

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL VIBRATION ANALYSIS OF BWR PRESSURE VESSEL INTERNALS

(DAS SCHWINGUNGSVERHALTEN VON EINBAUTEN DER SWR-DRUCKGEFÄSSE ANHAND VON ANALYTISCHEN UND EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN)

N. KRUTZIK and O. SCHAD

Kraftwerk Union AG, Reaktortechnik, D-6000 Frankfurt am Main, Germany

SUMMARY

The components of a pressure vessel can be excited by dynamic forces through external loads or the operation of internal pumps, etc. The assurance of the correct functioning of these components is essential. This, however, necessitates complicated analytical as well as experimental analyses and checks.

This report attempts to evaluate the validity as well as quality of several analytical methods in the light of presently available experimental data for the internals of pressure vessels of boiling-water-reactor-types. The experimental checks were performed after the numerical analysis was completed and showed the accuracy of the numerical results. The analytical investigations were done by finite element programmes—2-dimensional as well as 3-dimensional, where the effect of the mass distribution with parts of virtual masses on the dynamic response could be studied in depth.

The experimental data were collected at various different plants and with different mass correlations. Besides of evaluating the dynamic characteristics of the components, tests were also performed to evaluate the vibrations of the pressure vessel relative to the main structure.

After analysing extensive recorded data much better understanding of the response under a variety of loading- and boundary conditions could be gained.

The comparison of the results of analytical studies with the experimental results made a broad qualitative evaluation possible.

1. EINLEITUNG

Die sicherheitstechnischen Anforderungen sind im Kernkraftwerksbau mit Abstand größer als im konventionellen Anlagenbau und werden aus verständlichen Gründen, eine weiter steigende Tendenz annehmen. Im Mittelpunkt dieser Forderungen stehen die Zuverlässigkeit und Funktionstüchtigkeit aller sicherheitstechnisch relevanten Systeme und Anlagenteile. Selbst beim Eintreten eines außergewöhnlichen, betriebsabhängigen Störfalles, sowie bei nicht auszuschließenden äußeren Einwirkungen (Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosion) darf die Sicherstellung der Anlage keine Frage sein.

Alle repräsentativen Belastungsfälle sind stochastischer und zeitlich veränderlicher Art. Ihre Auswirkungen können nur anhand dynamischer Berechnungen untersucht werden. Die Genauigkeit und Aussagekraft dieser Berechnungen ist bei derart komplizierten und in der Regel gekoppelt schwingenden Strukturen nicht nur von den zur Zeit vorhandenen exakten Lösungsverfahren und zuverlässigen Rechenanlagen abhängig, sondern in erster Reihe von der Güte der Erfassung aller beeinflussenden Faktoren und dem angewendeten mathematischen Rechenmodell. Diese Einflußgrößen getreu zu erfassen, bedarf weitgehender Parameterstudien und einschlägiger Erfahrungen. Zu den aus sicherheitstechnischen Gründen wichtigsten Strukturen eines Siedewasserreaktors gehören vor allem die für die ungestörte Arbeit, Steuerung, sowie für das gegebenenfalls notwendige Abfahren zuständige Einbauten des Reaktor Druckgefäßes. Um diese Strukturen rationell zu entwickeln und konstruktiv optimal auszulegen, muß in erster Linie ihr Eigenverhalten, welches für die dynamische Reaktion maßgebend ist, schon während der Phase der Vorauslegung bekannt sein. Nachträgliche konstruktive Änderungen und Verbesserungen sind hier kaum denkbar.

Durch umfangreiche theoretische und experimentelle Arbeiten wurden sowohl zuverlässige Verfahren, Rechenmodelle und spezielle Programme entwickelt, als auch der Einfluß verschiedener Parameter geklärt. Im folgenden Beitrag soll der jetzige Stand der Technik und die Erfahrungen der KWU auf diesem Gebiet kurz dargestellt werden.

2. CHARAKTERISIERUNG DER EINBAUTEN EINES SWR AUS SICHT IHRER SCHWINGUNGSFÄHIGKEITEN

Die Reaktor Druckgefäße samt ihren Einbauten stellen bezogen auf die nukleare Dampferzeugungsanlage (NDA) eines Siedewasserreaktors (SWR) integrierte, mit den übrigen Unterstrukturen gekoppelt schwingende Strukturen dar (Fig. 2-1). Sie gehören, von der konstruktiven Auslegung sowie von der Steifigkeit und Massenbelegung ausgehend, zu den schwingungsfähigsten Strukturen einer Kernkraftanlage. Obwohl das Reaktor Druckgefäß (RDG) selbst relativ steif ist, verhält es sich global gesehen wie ein tieffrequenter Einmassenschwinger. Die Ursache für dieses Verhalten ist systemspezifisch und rührt aus der Notwendigkeit her die stützenden Standzergen, die zwei Strukturen mit einer Temperaturdifferenz von ca. 300°C koppeln, so (dünnwandig) auszulegen, daß die hier zu erwartenden Temperaturspannungen gewisse Grenzen nicht überschreiten. Die abstützende Wirkung durch die im oberen Bereich angeschlossenen Rohrleitungen (Frischdampf- und Speisewasserleitungen) hat einen sekundären Einfluß auf das Verhalten des Reaktor Druckgefäßes. Da die Einbauten im Vergleich zum Reaktor Druckgefäß kleinere Massen darstellen und ihr Eigenverhalten durch das Verhalten des Reaktor Druckgefäßes mitbestimmt wird, ist die Behandlung dieser Strukturen untrennbar. In erster Linie wird das Eigenverhalten der Einbauten jedoch durch die Steifigkeit der Strukturen, die Randbedingungen sowie die Massenbelegung mit Eigenmasse, Wasserfüllung und virtuellen Massen bestimmt. Im folgenden soll auf die Schwingungseigenschaften einzelner An- und Einbauten der Reaktor Druckgefäße kurz eingegangen werden.

S t a n d z e r g e. Sie besteht aus einer dünnwandigen Zylinder oder Kegelschale (s. Fig. 2-2 und 2-3) mit einer Höhe von ca. 2 m und Wandstärke von ca. 30 bis 40 mm. Im oberen Bereich wird sie mit dem steifen Boden des Reaktor Druckgefäßes fest verbunden, am unteren Rand dagegen mit dem Unterstützungsbeton der NDA durch Ankerschrauben gekoppelt. Wegen der kleinen Massenbelegung der Schalen sind bei der vorhandenen Steifigkeit örtliche Schwingungsvorgänge nicht zu erwarten. Die Globalschwingungen dagegen werden durch die am oberen Ende der Standzarge angeschlossene Masse des gesamten Reaktor Druckgefäßes bestimmt.

D r u c k g e f ä ß e. Die Reaktor Druckgefäße sind als vertikale dickwandige, zylindrische Behälter, die Böden dagegen in Form von Halbkugeln oder Kugelabschnitten ausgebildet. Charakteristische Dimensionen sind: Durchmesser 4000 bis 6000 mm, Wandstärke 120 bis 150 mm, Höhe 20 bis 22 m. Im Bodenbereich sowie im Bereich des Deckels befinden sich entsprechende verstärkende Ringe. Durch den Boden ragt eine Reihe von Steuerstabtrieben hindurch. Diese pendelartig gestalteten Strukturen können wegen der kleinen Masse das Verhalten des Druckgefäßes kaum beeinflussen. Das Druckgefäß wird lediglich auf der Standzarge gestützt. Sein Gesamt-

gewicht mit Einbauten im betriebsbereiten Zustand beträgt ca. 1500 bis 2300 Mp. Ohne das Ergebnis der im weiteren durchgeführten Untersuchungen vorwegzunehmen, kann gesagt werden, daß, ausgehend von der Steifigkeit und Massenbelegung der Druckgefäße, örtliche Schalenschwingungen im tiefen Frequenzbereich nicht zu erwarten sind.

K e r n m a n t e l. Der in Form eines dünnwandigen Zylinders ausgeführte Kernmantel wird im unteren Bereich des RDG entweder auf zwei an der Wandung angebrachte Abdeckplatten oder direkt am Boden gestützt. Im zweiten Fall kommt eine zusätzliche Abstützung auf der Höhenlage der Abdeckplatte hinzu (Fig. 2-3). Die Abmessungen sind in etwa: Durchmesser, entsprechend dem Durchmesser des RDG (ca. 1000 mm kleiner), Wandstärke 35 bis 45 mm, Höhe 8 bis 10 m. Innerhalb des Kernmantels befinden sich zwei horizontal angeordnete Gitterplatten (oberes und unteres Kerngitter) in dem die Brennelemente geführt und gelagert werden. Im oberen Bereich setzt sich das schwingende System mit dem Kerndeckel, Kernstützsystem und Dampfabscheider fort. Unterhalb des unteren Kerngitters befindet sich auf den Führungsstützen aufgesetzt und im Kerngitter gelagert eine Reihe von Führungsrohren und Steuerstäben. Da der Kernmantel nur im unteren Bereich mit dem Druckgefäß verbunden ist, kleinere Steifigkeiten und größere Massenbelegung als das Druckgefäß hat, wird seine tiefste globale Frequenz unterhalb der des Druckgefäßes liegen. Ausgehend von der Steifigkeit der Schalensstrukturen des Kernmantels sowie der Massenbelegung (Konstruktions- und virtuelle Massen) sind hier örtliche Schalenschwingungen u.U. möglich (s. Ergebnisse Punkt 3).

