser Vorgehensweise unrealistische Strukturbewegungen errechnet, wenn die Eigenfrequenzen der Struktur nahe bei hochfrequenten Lastschwingungen

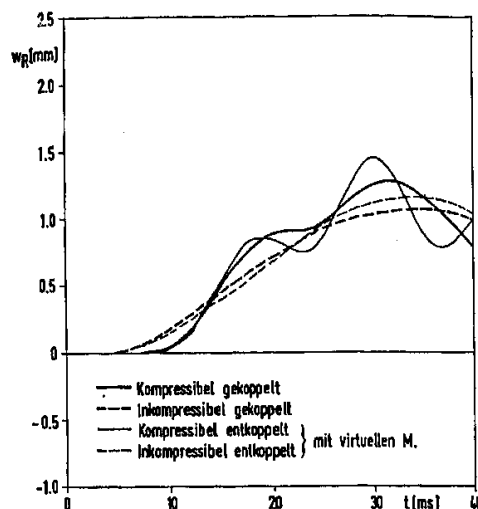


Fig. 4: Radiale Verschiebung w_R am unteren Ende des Kernmantels als Funktion der Zeit t

liegen, da dann im Modell Resonanz vorliegt. Wohlgermerkt, diese Resonanz ist unphysikalischer Natur. In der Realität werden Lasten nicht direkt an der Struktur, sondern an der Bruchstelle aufgebracht. Dabei handelt es sich um eine Sprunglast, die nicht zu Resonanz führen kann. Des weiteren kann man solche Resonanzen mit Hilfe von Energiebetrachtungen ausschließen. Häufig versucht man, die Fluid-Struktur-Wechselwirkung durch Addition virtueller Fluidmassen zu den Strukturmassen näherungsweise zu berücksichtigen. Streng genommen sind virtuelle Fluidmassen nur für inkompressible Potentialströmung definiert. In der Praxis werden aber solche Fluidmassen auch bei Analysen benutzt, in denen das Fluid als kompressibel behandelt wird. Die dünnen Kurven in Fig. 3 bis 7 stellen die bei entkoppelter Rechnung gewonnenen Ergebnisse dar, wobei virtuelle Massen berücksichtigt werden. Man sieht, daß die inkompressibel entkoppelte Rechnung recht gut mit der inkompressibel gekoppelten übereinstimmt. Die kleinen Abweichungen sind auf zwei Vereinfachungen in der hier benutzten entkoppelten Rechnung zurückzuführen. Zum einen wurde bei der Aufstellung der virtuellen

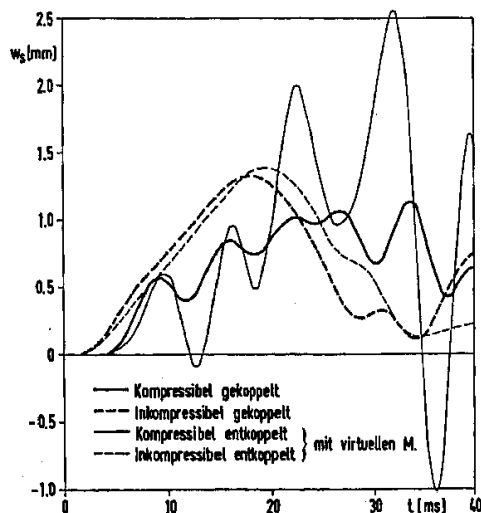


Fig. 5: Radiale Kernmantelverschiebung w_s in der Nähe des Stutzens als Funktion der Zeit t

