# Comparison of Theoretical and Experimental Examinations on PWR-Fuel-Assemblies under External Loads

## (Vergleich von theoretischen und experimentellen Untersuchungen von DWR-Brennelementen bei Störfalleinwirkungen von aussen)

J.-D. Kim, U. Borsdorf, G. Stern

*Kraftwerk Union AG, Postfach 3220, D-8520 Erlangen, Germany*

Um das Verhalten von Druckwasserreaktor-Brennelementen (DWR-BE) bei horizontalen Schwingungsanregungen zu untersuchen, hat die Kraftwerk Union (KWU) eine Reihe von statischen und dynamischen BE-Versuchen durchgeführt, über die an anderer Stelle im Rahmen dieser Konferenz berichtet wird /1/.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methode, die geeignet ist, durch Kombination von Berechnung und Messung Untersuchungen des horizontalen Schwingungsverhaltens der BE mit Stößen gegen eine ein- oder zweiseitige Begrenzung durchzuführen. Dazu wurde zunächst ein 1BE-Rechenmodell entwickelt, dessen wichtigste Kenndaten direkt aus Messungen am Einzel-BE und an BE-Komponenten entnommen wurden. Das dynamische Verhalten des 1BE-Rechenmodells wurde dann durch Nachrechnungen von Meßergebnissen aus Schwingungsversuchen mit einem Einzel-BE überprüft.

Durch Aneinanderreihen von 1BE-Rechenmodellen können BE-Reihenmodelle mit einer Mehrzahl von BE erstellt werden, mit denen Rückschlüsse auf das Schwingungsverhalten der BE im Kernverband angestellt werden können. Zur Überprüfung der so gebildeten BE-Reihenmodelle wurden vorausberechnete Berechnungsergebnisse eines 3BE-Reihenmodells den gemessenen Ergebnissen aus 3BE-Schwingungsversuchen gegenübergestellt, wobei am mittleren Abstandhalter (AH) der berechnete Streubereich der AH-Stoßkräfte den gemessenen gut abdeckte. Außerdem konnte durch Variieren der wichtigsten Eingabeparameter eine geringe Empfindlichkeit des Rechenmodells hinsichtlich der maximalen AH-Stoßkraft nachgewiesen werden.

## 1 Einleitung

Druckwasserreaktor-Brennelemente (DWR-BE) sind im Kern stehend angeordnet. Die Einspannung am BE-Kopf und -Fuß mit der Gitterplatte (GP) und dem unteren Rost (UR) erfolgt über jeweils zwei Zentrierstifte. Zwischen den BE bzw. den Abstandhaltern (AH) und der Kernumfassung, die als Kernbegrenzung dient, sind relativ enge Spalte vorhanden. Aufgrund dieser Kerngeometrie sind in horizontaler Anregungsrichtung freie Schwingungen der BE nur begrenzt möglich. Durch Stöße der BE gegen die Kernumfassung und auch untereinander kommt es in den meisten Fällen zu Störungen der freien BE-Schwingungen. Um dieses komplizierte Schwingungsverhalten der BE mit Stößen zu untersuchen, wurden eine Reihe von BE-Versuchen durchgeführt (über die BE-Versuche wird von Wehling et al in /1/ berichtet).

Für analytische Untersuchungen des BE-Schwingungsverhaltens wurde wegen der komplexen BE-Struktur und des ausgeprägt nichtlinearen Verhaltens der BE eine kombinierte Methode aus Messung und Berechnung entwickelt (Bild 1). Nach dieser Methode wurde zunächst ein Einzel-BE-Berechnungsmodell erstellt, dessen wichtigste Kenndaten direkt aus Meßergebnissen entnommen wurden. Darüber hinaus wurde das dynamische Verhalten des Rechenmodells durch Vergleich von Rechenergebnissen mit Meßergebnissen aus Schwingungsversuchen mit einem Einzel-BE überprüft.