D a m p f a b s c h e i d e r. Der Dampfabscheider bei der Bauart der RDG mit internem Umwälzsystem besteht aus einer Reihe von Zyklonrohren, die auf zwei Ebenen durch Querverstrebungen untereinander verbunden und am unteren Ende im Kerndeckel eingespannt sind. Jedes der Zyklonrohre hat die gleiche Steifigkeit und Massenbelegung. Das globale Verhalten eines jeden Zyklonrohres sowie das des gesamten verstreuten Systems ist weitgehend analog. Bei diesen Strukturen ist ein tieffrequentes Eigenverhalten zu erwarten. Obwohl die neue Bauart auch nachträglich bei KMW eingeführt wurde, beziehen sich die unter Punkt 4 und 5 beschriebenen Ergebnisse z.T. auch auf die ursprüngliche Ausführung des Dampfabscheiders KMW.

G l i t t e r p l a t t e n. Die Kerngitter sind in horizontaler Ebene als sehr steife Strukturen anzusehen. Durch Verbindung mit dem Kernmantel übernehmen sie eine stabilisierende und die Schwingungen in Umfangsrichtung unterdrückende Funktion. Das obere Gitterrost stellt für die Brennelemente ein Auflager dar. Es überträgt daher beim Schwingungsvorgang nur horizontalgerichtete Kräfte. Das Eigenverhalten des oberen Gitterrostes ist daher nur durch seine hohe Steifigkeit und die geringe Eigenmasse bestimmt. Sein Eigenverhalten ist in beiden Schwingungsebenen hochfrequent. Das untere Kerngitter ist als durchlochte von unten mit Rippen versteifte Platte ausgeführt. Obwohl seine Steifigkeit größer als die des oberen Gitterrostes, die schwingende Masse jedoch aus Eigenmasse sowie der Gesamtmasse der Brennelemente besteht, ist in der vertikalen Schwingungsebene relativ tieffrequentes Eigenverhalten zu erwarten.

B r e n n e l e m e n t e. Jedes Brennelement besteht aus 49 Brennstäben, die mittels Halterungen untereinander zu einem Bündel verbunden sind, sowie aus dem umhüllenden Brennelementkasten. Im unteren Bereich werden alle Brennstäbe als auch der umhüllende Kasten mittels strömungsrichtendem Formstück in eine Einheit zusammengefaßt. Das gleiche geschieht im oberen Bereich. Hier werden jedoch die Brennstäbe nicht nur wie unten geführt und gelagert, sondern durch Federkräfte an das untere Formstück angedrückt. Die Eigenfrequenzen der einzelnen Brennstäbe liegen dank der Querverbindung, trotz der kleinen Steifigkeit der einzelnen Brennstäbe im Bereich der mittleren Frequenzen (um den Faktor 2 bis 3 höher als die des RDG). Das gleiche betrifft den umhüllenden Kasten.

F ü h r u n g s r o h r e. Die Führungsrohre mit den Brennelementsteuerstäben sind als beidseitig gelagerte balkenartige Strukturen aufzufassen. Sie sind von der Steifigkeit und Massenbelegung ausgehend, ebenfalls als Strukturen deren Eigenfrequenzen im gleichen Bereich wie der Brennelemente liegen.

S t e u e r s t a b a n t r i e b e. Sind als pendelartig unterhalb des Druckgefäßbodens angeordnete, tieffrequente Strukturen anzusehen. Ihre Eigenfrequenzen liegen um den Faktor 2-3 unterhalb der tiefsten Frequenz des RDG.

U m w ä l z s y s t e m e. Das Kühlmittel wird je nach Reaktortyp entweder durch externe oder interne Umwälzpumpen befördert. Bei jedem dieser Prinzipien wird unterhalb der Gitterplatte ein Überdruck aufgebaut. Von hier aus strömt das Kühlmittel in etwa laminarem Zustand durch den Reaktorkern.

E x t e r n e U m w ä l z s y s t e m e. Der Aufbau des Druckes erfolgt durch zwei externe Radialpumpen (Fig. 2-2) die mittels entsprechend gestalteten Rohrleitungen im unteren Bereich an das Reaktordruckgefäß anschließen. Trotz der Entlastung der Eigenmasse

der Pumpe sind die rotierenden Massen des Antriebssystems als eine der wichtigsten betriebsbedingten Erregerquellen anzusehen. Bei Kavitation oder Veränderung der Zuflußbedingungen an den Strahlpumpen können auch im Bereich zwischen dem Kernmantel und Reaktordruckgefäß anregende Kräfte eingeleitet werden. Die Eigenfrequenzen der externen Umwälzsysteme liegen unterhalb der tiefsten Frequenz des RDG.

I n t e r n e U m w ä l z s y s t e m e. Hier erfolgt der Aufbau der Drücke durch mehrere im Ringraum zwischen Kernmantel und dem Druckgefäß angeordneten Axialpumpen (siehe Fig.2-3). Durch die Arbeit der Pumpen sowie der Antriebe selbst können ähnlich wie bei den Radialpumpen äußere Erregerkräfte eingeleitet werden. Des weiteren können im Bereich der Führungsrohre durch Queranströmungen und Wirbelbildung Erregerkräfte ausgelöst werden. Die Eigenfrequenzen liegen höher als bei den externen Systemen und oberhalb der tiefsten Eigenfrequenz des RDG.

3. UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSWAHL OPTIMALER MATHEMATISCHER RECHENMODELLE

Ausgehend von der rotationssymmetrischen Form des Reaktordruckgefäßes selbst sowie des Überwiegenden Anteils der Einbauten bestand kein Zweifel daran, daß man das globale Eigenverhalten mittels zweidimensionaler ebener, mathematischer Modelle oder mittels äquivalenter Feder-Massen-Systeme ausreichend exakt erfassen kann. Offen stand jedoch die Frage der (besonders bei zylinderartigen, dünnwandigen Schalen tief fallenden) lokalen Schwingungen, sowie das Schwingungsverhalten der zu untersuchenden Strukturen in Umfangsrichtung. Dieses Verhalten konnte nur anhand von zweidimensionalen - rotationssymmetrischen Element-Modellen mit Fourierentwicklung oder mittels von dreidimensionalen finiten Element-Modellen geklärt werden. Im folgenden wird auf diese, unter Anwendung der Programme MESY und STARDYNE, vorgenommenen Voruntersuchungen eingegangen.

3.1 Zweidimensionale Rechenmodelle

Die mittels eines zweidimensionalen F-E-Modells idealisierten Strukturen eines Druckgefäßes mit Einbauten sind in Fig.3-1 dargestellt. Hier wurden die untersuchten Strukturen (Standzarge, Druckgefäß, Kernmantel sowie die Gitterplatten) anhand von rotationssymmetrischen finiten Schalenelementen nachgebildet. Alle übrigen Strukturen wurden mittels Stabelementen äquivalenter Steifigkeit erfaßt. Die Massenbelegung der mit Schalenelementen idealisierten Strukturen ist getreu wiedergegeben. Bei den übrigen Strukturen wird sie mittels diskreter Massen repräsentiert. Aus Tabelle I sowie Fig.3-3 und 3-4 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu entnehmen.

3.2 Dreidimensionale Rechenmodelle

Zu einem anderen Zeitpunkt als die unter Punkt 3.1 beschriebenen Untersuchungen wurden Berechnungen anhand von dreidimensionalen finite-Element-Modellen durchgeführt. Hier hat man die analogen Strukturen über Platten und Stab-Elementen getreu nachgebildet. Die idealisierten Strukturen sind in Fig.3-2 dargestellt. Die Massen der Schalenstrukturen wurden als diskrete Massen in den Knotenpunkten angesetzt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind aus Tab.I sowie Fig.3-5 zu entnehmen.

3.3 Wertung der Ergebnisse und Ableitung eines äquivalenten Feder-Massen-Systems

Die mittels der zwei- und dreidimensionalen Modelle durchgeführten Untersuchungen führten zu qualitativ und quantitativ vergleichbaren Ergebnissen. Sowohl die Zahlenwerte der Eigenfrequenzen Tab.I, als auch die Eigenformen stimmten relativ gut überein (vgl. Fig.3-4 u.3-5) Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

- die anhand von beiden Modellen gewonnenen Eigenfrequenzen der globalen und lokalen Schwingungsformen sind vergleichbar
- die beim RDG zu erwartenden lokalen Eigenfrequenzen als auch die höheren harmonischen liegen viel höher als die Erregerfrequenzen der zu erwartenden Belastungen
- die analogen Eigenfrequenzen für den Kernmantel liegen zwar tiefer, jedoch auch noch außerhalb des Frequenzbereiches der Erregerfunktionen.