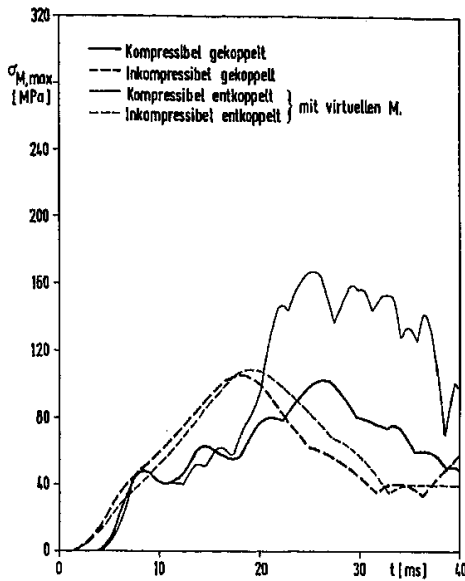


Fig. 6: Maximalwert der Membran-Vergleichsspannung als Funktion der Zeit t

Massen der Einfluß des Blowdown-Stützens vernachlässigt. Zum anderen kann man mit virtuellen Massen den nichtlinearen Einfluß großer Fluidgeschwindigkeiten nicht berücksichtigen. Der Vergleich zeigt, daß dies untergeordnete Vereinfachungen sind. In der Tat läßt sich im linearen Fall unter Verwendung des Superpositionsprinzips beweisen, daß die entkoppelte inkompressible Rechnung mit virtuellen Massen das gleiche Ergebnis liefert wie die vollständige, gekoppelte inkompressible Rechnung ([12], Anhang 8). Selbstverständlich gilt dies nicht nur für die Beanspruchung des Kernmantels, sondern allgemein. Sehr viel größere Abweichungen ergeben sich bei der kompressibel entkoppelten Rechnung. In diesem Fall enthält das Druckfeld hochfrequente Schwingungen. Diese schwingenden Lasten führen, wie oben für Rechnungen ohne virtuelle Massen bereits

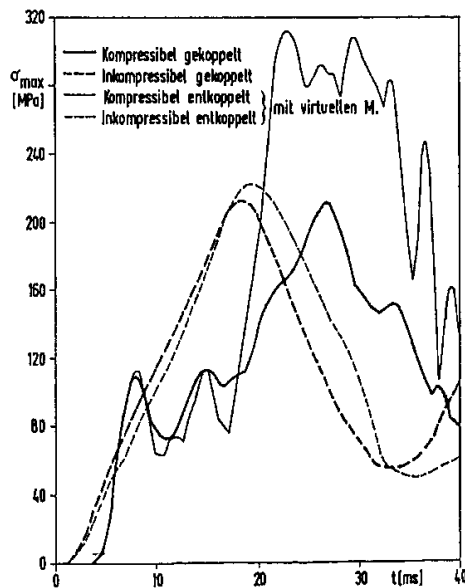


Fig. 7: Maximalwert der Gesamt-Vergleichsspannung als Funktion der Zeit t

erläutert, sehr leicht zu Resonanz. Diese Tendenz wird um so größer, je mehr Kernmanteleigenfrequenzen in der Analyse berücksichtigt werden.

Aus diesen Darlegungen folgt: Wird die Fluidkompressibilität berücksichtigt und spielt die Fluid-Struktur-Wechselwirkung eine Rolle, so muß diese vollständig erfaßt werden. Die Verwendung von virtuellen Massen reicht nicht aus. Darf man dagegen nach dem Kriterium in Abschnitt 3 die Kompressibilität vernachlässigen, so läßt sich die Fluid-Struktur-Wechselwirkung in vielen Fällen durch Verwendung virtueller Fluidmassen ausreichend beschreiben.

5. Beanspruchung der Core-Stützen (Steuerstabführungsrohre)

Erhebliche Beanspruchungen der Core-Stützen werden bei einem Blowdown durch den Auslaßstutzen erwartet. Die starke Fluidbeschleunigung senkrecht zu den Stützen hat große Querkraft- und Biegemomente in diesen Stützen zur Folge. Die daraus resultierenden Verformungen sind stark übertrieben in Fig. 8 dargestellt. Besonders stark ausgeprägt sind diese Kräfte in der Nähe des Auslaßstützens. Die Fluidviskosität liefert demgegenüber relativ geringe Querkraft. Ihr Beitrag zu den Maximalbeanspruchungen ist vernachlässigbar.²⁾ Die im Core einsetzende Aufwärtsströmung hat zusätzliche Axialkräfte (Knicklasten) in den Stützen zur Folge. Solange die Stützen jedoch nicht sehr stark verformt sind, liefern diese Axialkräfte nur eine geringe Beanspruchung.

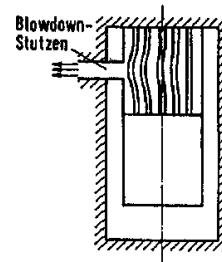


Fig. 8: Verformung der Core-Stützen (die Auslenkungen sind stark übertrieben)

Die Untersuchungen konzentrieren sich deshalb auf die Querkraftbeanspruchung und die dadurch angeregten Biegeschwingungen der Stützen.