Anschließend wurde, um Rückschlüsse auf das Verhalten einer Mehrzahl von Brennelementen im Kernverband zu erhalten, durch Aneinanderreihen des 1BE-Rechenmodells ein 3BE-Reihenmodell (3BE in einer Reihe) erstellt und ein Vergleich von vorausberechneten und gemessenen AH-Stoßkräften vorgenommen.

## 2 BE-Modell und Rechenprogramm

Für die horizontalen nichtlinearen BE-Berechnungen werden die DWR-BE durch masselose Balkenelemente und Knotenpunkte, in denen die BE-Massen anteilmäßig angeordnet sind, idealisiert (Bild 2). In den AH-Ebenen sind Federelemente mit Spalt in Reihenschaltung mit Zug-Druck-Federn so angeordnet, daß ein- und zweiseitige Stöße verifiziert werden können. Als Einspannbedingungen am BE-Kopf und -Fuß wird eine feste Einspannung zugrunde gelegt, da dort bei statischen und dynamischen BE-Versuchen in horizontaler Richtung vernachlässigbar kleine Verschiebungen und Verdrehungen festgestellt wurden.

Das verwendete Rechenprogramm ist eine von Combustion Engineering Inc. weiterentwickelte Version des Computer-Codes "SHOCK" /2/. Es ermöglicht die nichtlineare dynamische Analyse von Strukturen, die als Feder-Masse-System abgebildet sind. Als Kopplungsglieder zwischen zwei Massenpunkten können u. a. lineare und nichtlineare Federelemente sowie Reibelemente zur Anwendung kommen. Darüber hinaus können Dämpfung und Stoßfaktoren berücksichtigt werden. Berechnet werden für jeden Massenpunkt bzw. jede Knoten-Kopplung u. a. die Bewegungs- und Schnittgrößen in Abhängigkeit von der Zeit, die je nach Wunsch in PLOT's grafisch dargestellt werden können.

## 3 Vergleich Rechnung-Messung

### 3.1 Vorgehensweise

Für die Modellerstellung selbst und deren Absicherung durch Nachrechnung verschiedener dynamischer BE-Versuche dienen insbesondere folgende Versuche und die daraus gewonnenen Meßergebnisse:

| direkte Eingabedaten für die Berechnung | Vergleich Berechnungs- und Meßergebnisse |
|---|---|
| - BE-Steifigkeitsmessungen und 1BE-Versuche mit Gleitsinusanregung ohne Stöße der AH<br>BE-Steifigkeit<br>BE-Biegelinie<br>BE-Einspannbedingungen<br>BE-Eigenfrequenzen u. -formen<br>BE-Dämpfung<br>- AH-Belastungsversuche<br>AH-Federkonstante | - 1BE-Zupf-Stoß-Versuch und 1BE-Versuch mit Gleitsinusanregung mit Stößen der AH:<br>einseitiger Stoß der AH<br>- 3BE-Versuch mit Gleitsinusanregung mit Stößen der AH:<br>einseitiger und zweiseitiger Stoß der AH |

Eingabedaten wie BE-Steifigkeit, -Eigenfrequenzen und -Dämpfungen, die von der Größe der BE-Auslenkungen abhängig sind und ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten aufweisen, werden im BE-Berechnungsmodell linearisiert so berücksichtigt, daß sie entsprechend den maximal möglichen BE-Auslenkungen einen Mittelwert darstellen.

Die folgenden Nachrechnungen verschiedener BE-Versuche sowie Sensitivitätsuntersuchungen des Rechenmodells sollen aufzeigen, inwieweit das BE-Berechnungsmodell bzw. die Berechnungsergebnisse insbesondere in den maximalen AH-Stoßbelastungen mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen.

### 3.2 1BE-Modell

Zur Überprüfung einseitiger Stöße der BE gegen eine Begrenzung wurden zunächst 1BE-Zupf-Stoß-Versuche sowie 1BE-Versuche mit Gleitsinusanregung nachgerechnet und mit den Meßwerten verglichen. Für verschiedene BE-Anfangsauslenkungen wurden die berechneten maximalen AH-Stoßbelastungen, die am mittleren AH auftreten, den Meßwerten gegenübergestellt (Bild 3).