Da die zu untersuchenden Strukturen den Bedingungen doppelter geometrischer Symmetrie als auch der Symmetrie in der Massenverteilung genügen und die lokalen Schwingungen in Meridian als auch in Umfangsrichtung im uninteressanten Bereich liegen, kann eine Idealisierung der Struktur mittels eines äquivalenten Feder-Massen-Systems vorgenommen werden. Wie sich weiter ergeben wird (siehe Punkt 4) gelangt man anhand eines derartigen Modells zu analogen Ergebnissen wie bei einer zwei- oder dreidimensionalen Idea-

llisierung. Das Ergebnis der Eigenwertbestimmung mittels eines äquivalenten Feder-Massen-Systems ist jedoch stark von der Sorgfalt, mit der die in die Berechnung eingehenden Ersatzsteifigkeiten (Trägheitsmomente, Schubflächen) und Massen ermittelt wurden, sowie von der Art der Massendiskretisierung abhängig. Wenn man bei geschlossenen-formstifen, zylinder- oder kastenartigen Strukturen, unter Umständen von den konstruktiven Abmessungen ausgehend, halbwegs vernünftige Ersatzsteifigkeiten ableiten kann, so ist das im Falle aller anderen rotationssymmetrischen (Kugel, Kegel, Torus) Schalenstrukturen oder bei zusammengesetzten Strukturen dieser Art nicht denkbar.

Hier kann man zu zuverlässigen äquivalenten Steifigkeiten nur anhand einer vorherigen Schalenberechnung gelangen. Bei nicht rotationssymmetrischen Schalenstrukturen ist dabei eine dreidimensionale Idealisierung unumgänglich. Bezogen auf das untersuchte System war eine derartige Ableitung für die Standzarge (Kegel mit Öffnung) sowie die zylinderartigen Stützsegmente des Kernmantels notwendig. Durch Belastungen mit Einheitskräften wurden im ersten Schritt die Translationen und Rotationen der Struktur ermittelt. Ausgehend von diesen wurden die gemittelten Verschiebungen und Verdrehungen der in einer Schnittebene liegenden Knotenpunkte auf verschiedene Höhenlagen wie folgt ermittelt [8]:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{i,j}}{n}$$

$$\bar{\varphi}_i = \frac{\sum_{j=1}^n z_{i,j} \cdot \text{SIGN}(k_{i,j})}{\sum_{j=1}^n \text{ABS}(k_{i,j})}$$

wobei

- x - horizontale Translation in Belastungsrichtung
- z - vertikale Translation
- k - Koordinate des laufenden Punktes
- i - Index des betrachtenden Querschnitts
- j - Index des laufenden Punktes im betrachteten Querschnitt
- n - Anzahl der Knotenpunkte pro Querschnitt
- $\bar{\varphi}_i$ - gemittelte Rotation des i-ten Querschnitts

Die so ermittelten Translationen und Rotationen werden dem äquivalenten Stabelement (deren Querschnittsfläche vor u. nach der Verformung eben bleibt) zugeordnet. Die weitere Umrechnung und Ermittlung der äquivalenten Trägheitsmomente und Schubflächen erfolgt in Anlehnung an bekannte Formeln der Starrkörperstatistik.

4. ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Idealisierungen

Die in der dynamischen Berechnung von RDG-Einbauten gegenwärtig angewandten Idealisierungen wurden durch die unter Punkt 3 beschriebenen Untersuchungen bestimmt. Entsprechend dieser Erkenntnisse kann das Eigenverhalten eines typischen SWR-Druckgefäßes mittels speziell abgeleiteter äquivalenter Feder-Massen-Systeme mit ausreichender Genauigkeit für die Praxis erfaßt werden. Zwei typische Modelle für die RDG mit internem und externem Umwälzsystem sind in Fig. 4-1 und 4-2 dargestellt [5, 13, 14]. Die Strukturen des RDG sowie deren Einbauten werden hier mittels von diskreten Punktmassen sowie Elementen äquivalenter Steifigkeit idealisiert. Die angesetzte Federsteifigkeit für die Standzarge wurde ausgehend von einem dreidimensionalen Modell abgeleitet. Die

Federsteifigkeiten sowie Massenbelegung für die übrige Struktur wurden ausgehend von den geometrischen Abmessungen auf manuellem Wege abgeleitet [6].

4.2 Variable Parameter

Bei den Untersuchungen des Eigenverhaltens mittels der in Fig. 4-1 und 4-2 dargestellten mathematischen Rechenmodelle wurden zwecks Feststellung des Einflusses einiger veränderlichen oder nicht eindeutig erfassbaren Größen, Parameterstudien durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studien, die für Druckgefäße mit internen Umwälzsystemen durchgeführt wurden, sollen im folgenden zusammengefaßt werden.

S t ö t z w i r k u n g. In erster Linie wurde untersucht, ob bei Vernachlässigung der stabilisierenden Wirkung des RDG durch die angeschlossenen Frisch- und Speisewasserleitungen das Eigenverhalten beeinflußt wird. Analoge Betrachtungen wurden in Bezug auf die den Kernmantel stabilisierenden Kernsprühzuführungsrohre durchgeführt. Untersucht wurde ebenfalls der Einfluß der eventuellen Nachgiebigkeit der die Standzarge mit dem Unterstützungsbeton verbindenden Ankerschrauben sowie des Unterstützungsbetons selbst (siehe Tab. II).

R a n d b e d i n g u n g e n. Die Randbedingungen einiger Einbauten in den Kopplungsstellen mit den übrigen Strukturen sind nicht eindeutig definierbar. Sie variieren zwischen den Fällen Einspannung und Auflagerung. Durch Annahme von Grenzfällen wurde der Einfluß der Randbedingungen untersucht (siehe Tab. II).

M a s s e n b e l e g u n g. Die Massenbelegung mit Anteilen der Konstruktionsmassen ergibt sich aus den Volumina der entsprechenden Bereiche sowie der Dichte des Materials. Analog wurden die Anteile des füllenden Mediums bestimmt. Die Anteile der virtuellen Massen für die im flüssigen Medium schwingenden Teile wurde durch Variation der Massenbelegung für zwei Temperaturzustände ermittelt und in der Berechnung berücksichtigt, und zwar für den:

- kalten Zustand ($I = \text{ca. } 40^\circ\text{C}, \gamma = 1,0$)
- Betriebszustand ($I = \text{ca. } 286^\circ\text{C}, \gamma = 0,7$)

Die virtuellen Massen werden ausgehend von der gesamten Energie der durch den Schwingungsvorgang bewegten Masse des flüssigen Mediums abgeleitet [11]. Unter Einbeziehung der notwendigen, vereinfachenden Annahmen (zum Medium, schwingendem Körper und zum eingeschränkten Raum des schwingenden Körpers), kann man zu gebräuchlichen Formeln gelangen, anhand deren die virtuellen Massen abgeschätzt werden können. Für einen rotationssymmetrischen Körper z.B., der konzentrisch in einem starren Behälter schwingt, gelten folgende Beziehungen:

$$M^* = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma$$

mit

$$\alpha = \frac{\left(\frac{R}{r}\right)^2 + 1}{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1}$$

und

$$\beta = 1 - \frac{\tanh \frac{L}{r}}{\frac{L}{r}}$$

wobei

- r - Außenradius des schwingenden Körpers
- R - Innenmaß des mit Flüssigkeit gefüllten Körpers
- L - Länge des Körpers
- γ - Spezifisches Gewicht der Flüssigkeit

4.3 Einfluß der Kopplung mit den Gebäudestrukturen

Es ist bekannt, daß bei Kopplungen von mehreren schwingungsfähigen Strukturen mit verschiedenen Massen, eine Beeinflussung des Eigenverhaltens nur dann zu erwarten ist, wenn die Eigenfrequenzen dieser Strukturen in benachbarten Bereich liegen. Da die Eigenfrequenzen sowohl der Reaktorgebäude [12] als auch der nuklearen Dampferzeugungsanlagen [7, 17] im Vergleich zu den Eigenfrequenzen des RDG viel tiefer liegen, ist eine Wechselwirkung nicht zu erwarten. Bei Schwingungsuntersuchungen von Einbauten des RDG können daher die Strukturen der NDA sowie des Gebäudes unberücksichtigt bleiben. Der Einfluß dieser Vereinfachung wurde am Beispiel des in Fig. 4-3 dargestellten Gesamtmodells untersucht. Die in Tab. II zusammengestellten Ergebnisse bestätigen diese Aussage.

4.4 Ergebnisse

Die Berechnungen wurden mittels des Finiten Element-Verfahrens unter Anwendung zuverlässiger und allgemein bekannter Programmsysteme durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen zum Eigenverhalten der zwei typischen Druckgefäße eines Siedewasserreaktors sind in Tab. II und III zusammengestellt. Die Einschwingungsformen wurden am Beispiel eines typischen RDG mit internem Umwälzsystem in Fig. 4-4 und 4-5 dargestellt. Diese Eigenformen beziehen sich auf die Massenbelegung mit Konstruktionsmassen, Flüssigkeitsfüllung und virtuellen Massen. Die Schwingungsformen für die weiteren in Tab. II zusammengestellten Massenkonfigurationen sind vergleichbar (siehe auch [5, 13, 14]).

5. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Während einer Reihe von Inbetriebnahmetests an verschiedenen Reaktor-Druckgefäßen sowohl mit externen als auch internen Umwälzsystemen wurden nicht-nukleare Vibrationstests durchgeführt [2, 4, 10, 15, 16, 18]. Zweck dieser Untersuchungen war es, das Eigenverhalten sowie die Funktionssicherheit der Einbauten bei verschiedenen Betriebszuständen auf experimentellem Wege zu ermitteln. Ausgangspunkt für die Planung dieser Versuche sind jeweils die analytischen Vorausberechnungen. Sie liefern Angaben sowohl zum Frequenzbereich und Amplituden der gemessenen Größe als auch zur optimalen Auswahl und Anordnung der Meßgeber. Jede experimentelle Untersuchung endete mit einer Gegenüberstellung der ermittelten und vorausberechneten Größen, sowie einer Aussage bezüglich der Bestätigung der vorausberechneten Größen.

5.1 Versuchsbedingungen

Die bisher durchgeführten Vibrationstests können im allgemeinen in zwei Gruppen eingestuft werden und zwar in:

- Kalttests und
- Heißtests

wobei die Versuche im kalten Zustand auch dann erfolgten, wenn ausschließlich ein Versuch mit aufgeheizten Reaktor-Druckgefäßen (Heißtests) geplant waren. Die Heißtests erfolgen dabei bei komplett montiertem und geschlossenem Druckgefäß, die Kalttests dagegen wurden für offene und geschlossene RDG als auch für verschiedene Massenkonstellationen (ohne und mit beladenem Kern) durchgeführt. Entsprechend dem jeweiligen Versuchszustand werden die Vibrationstests bis zu 100 % Umwälzleistung (geschlossene RDG) oder nur bis ca. 75 % (offene RDG) in mehreren Stufen durchgeführt.

5.2 Aufnahme und Auswertung der Meßgrößen

Aus technischen Gründen ist es nicht möglich, Frequenzen und Amplituden im geschlossenen und gefüllten RDG direkt zu messen. Der zur Zeit optimale Weg führt über die Aufnahme von Beschleunigungen der charakteristischen durch die Vorausberechnungen festgelegten Bereiche der untersuchten Strukturen. Während der durchgeführten Versuche wurden die Meßsignale mittels von entsprechend empfindlichen, für den Meßort ausgewählten Beschleunigungsaufnehmern sowohl auf Direktschelben als auch auf Magnetbändern registriert. Die auf Magnetbänder registrierten Daten wurden mittels Frequenzanalytoren sowie durch doppelte Integration ausgewertet. Da das erste Verfahren eigentlich nur exakte Angaben zum Frequenzinhalt, nicht aber zur Schwingungsamplitude liefert, das zweite dagegen den Bewegungsablauf wiedergibt, aus dem die Frequenzen nicht immer eindeutig feststellbar sind, war es oft notwendig, die Auswertung mittels beider Verfahren durchzuführen.

5.4 Meßergebnisse

Die durch die experimentellen Untersuchungen ermittelten Eigenfrequenzen und Schwingungsformen für die Einbauten von jeweils einem Druckgefäß mit ext. u. int. Umwälzsystem sind in Tab. IV zusammengestellt. Diese Eigenfrequenzen und -Formen beziehen sich nicht auf die bei den Versuchsbedingungen herrschenden Betriebszustände, sondern auf die nach jeder Versuchsphase folgenden Ausschwingvorgänge bei denen **allein das Eigenverhalten** zum Vorschein kommt. Die der Grundschiwingung sowie der Oberschiwingung entsprechenden Auslenkungen der Massenpunkte des gekoppelten Systems ergaben ein momentanes Bild der Verformung des Systems bzw. deren relativen Lage. In Fig. 5-1 sind einige typische gemessene Schwingungsformen dargestellt.

Owohl die Hauptelemente der Einbauten (unterer und oberer Kernmantel) rotationssymmetrische Gebilde sind und daher in jeder beliebigen Ebene dieselbe Steifigkeit haben, kann das gesamte gekoppelte Massensystem im bestimmten Moment nur in einer dieser Ebenen schwingen.

Anhand der durch Messung ermittelten Amplituden in zwei unter 90° zueinander orientierten Ebenen ist es möglich, die resultierende Schwingungsamplitude sowie deren Ebene in Bezug auf die Achsen zu bestimmen. Eleganter kann man die Richtung der resultierenden Ebene sowie die Größe der Amplitude bestimmen, indem man die Wegsignale elektrisch addiert. Am Bildschirm des Oszilloskopes kann man die Lage der Ebene der resultierenden Schwingung direkt bestimmen. Sie ist durch die größere Achse der Ellipse festgelegt. In Fig. 5-2 wurden einige vom Bildschirm fotografierten Schwingungstrajektorien (Ortskurven) für den Kernmantel des RDG-KW dargestellt. Unterbricht man die Verfolgung des Weges der resultierenden Auslenkungen schon nach kurzer Zeit (siehe Fig. 5-2d), so kann u. U. auch ein detailliertes Bild des Bewegungsablaufes festgehalten werden.

6. GEGENÜBERSTELLUNG DER ANALYTISCHEN UND EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE

Anhand der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist es möglich, die Schwingungsparameter quantitativ und qualitativ zu ermitteln. Die Ergebnisse basieren auf einem (mehrere Versuchsreihen mit Simulation verschiedener Betriebszustände wurden durchgeführt) breiten statistischen Material. Durch zusätzliche Aufnahme der Ergebnisse auf Magnetband war jeweils eine nachträgliche Auswertung nach verschiedenen Gesichtspunkten und Kombinationen der Meßsignale möglich. So konnten durch parallele Aufzeichnungen aller in einer Schwingungsebene liegenden Meßwertaufnehmer die Schwingungsformen in beliebiger Ebene zu jedem Zeitpunkt aufgezeichnet werden. In Fig. 5-1 wurden am Beispiel des Kernmantels eines RDG mit externem Umwälzsystem die analytisch und experimentell ermittelten Ergebnisse gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, daß die Schwingungsformen qualitativ sehr gut übereinstimmen. Die Eigenfrequenzen der betreffenden Modes weichen zwar ca. 10 - 20 % ab, liegen jedoch im Bereich der mittels der drei Verfahren ermittelten Zahlenwerte.

7. DAS VERHALTEN DER EINBAUTEN BEI TRANSIENTEN BELASTUNGSZUSTÄNDEN

Von ausschlaggebender Bedeutung für die Funktionssicherheit der Einbauten ist ihr Verhalten bei den folgenden maßgebenden Belastungszuständen:

- Betriebsbelastungen
- Störfallbedingte Belastungen (Rohrleitungsbruch u. dgl.)
- Äußere Einwirkungen (Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosion)

Die Relativverformungen und demzufolge oft auch die Beanspruchungen erreichen bei diesen Belastungszuständen ihre Maximalwerte. Die Lastfunktionen für die drei o.g. Lastfälle wurden in Tabelle V definiert. In Fig. 7-1 bis 7-3 sind über der Zeitachse parallel die Zeitverläufe der Relativverformungen des Druckgefäßes und charakteristischer Bereiche der Einbauten dargestellt. Die Zahlenwerte der Relativverformungen sind in Tab. VI zusammengestellt.

Anhand der Ergebnisse ist festzustellen, daß die maximale Belastung die Lastfälle Erdbeben und Rohrleitungsbruch darstellen.

8. AUSSAGEKRAFT

Wie schon angedeutet, ist das Eigenverhalten einiger Einbauten von einer Reihe nicht eindeutig erfaßbaren Faktoren abhängig. Zu ihnen gehören in erster Linie:

- die Stützwirkung der angeschlossenen Systeme (Frisch- und Spelwasserleitungen beim RDG, Kernsprühdüsenleitung beim Kernmantel u.dgl.), die Stützwirkung ist in jeder Richtung verschieden
- die Randbedingungen für die in den Kernglittern "eingefädelten" Elemente (Führungsrohre, Steuerstäbe, Brennelemente)
- Massenbelegung der im Medium schwingenden Teile mit Anteilen der virtuellen Massen
- Veränderung der virtuellen Massen und des dämpfenden Einflusses des Mediums bei veränderlicher Dichte des Mediums.

Wie aus dem Vergleich, der auf analytischen und experimentellen Wegen ermittelten Eigenfrequenzen und Schwingungsformen zu erkennen ist, kann man dennoch, ausgehend von einer Idealisierung des RDG und der Einbauten mittels eines äquivalenten Feder-Massen-Systems zu zuverlässigen Aussagen gelangen.