Die größte charakteristische Wellenausbreitungszeit für fluiddynamische Vorgänge, die auf die Stützenbelastung wesentlichen Einfluß haben, wird angenommen zu 6 ms. Dies entspricht in etwa einem horizontalen Wellendurchlauf im oberen Plenum. Die Schwingungsperiode für die niedrigste Biegeschwingung einer Stütze (in deren Innerem sich ein Gestänge für die Steuerstabantriebe befindet) beträgt etwa 23 ms. Die Stützen-Enden wurden hierbei als gelenkig gelagert angenommen. Der Trägheitseffekt des umgebenden Fluids wurde berücksichtigt. Für die Stützenbeanspruchung aus der niedrigsten Biegeschwingung darf unter Beachtung dieser Werte nach Abschnitt 3 das Fluid als inkompressibel behandelt werden, wenn die Stützenbelastung im zeitlichen Verlauf ihr Vorzeichen nicht ändert. Höhere Biegeschwingungen werden hier nicht diskutiert.

Beachtet man dies und vernachlässigt man die Nachgiebigkeiten anderer Bauteile, so schwingen die Stützen synchron. Die über das umgebende Fluid bewirkte gegenseitige Kopplung der Schwingungsausschläge der verschiedenen Stützen ist deshalb

²⁾ Ganz anders ist dies bei der stationären Umströmung solcher Stützen. Ist das Strömungsfeld außen von parallelen Wänden begrenzt, so liefern die Trägheitskräfte bei nichtviskoser Strömung keinen Querkraftbeitrag. Diese Tatsache ist als hydrodynamisches Paradoxon bekannt.

relativ schwach. Sie führt zu gewissen Reduzierungen der größeren Schwingungsausschläge und zu entsprechenden Erhöhungen der kleineren Schwingungsausschläge. Man überschätzt daher die maximalen Beanspruchungen, wenn man die gegenseitige Kopplung der Schwingungsausschläge vernachlässigt. Basierend auf obigen Voraussetzungen können die fluiddynamischen Kräfte unter der Annahme von starren Core-Stützen berechnet werden. Bei der Bestimmung der Stützenschwingungen sind dann die virtuellen Fluidmassen zu den Stützenmassen zu addieren. Damit wird nach Abschnitt 4 der Effekt der Fluid-Struktur-Wechselwirkung näherungsweise erfaßt. Wenn jedoch die Stützenschwingungen als unabhängig voneinander betrachtet werden und jeweils nur eine Schwingungsform berücksichtigt wird, lassen sich die maximalen Stützenbeanspruchungen sehr einfach bestimmen. Sie betragen das Doppelte der quasi-statischen Beanspruchungen, die man für die oben berechneten fluiddynamischen Kräfte erhält. Mit anderen Worten, der Effekt der Fluid-Struktur-Wechselwirkung spielt in diesem Sonderfall keine Rolle.

Bei inkompressiblem Fluid kann zur Analyse das in [11] beschriebene Randintegral-Verfahren eingesetzt werden. Eine Diskretisierung ist hier nur für die Fluidränder notwendig. Bei den Stützen kann die Diskretisierung sogar auf deren Achsen beschränkt werden. Die fluiddynamischen Vorgänge können deswegen trotz der sehr komplizierten Geometrie als dreidimensionale Probleme behandelt werden. Beachtet man, daß die Fluid-Struktur-Wechselwirkung keine Rolle spielt, so ergeben sich weitere Vereinfachungen. Unter Inanspruchnahme dieser und einiger anderer Vereinfachungen wurden mit dem Randintegralverfahren inzwischen dreidimensionale Rechnungen zur Querkraftbeanspruchung der Stützen durchgeführt [15].

Bei kompressiblem Fluid wird der Rechenaufwand dagegen wesentlich größer. Hinzu kommt, daß in diesem Falle eine vollständige Erfassung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung unerlässlich ist. Die in der Bundesrepublik verfügbaren Programme erlauben deswegen entsprechende dreidimensionale Rechnungen nicht.