Bei Sinusanregung desselben BE-Modells (Bild 4) bei verschiedenen Anregungsfrequenzen, -beschleunigungen (die Angaben für die Anregungsbeschleunigungen sind in allen Bildern auf die niedrigste analytisch untersuchte Beschleunigung des Schwingungsversuches mit 1BE in Umgebungsmedium Luft bezogen) und Umgebungsmedien Luft bzw. Wasser bei Raumbedingungen und Spalten von 1 mm/40 mm zwischen BE und Begrenzung sind die berechneten maximalen AH-Stoßkräfte im Vergleich mit den Meßergebnissen in Bild 5 dargestellt. Sie stimmen sowohl in Luft als auch in Wasser gut mit den gemessenen maximalen AH-Stoßkräften überein. Gewisse Abweichungen waren nur an den oberen und unteren AH festzustellen. Diese sind jedoch aufgrund der dort

wesentlich niedrigeren AH-Stoßkräfte von untergeordneter Bedeutung.

In der Berechnung wurde der Einfluß des Umgebungsmediums Wasser gegenüber Luft global durch die virtuelle Wassermasse und entsprechende Erhöhung der viskosen BE-Dämpfung berücksichtigt.

### 3.3 3BE-Reihenmodell

Durch Aneinanderreihen des 1BE-Modells wurde ein 3BE-Reihenmodell erzeugt. Je nach Art der stochastischen BE-Anregungen kommt es infolge der großen Anzahl von Stoßstellen in den verschiedenen AH-Ebenen zu einem komplizierten Schwingungsverhalten mit Stößen der BE untereinander und gegen die Begrenzung (Bild 6). Ein Maß für die Größe der dabei zu erwartenden AH-Stoßkräfte stellt die Anzahl der BE dar, die gleichzeitig am Stoß beteiligt sind.

Es wurden die 3BE-Versuche mit Gleitsinusanregung (Bild 7) bei verschiedenen Anregungsbeschleunigungen und -frequenzen und Spalten von 1 mm zwischen den AH untereinander und der Begrenzung vorausberechnet. Für den Fall gleicher BE-Steifigkeiten, -Frequenzen, -Dämpfungen und Spalte in den AH-Ebenen aller 3 BE (idealer Fall), sind für zwei Anregungsbeschleunigungen bei verschiedenen Anregungsfrequenzen die maximalen und minimalen berechneten AH-Stoßkräfte den gemessenen gegenübergestellt (Bild 8). Der Streubereich der AH-Stoßkräfte aus der Berechnung deckt dabei überwiegend den gemessenen Streubereich ab. Zudem war beim Vergleich der maximalen AH-Stoßkräfte in den meisten Fällen ein ähnlicher Stoßkraftverlauf bzw. ähnliche Stoßfolge der am Stoß beteiligten BE festzustellen. Die berechneten Stoßzeiten aus 1BE- und 3BE-Schwingungsversuchen entsprachen fast ausnahmslos den gemessenen. Auch die Zeitdauer zwischen zwei Stoßperioden auf einer Begrenzungsseite waren bei Versuch und Rechnung nahezu identisch.

### 3.4 Sensitivität des 3BE-Reihenmodells

Anhand verschiedener Vergleichsrechnungen wurde bei gleicher Anregung und zwei verschiedenen Anregungsfrequenzen untersucht, ob Änderungen der wichtigsten Eingabeparameter oder die Berücksichtigung gewisser Inhomogenitäten im Berechnungsmodell zu wesentlichen Phasenverschiebungen bzw. Unterschieden in den Berechnungsergebnissen insbesondere in den maximalen AH-Stoßbelastungen führen.