Eine dynamische Untersuchung unter Anwendung 2- und 3-dimensionaler Rechenmodelle führt zwar zu umfangreicheren Aufschlüssen über das Verhalten der Strukturen im höheren Frequenzbereich. Diese Informationen sind jedoch im Bezug auf den Frequenzinhalt der zu erwartenden relevanten Lastfunktionen von sekundärer Bedeutung.

Auch wenn aus Gründen der Unsymmetrie, der konstruktiven Gestaltung oder Massenbelegung eine räumliche Idealisierung notwendig erscheint, ist es immer von Vorteil für die Phase der Ermittlung des Eigenverhaltens und der zeitlich veränderlichen Zustandsgrößen äquivalente Feder-Massen-Systeme anzuwenden. Der hiermit verbundene Aufwand ist gering, die Ersparnisse an Rechenzeit dagegen sehr bedeutend.

In Anbetracht der Unsicherheiten die einige Eingangsdaten, Fertigungstoleranzen und Randbedingungen mit sich bringen, ist die Anwendung von äquivalenten Feder-Massen-Systemen zweckmäßig.

Ihre Aussagekraft ist auch für kompliziert gestaltete, formstiefe Schalenstrukturen ausreichend, wenn nur die angewandten Eigenschaften der äquivalenten, mathematischen Modelle mit genügender Sorgfalt abgeleitet wurden.

In Anbetracht der Unsicherheiten die einige Eingangsdaten, Randbedingungen und die Veränderung der zustandsabhängigen Eigenschaften des kühlenden Mediums mit sich bringen, ist bei dynamischen Untersuchungen der Einbauten eines RDG die Anwendung entsprechend abgeleiteter, äquivalenter Feder-Massen-Systeme zweckmäßiger als aufwendiger räumlicher Rechenmodelle.

Die durchgeführten Untersuchungen führen zu der Feststellung, daß ihre Aussagekraft selbst bei kompliziert gestalteten jedoch formstifen Schalenstrukturen ausreichend ist, wenn nur sowohl das mathematische Modell als auch die angewandten äquivalenten Eigenschaften mit genügender Sorgfalt abgeleitet wurden.

REFERENZEN

- [1] Bligg, J.M. "Introduction to Structural Dynamics", Mc. Graw Hill Book Comp. Inc. 1964
- [2] Colhan, "Vibrationmessungen an den Druckgefäß-Einbauten des Kernkraftwerks Lingen", Technischer Bericht AEG-E3-880 Dezember 1967
- [3] Hartly, W.C., "Rubinstein M.F. Dynamics of Structures", Prentice Hall 1964.
- [4] Höttl, A., Brunschwic "Schwingungsmessungen an den Einbauten und an Einbauten und an einer Umwälzschleife des KRB-Reaktors Gundremmingen", Technischer Bericht AEG-E3-652, März 1967
- [5] Krutzik, N., "Das dynamische Verhalten der Einbauten des Druckgefäßes KWV, Teil I Berechnungsergebnisse, Teil II Versuchsergebnisse", Technischer Bericht AEG-E3-2057, Januar 1972
- [6] Krutzik, N., "Modell des Druckgefäßes KKP für die dynamische Berechnung mit den Programmen ASKA-SYNAN und STARDYNE" Technischer Bericht AEG-E3-2883, Februar 1972
- [7] Krutzik, N., Lauren, H., Nowotny, B., "Dynamische Berechnungen der Anlage KKP 1, Teil I bis III" Technischer Bericht AEG-E3-2384, September 1972
- [8] Lauren, H., Krutzik, N., Nowotny, B., "Ableitung eines Lumped Mass Modells aus einem 3-dimensionalen Finite-Element-Modell" Technischer Bericht KWU-E3-2354, Juli 1973
- [9] Melchior, Domes, Debus, "Auswertung der Schwingungsmessungen an einer KKP Serien-Axialpumpe" Technischer Bericht KWU-R5-2914, Februar 1974
- [10] Nagel "Schwingungsmessungen an den Einbauten und an einer Umwälzschleife des Kernreaktors Lingen", Technischer Bericht AEG-E3-1245, März 1969
- [11] Nielsen, J.N., "Missile Aerodynamics", Mc.Graw Hill Book Company, New York 1960
- [12] Riehl, U., Krutzik, N., "Dynamische Berechnungen von Hauptstrukturen der Anlage KKP 1, 1.Reaktorgebäude, Technischer Bericht KWU-R2-2818, Dezember 1973
- [13] Schoor, H., Krutzik, N., "Das Schwingungsverhalten der Einbauten des Druckgefäßes KKB", Technischer Bericht KWU-E3-2733 Juli 1973
- [14] Schoor, H., Krutzik, N., "Das Schwingungsverhalten der Einbauten des Druckgefäßes KKP 1", Technischer Bericht KWU-E3-2732 September 1973

- [15] Schoor, H., Krutzik, M., "Das Schwingungsverhalten der Steuerstabantriebe des Druckgefäßes VAK", Technischer Bericht AEG-E3-2537, März 1973
- [16] Tokarski, K., "KKB-Kalt- und Heißtest, Versuchsergebnisse und Beurteilung der Meßergebnisse an den RDB-Einbauten" Technischer Bericht KWU-R2-3282, Januar 1975
- [17] Vac, Z., Krutzik, M., "Dynamische Berechnungen des Sicherheitsbehälters KKP 1", Technischer Bericht KWU-E3-2820, Okt. 1973
- [18] Winkler, "Heißdampfreaktor Kahl-Vibtest und Auswertungsbericht", Technischer Bericht AEG-E3- Februar 1970
- [19] Zienkiewicz, O.C., "Finite Element Procedures in Solution of Plate and Shell Problems" John Wiley & Sons Ltd. London 1965
- [20] EDAC "Dynamic Seismic Analys of the Reaktor Pressure Vessel and Internals for the Nuclear Power Plant" Technical Report No. EDAC-101.05, Engineering Decision Analysis Company Inc. 1975
- [21] Herm, "KKB-Kalttest, Schwingungsmessungen an den Zwangsumlaufpumpen" Technischer Bericht KWU-R2-3280, Januar 1975