Gerade deswegen ist es besonders wichtig zu demonstrieren, daß die Vernachlässigung der Fluidkompressibilität und damit die darauf aufbauende dreidimensionale Rechnung zulässig ist. Neben den Argumenten in Abschnitt 3 und 4 wurden deswegen eine kompressible und eine inkompressible Rechnung für ein stark vereinfachtes Ersatzproblem durchgeführt [16]. Die Stützenachse wurde hierbei als Rotationsachse angenommen. Die Stützen nehmen dadurch die Gestalt von Ringen bzw. Kugeln an. Außerdem wurden nur die in Fig. 9 enthaltenen Stützen berücksichtigt. Zur Lösung des fluiddynamischen Problems wurde ein Differenzenverfahren benutzt. Es behandelt die Stützen als starre Gebilde. Bei der Berechnung der Stützensauslenkungen wurden die für typische Reaktoren geltenden Daten eingesetzt. Die

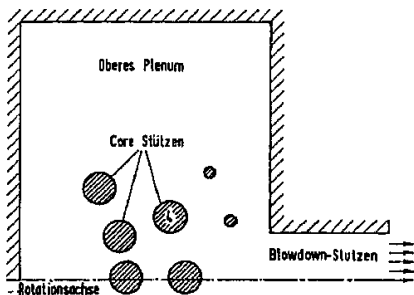


Fig. 9: Geometrie für das stark vereinfachte Ersatzproblem zur Beanspruchung der Core-Stützen

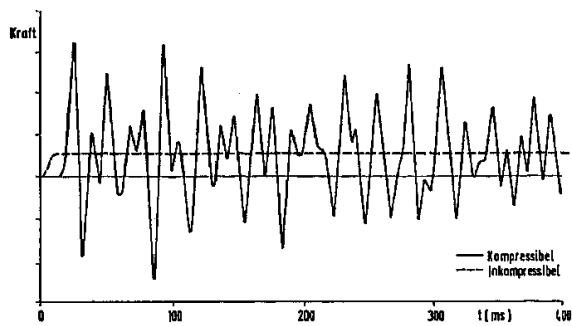


Fig. 10: Kraft an Stütze 4 als Funktion der Zeit t

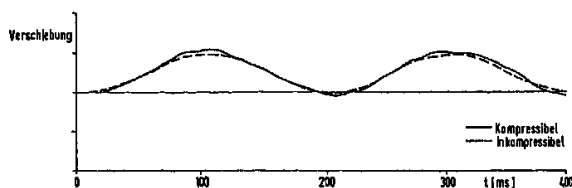


Fig. 11: Verschiebung von Stütze 4 als Funktion der Zeit t

Druckabsenkung am Blowdown-Stützen erfolgte in 1 ms. In Fig. 10 sind die für kompressibles und inkompressibles Fluid berechneten und an der Stütze 4 angreifenden Kräfte (in Richtung der Rotationsachse) einander gegenübergestellt. Die Unterschiede zwischen beiden Kurven sind erheblich. Der Mittelwert der kompressiblen Kraft stimmt jedoch (Abschnitt 3) mit der inkompressiblen Kraft überein. Die kompressible Kraft ändert allerdings ihr Vorzeichen, so daß die Erfüllung des Kriteriums in Kapitel 3 mangelhaft ist. In Fig. 11 sind die entsprechenden Stützenverschiebungen einander gegenübergestellt. Die Unterschiede zwischen beiden Kurven sind trotz des obigen Mangels gering. Bei den anderen Stützen sind die Ergebnisse ähnlich aus. Was die Stützenbeanspruchung des Ersatzproblems angeht, war also die Vernachlässigung der Fluid-Kompressibilität zulässig.

Zwar ist es denkbar, daß bei der tatsächlichen Geometrie die charakteristischen Wellenausbreitungszeiten etwas größer sind, vielleicht bis 12 ms. Da aber bei den hier diskutierten Blowdown-Störfällen gewisse plastische Verformungen zulässig sind und diese zu starken Erhöhungen der Schwingungsperioden führen, ist auch in diesen Fällen die Vernachlässigung der Fluidkompressibilität zulässig.

Zum Schluß noch einige Überlegungen etwas anderer Art zum selben Problemkreis. In Abschnitt 3 ist dargelegt, daß in Fällen, bei denen die Fluid-Kompressibilität vernachlässigbar ist, die erste durchlaufende Welle nicht zu den maximalen Beanspruchungen führt. Diese Aussage wurde anhand einiger Abschätzungen überprüft [17]. Um komplizierte Reflexions-Phänomene an den Stützen auszuschließen, wurde angenommen, daß insbesondere die Stützenmassen den durch sie verdrängten Fluidmassen entsprechen. Bei einer durch das obere Plenum laufenden Welle werden dann die Stützen so beschleunigt, als wäre an ihrer Stelle Fluid vorhanden. In Fig. 12 sind diese Geschwindigkeiten unmittelbar nach Eintreffen der Welle und für einige Zeitpunkte danach dargestellt. Man sieht, daß die Geschwindigkeit nicht nur mit der Entfernung von der Stützenmündung, sondern auch mit der Zeit sehr stark abfällt. Tatsächlich sind die Geschwindigkeiten der Stützen deutlich geringer, da ihre Massen erheblich größer sind als angenommen. Die Beanspruchung wird also deutlich überschätzt. Auf der Basis der Geschwindigkeitsverteilungen kann man die kinetischen Energien der Stützen nach dem

Wellendurchlauf leicht ausrechnen. Für die Stütze, die der Stützmündung am nächsten steht, ergibt sich ein Wert von etwa 400 Nm. Diese Energie wird beim Auslenken der Stütze in Verformungsenergie umgesetzt. Selbst wenn man die gesamte kinetische Energie einer Stütze in nur eine Schwingungsform überträgt, liegt das Maximum der Beanspruchung immer im elastischen Bereich. Tatsächlich verteilt sich die Energie auf mehrere Schwingungsformen. Da die zugehörigen Beanspruchungsmaxima nicht an derselben Stelle auftreten, ist das Maximum der Gesamtbeanspruchung geringer als zuvor angenommen.

Bei der zuvor zitierten inkompressiblen Rechnung [15] wurden maximale Beanspruchungen erzielt, die den elastischen Verformungsbereich ausschöpfen. Bei der zuletzt diskutierten Abschätzung für den ersten Wellendurchgang wurden zwar Beanspruchungen erzielt, die fast an diese Ergebnisse heranreichen. Wegen der zusätzlichen, stark konservativen Annahmen bei diesen Abschätzungen ist aber davon auszugehen, daß die tatsächlichen Beanspruchungen wesentlich niedriger liegen. Dies bedeutet, daß – wie erwartet – die maximale Beanspruchung nicht schon beim ersten Wellendurchgang, sondern erst zu einem späteren Zeitpunkt auftritt. Rechnungen, die sich auf den ersten Wellendurchgang beschränken, sind deswegen unzureichend.

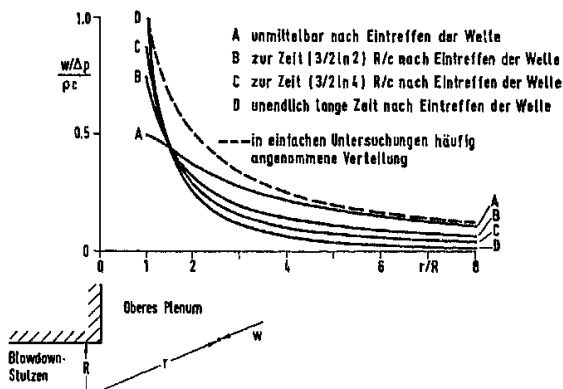


Fig. 12: Zur Geschwindigkeit w im oberen Plenum beim Wellendurchlauf. Δp Druckabfall im Blowdown-Stutzen, ρ mittlere Dichte, c mittlere Schallgeschwindigkeit

6. Schlußfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen führen zu einigen wichtigen Erweiterungen des Wissensstandes:

Die Fluid-Kompressibilität spielt bei der Blowdown-Beanspruchung der Reaktor-druckbehältereinbauten in vielen Fällen keine wesentliche Rolle. Diese Erkenntnis führt zu einer erheblichen Vereinfachung der theoretischen Modelle. Die positiven Folgen sind ein besseres Verständnis der relevanten Vorgänge und einfachere Computer-Programme zur Analyse dieser Vorgänge. Bei Vernachlässigung der Fluidkompressibilität läßt sich in vielen Fällen auch die Fluid-Struktur-Wechselwirkung auf einfachere Weise, zum Beispiel durch eine entkoppelte Rechnung unter Berücksichtigung virtueller Fluidmassen, beschreiben. Dies bedeutet eine weitere Vereinfachung der theoretischen Modelle.

Bei der Analyse der Kernmantelbeanspruchung können deshalb gegebenenfalls einfachere und damit schnellere Computer-Programme eingesetzt werden, oder es kann unter Ausnutzung dieser Vorteile der Aufwand zur Beschreibung der Geometrie und anderer Besonderheiten erhöht werden.