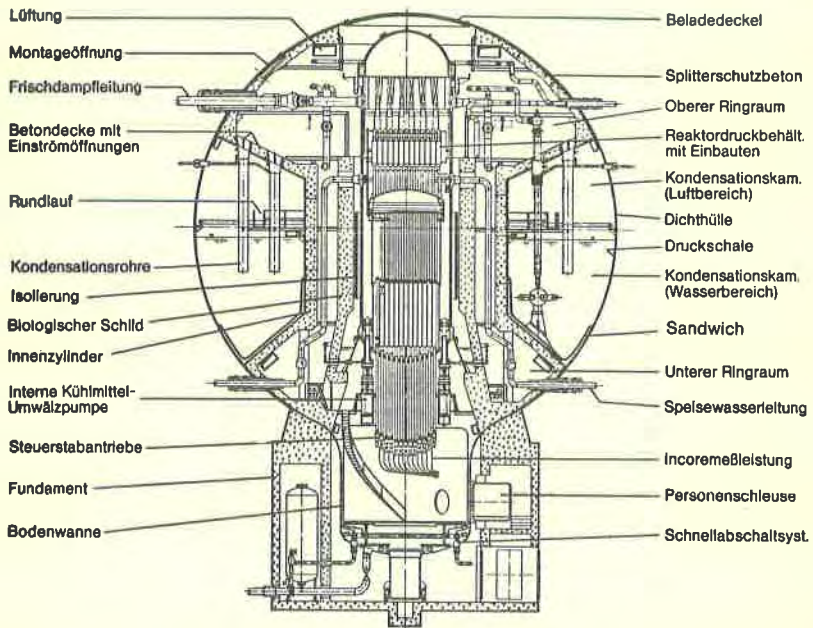


Fig. 2-1 Nukleare Dampferzeugungsanlage eines SWR

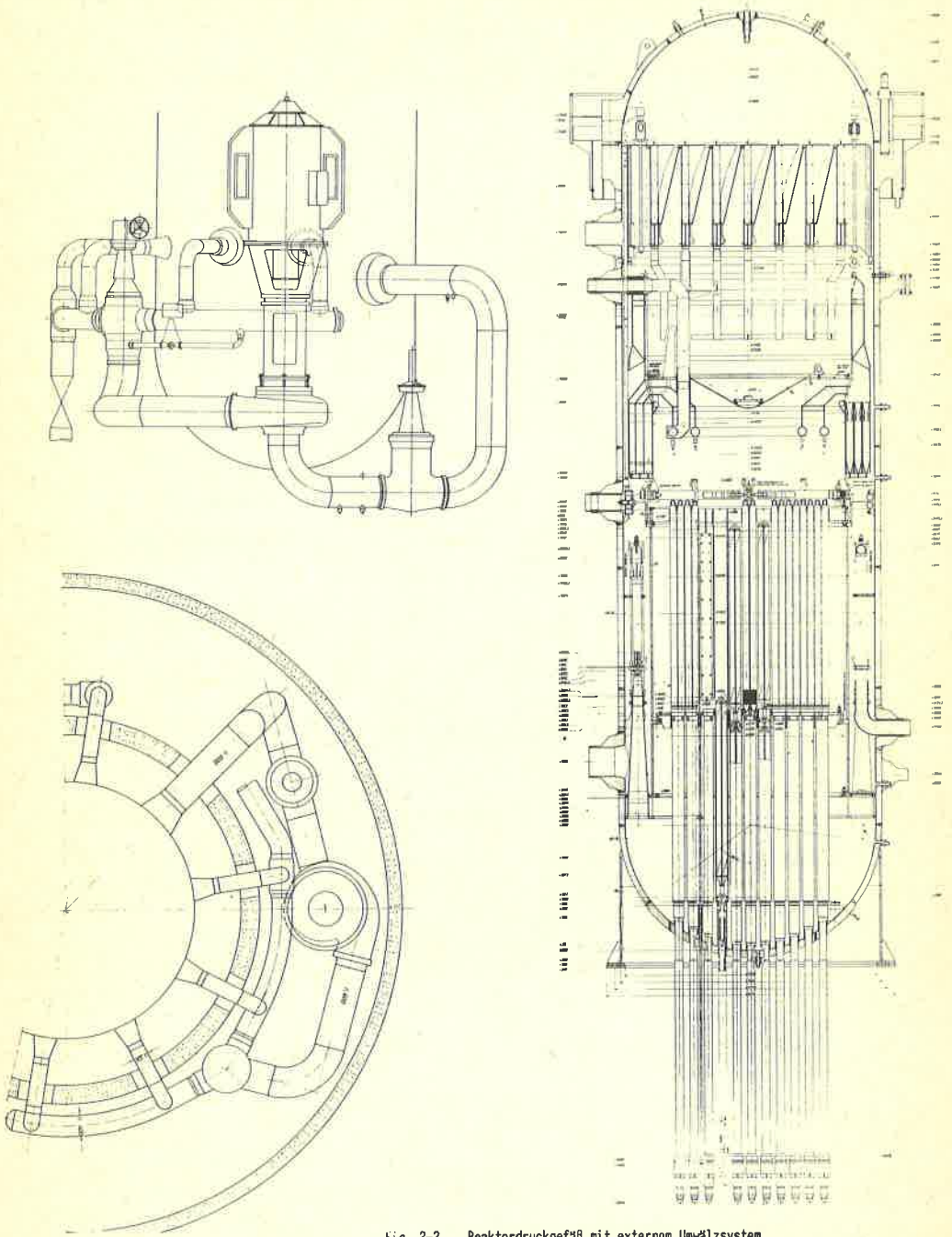


Fig. 2-2 Reaktordruckgefäß mit externem Umwälzsystem

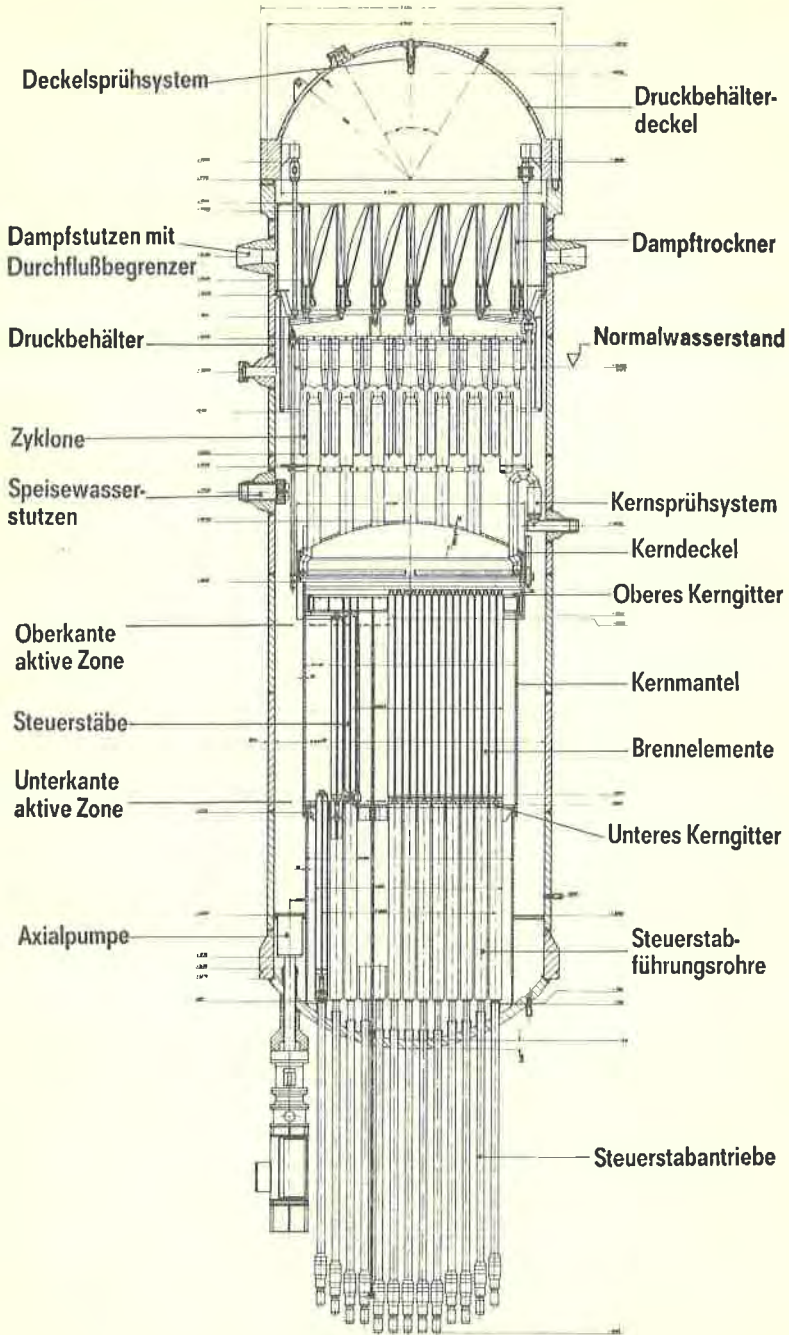


Fig. 2-3 Reaktor Druckgefäß mit internem Umwälzsystem

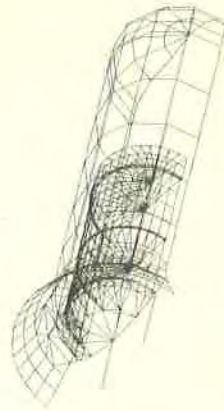
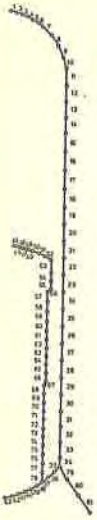


Fig. 3-2 Idealisierung der Strukturen und der Einbauten mittels 3-dimensionaler F-E Modelle

Fig. 3-1 Idealisierung der Strukturen und der Einbauten mittels 3-dimensionaler F-E Modelle

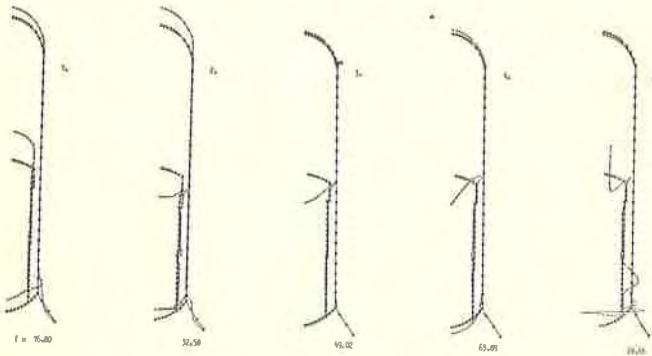


Fig. 3-3 Eigenformen bei 2-dimensionaler Idealisierung (0.H)

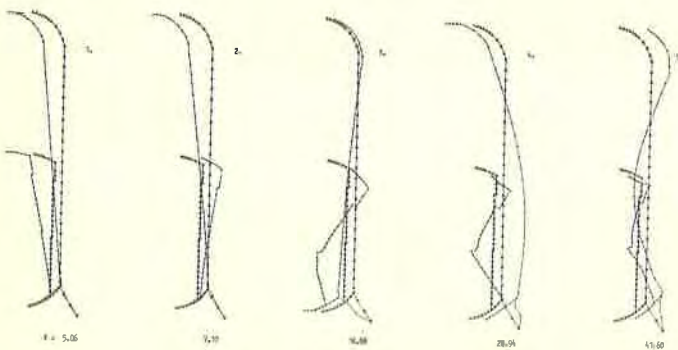


Fig. 3-4 Eigenformen bei 2-dimensionaler Idealisierung (1.H)

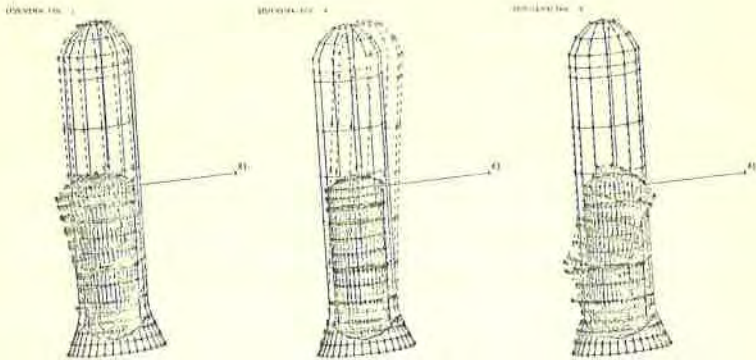


Fig. 3-5 Eigenformen bei 3-dimensionaler Idealisierung

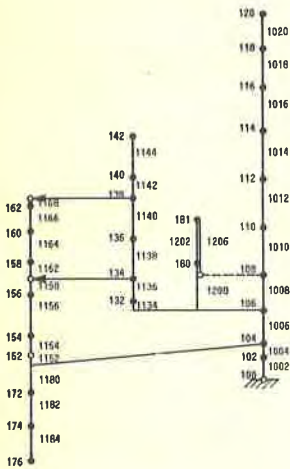


Fig. 4-1 Äquivalentes Feder-Massen-System (RDG mit ext. Umwälzsystem)

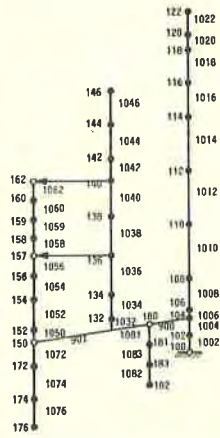


Fig. 4-2 Äquivalentes Feder-Massen-System (RDG mit int. Umwälzsystem)

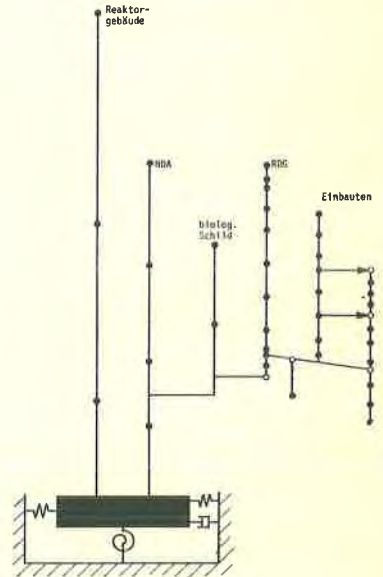
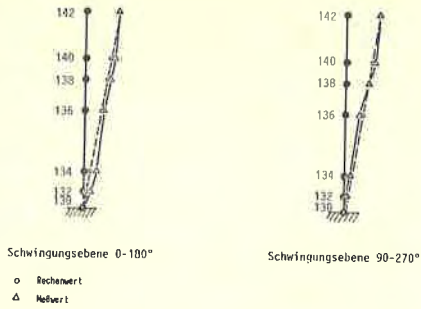


Fig. 4-3 Gekoppeltes Massensystem

1. Eigenform



2. Eigenform

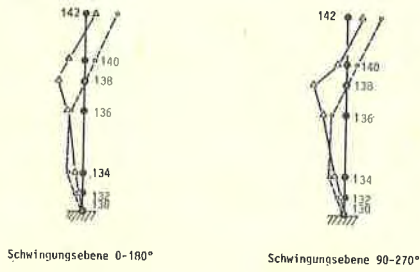


Fig. 5-1 Gegenüberstellen der ermittelten Schwingungsformen (Kernmantel KMW)

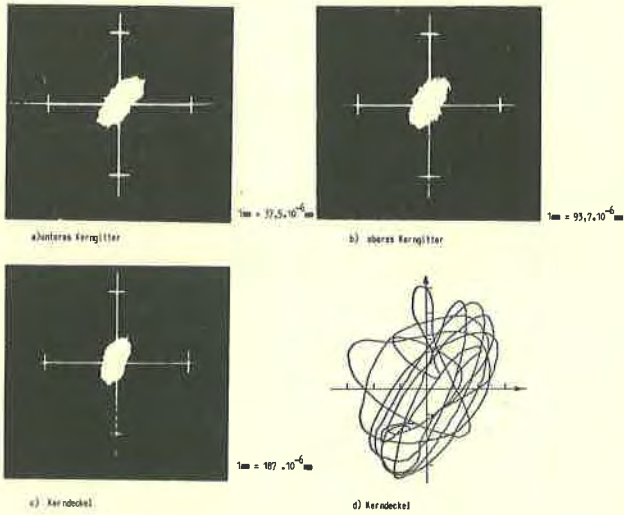


Fig. 5-2 Ortskurven für den Kernmantel (KMW)

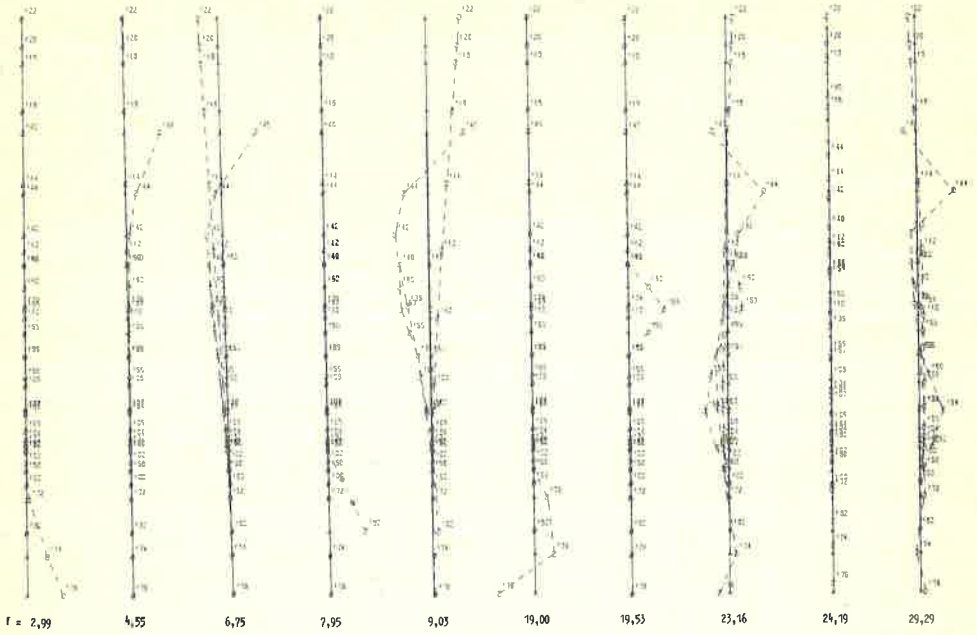


Fig. 4-4 Eigenverhalten der Einbauten (RDG mit int. Umwälzsystemen)

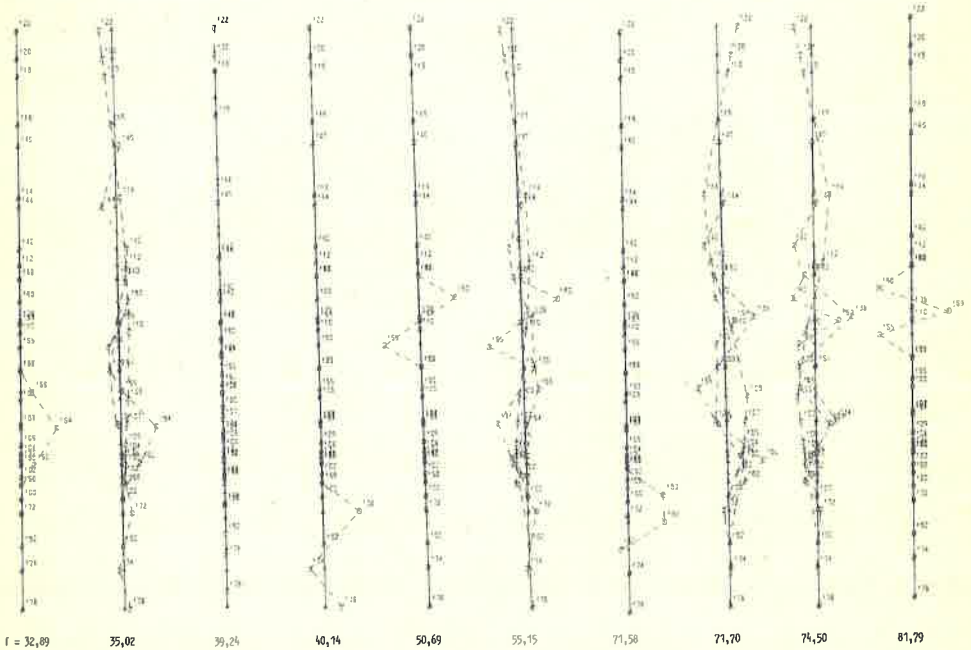


Fig. 4-5 Eigenverhalten der Einbauten (RDG mit int. Umwälzsystemen)