Bei der Analyse der Core-Stützen-Beanspruchung wird dagegen durch obige Vereinfachungen eine angemessene dreidimensionale Behandlung bei einem akzeptablen Rechenaufwand überhaupt erst ermöglicht. Ein geeignetes Programm, basierend auf einem Randintegralverfahren, ist verfügbar und wurde inzwischen auf das Problem angewandt.

Daneben gibt es Problembereiche, bei denen derartige Vereinfachungen nicht möglich sind. Wird etwa in solchen Fällen das Fluid als kompressibel behandelt, so läßt sich die Fluid-Struktur-Wechselwirkung mit Hilfe virtueller Fluidmassen im allgemeinen nicht zufriedenstellend beschreiben. Wäre aufgrund der Untersuchungen in Abschnitt 3 eine Vernachlässigung der Fluidkompressibilität möglich oder nahezu möglich gewesen, so tritt das Beanspruchungsmaximum nicht beim ersten Wellenausbreitungsvorgang auf. Die Analyse muß in diesem Falle ausreichend viele Wellenreflexionen umfassen. (Eingegangen am 23. April 1981)

Literatur

- [1] Belytschko, T., U. Schumann: Fluid Structure Interactions in Light Water Reactor Systems. Nucl. Eng. Des. 60 (1980) 173–195
- [2] Brosche, D.: Druckwellenausbreitungsvorgänge bei Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerken und ihre Behandlung im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren. Atomkernenergie/Kerntechnik 36 (1980) 145–147
- [3] Krieg, R.: Review of LOCA related mechanical Problems and Analysis Methods, in "Decade of Progress", American Society of Mechanical Engineers, im Druck
- [4] Krieg, R., E. G. Schlechtendahl, K.-H. Scholl: Design of the HDR Experimental Program on Blowdown Loadings and Dynamic Response of PWR Vessel Internals. Nucl. Eng. Des. 43 (1977) 419
- [5] Schlechtendahl, E. G.: Coupled Fluid-Structure Analysis for LWRs in the Federal Republic of Germany. Nucl. Safety 20 (1979) 551–563
- [6] Krieg, R., U. Schumann: Methoden zur Fluid- und Strukturdynamik bei der Analyse von Störfällen in LWR. Kernforschungszentrum Karlsruhe, 7. Jahreskolloquium PNS, 25. Nov. 1980, KfK 3070 (1981)
- [7] Schumann, U., et al.: Ergebnisse der ersten Blowdown-Versuche mit Kernmantel, Vergleich der Messungen mit Vorausrechnungen. Kernforschungszentrum Karlsruhe, 4. Statusbericht Projekt HDR, 10. Dez. 1980, PHDR-Arbeitsbericht 05.3/80, Kap. 7 (1980)
- [8] Bush, S. H.: Reliability of Piping in Light-Water-Reactors. Nucl. Safety 17 (1976)
- [9] Ayres, D. J.: Research for the Rationalization of Nuclear Power Plant Pipe Break Criteria. Nucl. Eng. Des. 59 (1980) 117–126
- [10] Schumann, U.: Principles of Fluid-Structure Interaction. ANS/ENS Int. Topical Meetg. Adv. in Math. Meth. for Nucl. Eng. Problems, München, April 27–29, 1981
- [11] Krieg, R., B. Göller, G. Hailfinger: Transient, Three-Dimensional Potential Flow Problems and Dynamic Response of the Surrounding Structures. Part I and II. J. Comp. Phys. 34 (1980) 139–183
- [12] Schumann, U.: Effektive Berechnung dreidimensionaler Fluid-Struktur-Wechselwirkung beim Kühlmittelverluststörfall eines Druckwasserreaktors – FLUX –. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2645 (1979)
- [13] Schumann, U.: Fluid-Struktur-Wechselwirkung des Kernmantels und der Brennstäbe beim Kühlmittelverluststörfall. Atomkernenergie/Kerntechnik 36 (1980) 305–310
- [14] Ludwig, A., R. Krieg: Dynamic Response of a Clamped/Ring-stiffened Circular Cylindrical Shell under Non-axisymmetric Loading. Nucl. Eng. Des. 43 (1977) 437–453
- [15] Krieg, R., B. Dolensky, A. Grando: unveröffentlicht
- [16] Knüppel, H., U. Schumann: unveröffentlicht
- [17] Krieg, R., B. Dolensky: unveröffentlicht