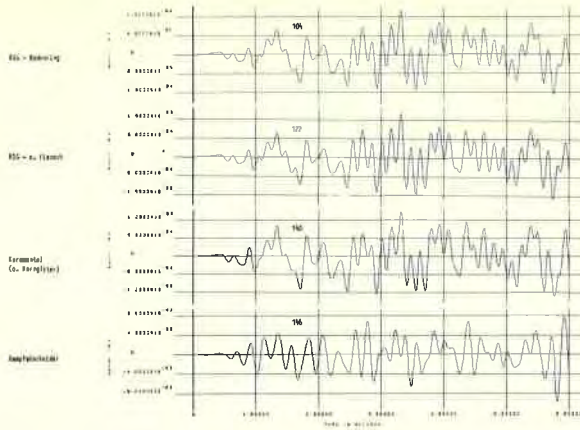


Fig. 7-1 Zeitverlauf der Verformungen charakteristischer Bereiche bei Erdbebenbelastungen

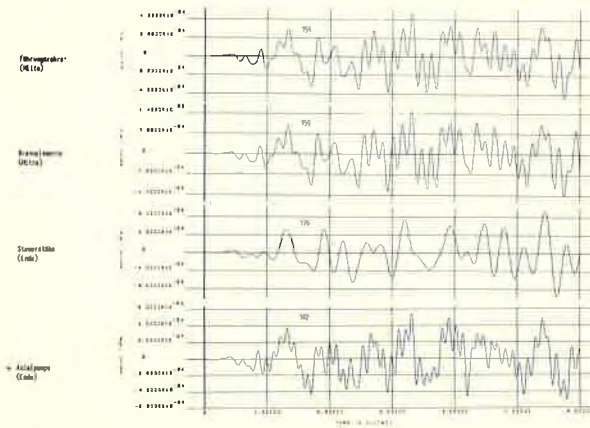


Fig. 7-2 Zeitverlauf der Verformungen charakteristischer Bereiche bei Erdbebenbelastungen

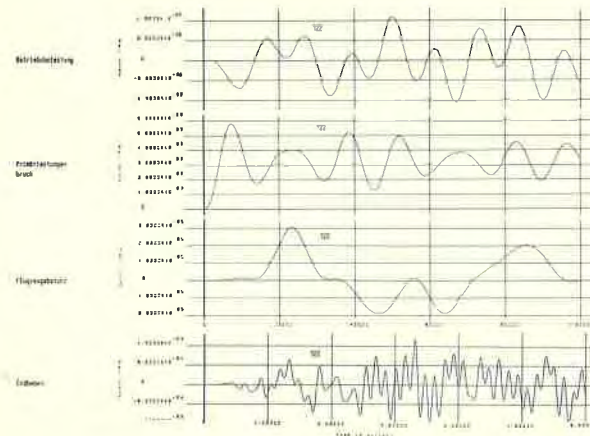


Fig. 7-3 Zeitverlauf der Verformungen des RDG bei relevanten Lastfällen

Idealisierung	Mode	EIGENFREQUENZEN (Hz)					
		0. Harm.		1. Harm.		2. Harm.	
		RDG	K. Mantel	RDG	K. Mantel	RDG	K. Mantel
2-dimension. F-E-Modell	1	34,59	16,80	7,17	5,06	15,65	13,57
	2	>100	32,58	28,94	19,08	35,85	28,46
	3		78,66	41,60	50,35	61,06	45,51
3-dimension. F-E-Modell	1	42,33	23,81	6,86	3,65		
	2	>100	42,33	27,85	13,64		
	3		57,98	41,62	30,24		
äquivalentes Feder-Massen Modell	1	39,24	24,19	6,76	9,03		
	2	>100	39,24	35,03	29,29		
	3		75,01	74,51	71,70		

Tab. I Das Eigenverhalten der Schalenstrukturen anhand verschiedener Idealisierungen

Einfluß	Mode	EIGENFREQUENZEN (Hz)						
		RDG	K. Mantel	D. Abscheider	F. Rohre	B. Elemente	St. Stäbe	
Stützstrukturen Rohrleitkannen	a -vorhanden 1)	1	6,76	9,03	4,55	32,25	13,58	2,99
		2	39,24	29,29	23,16	61,01	29,30	19,00
		3	71,70	71,70	24,19	76,78	60,57	40,14
	b -nicht vorhanden 1)	1	6,76	9,03	4,55	32,25	13,58	2,19
		2	39,24	29,29	23,16	61,01	29,30	19,00
		3	74,51	71,70	24,19	76,78	60,56	40,14
Randbehältern	c -eingespannt-eingespant	1				32,89	19,53	
		2				71,70	50,70	
		3				>100	81,79	
	d -eingespannt-gelagert	1				32,25	16,85	
		2				61,01	33,03	
		3				76,78	71,70	
e -gelagert-gelagert	1				21,69	13,58		
	2				26,84	29,30		
	3				57,52	60,57		
Massenbehältern	f -Konstruktionsmassen	1	7,29	11,39	4,63	47,46	15,33	2,99
		2	31,57	27,33	31,57	89,77	31,57	19,00
		3	69,00	70,00	43,95	>100	68,34	40,14
	g -Konstruktions + virtuelle Massen (kalt)	1	6,76	9,03	4,55	32,25	13,58	2,99
		2	39,24	29,29	23,16	61,01	29,30	19,00
		3	74,51	71,70	24,19	76,78	60,57	40,14
h -Konstruktions + virtuelle Massen (Betrieb)	1	6,95	9,44	4,57	34,99	14,52	2,99	
	2	39,67	29,93	24,31	60,69	29,93	19,00	
	3	75,63	75,63	26,04	>100	62,87	40,14	
Kontrollum mit DWS	i -ohne	1	6,76	9,03	4,55	32,25	13,58	2,99
		2	39,24	29,29	23,16	61,01	29,30	19,00
		3	74,51	71,70	24,19	76,78	60,57	40,14
	k -mit	1	6,33	8,34	4,56	32,25	13,58	2,99
		2	41,01	28,10	23,15	61,01	26,84	19,00
		3	68,88	74,48	25,40	76,78	60,57	40,14

Tab. II Einfluß der variablen Parameter

1) Massenbelag gemB (g)

System	Mode	EIGENFREQUENZEN (Hz)							
		RDG	K. Mantel	II. Kerngitter	D. Abscheider	F. Rohre	B. Elemente	St. Stäbe	Umhüllsystem
RDG mit externen Umwellsystemen	1	5,88	14,13	2,15	7,52 ²⁾	31,00	14,14	4,55	12,15
	2	30,45	48,09		28,24	59,70	31,00	42,78	37,21
	3	31,00	51,49		55,32	75,23	56,26	120,00	89,68
RDG mit internen Umwellsystemen	1	6,76	9,03	1,74	4,55	32,25	13,58	2,99	10,38
	2	39,24	29,29		23,16	61,01	29,30	19,00	71,50
	3	74,51	71,70		24,19	76,78	60,57	40,14	>100

Tab. III Das Eigenverhalten der Einbauten der SW-Druckgefäße (Rechenergebnisse)

1) Massenbelag gemB (g) s. Tab. II
2) Neue Ausführung
3) RDG - VAK

System	EIGENFREQUENZEN (Hz)					
	Mode	x. Anteil	kl. Biegemodus	F. Biege	kl. Stöße	Umdümpfen
BKG mit externen Umwälzsystemen	1	9,7 - 14,3	4,0 - 4,5		15,0	5
	2	19,2 - 25,0	70,0 - 80,0		20,0	50
	3					
BKG mit internen Umwälzsystemen	1			22 - 28		8,0 - 10,5
	2			55 - 70		20 - 25
	3			90 - 100		ab 50

Tab. IV Die Eigenfrequenzen der Elemente der DSB-Rückgriffe (Verzweigungsbäume) 1) BKG - ohne Ausföhrung 2) BKG - mit

Lastfall	Belastungsfunktion	Angriffsort
Betriebsbelastung (KKB, KKP)		Umdümpfen (Axialpumpe)
Primärleistungsbruch (KKB, KKI)		Frischdampfleitung
Erdbeben (Fall KKP 1)		Fundamentplatte
Flugzeugabsturz (Fall KKP 2)		Gebäude (Beladendecke)

Tab. V Transiente Belastungszustände eines BDK

LASTFALL	Verformungen (mm)							
	DKC Bodenring	DKC Deckel	Einflügel	D-Abweichter	Föhr.-Rohre	Brillennetze	Einströmen	Einflümpfe
Betriebsbelastung	0,01	0,012	0,004	0,022	0,006	0,026	0,011	3,3
Primärleistungsbruch	0,403	5,808	1,330	6,329	0,724	2,563	0,607	0,513
Erdbeben	0,211	1,086	0,829	5,787	0,179	1,516	9,601	0,532
Flugzeugabsturz	0,014	0,031	0,017	0,055	0,016	0,021	0,029	0,018

Tab. VI Normierte Werte der Verformungen in den charakteristischen Bereichen