- Die zugrunde gelegte mittlere BE-Steifigkeit deckte den gemessenen Streubereich der maximalen AH-Stoßkraft am mittleren AH am besten ab. Global war festzustellen, daß BE mit geringerer lateraler Steifigkeit eher dazu neigen, nahezu gleichzeitig gegen die seitliche Begrenzung zu stoßen, als biegesteife BE. Das führt zu etwas höheren AH-Stoßkräften. Eine 20%-ige Absenkung der BE-Steifigkeit führte zu einer Erhöhung der maximalen AH-Stoßkraft von ca. 10 %.

- Verringern bzw. Erhöhen der für Umgebungsmedium Wasser verwendeten mittleren viskosen BE-Dämpfung um -40 %, -20 % und +20 % erbrachte in allen Rechenfällen nur unwesentliche Unterschiede in den Berechnungsergebnissen (Bild 9). In Bezug auf o. g. Abweichungen von der gewählten mittleren BE-Dämpfung zeigt das Rechenmodell nur geringe Empfindlichkeit.

- Eine Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen wie Unterschiede in den BE-Steifigkeiten der 3BE untereinander (max. 8 %), sowie unterschiedliche Spalte zwischen den AH untereinander und der Kernumfassung infolge vorgekrümmter BE, die in den verschiedenen Berechnungen jeweils getrennt und zusammen berücksichtigt wurden, führten zu den in Bild 10 dargestellten Ergebnissen. Während die Ergebnisse der Berechnungen mit unterschiedlichen BE-Steifigkeiten wie erwartet nur unwesentlich von den Ergebnissen des idealen 3BE-Modells abwichen, führte eine Berücksichtigung unterschiedlicher Spalte zu einer merklichen Herabsenkung der maximalen AH-Stoßkraft. D. h. je mehr Inhomogenitäten zwischen den BE vorhanden sind, desto mehr sinkt die Wahrscheinlichkeit der Stöße, bei denen mehrere BE gleichzeitig beteiligt sind.

## 4 Schlußbemerkung

Für Untersuchungen des Schwingungsverhaltens der BE in horizontaler Anregungsrichtung wurde eine mögliche Vorgehensweise in Form einer kombinierten Methode aus Messung und Rechnung aufgezeigt. Ihre Anwendung empfiehlt sich aufgrund der komplizierten BE-Struktur und des ausgeprägt nichtlinearen Verhaltens der BE.

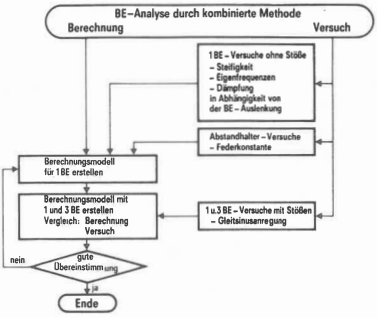
Nach dieser Methode lassen sich BE-Berechnungsmodelle erstellen, deren wichtigste Kenndaten direkt aus Versuchsergebnissen entnommen sind. Darüber hinaus kann durch Vergleichsrechnungen von verschiedenen BE-Versuchen das BE-Berechnungsmodell im dynamischen Verhalten überprüft werden.

Der Vergleich von Berechnungs- und Meßergebnissen aus 1BE und 3BE-Schwingungsversuchen zeigte, daß BE-Reihenmodelle für Untersuchungen einer gewissen Anzahl von BE z. B. im Kernverband ohne weiteres durch Aneinanderreihen des an 1BE-Schwingungsversuche angepaßten 1BE-Rechenmodells erstellt werden können. Dies bestätigten u. a. die angestellten Untersuchungen der Sensitivität des 3BE-Rechenmodells in Hinblick auf die maximalen AH-Stoßkräfte. Ein typisches Anwendungsbeispiel wäre die Ermittlung der BE-Reaktionen im Kern eines Druckwasserreaktors auf eine vorgegebene Schwingungsanregung von außen, etwa bei der Annahme eines Erdbebens im Rahmen der Störfalluntersuchungen. Die anzusetzende Erdbebenanregung am Kernrand ist dabei über eine gesonderte Berechnungskette vom Erdboden über das Reaktorgebäude, das Primärkreissystem und den Reaktordruckbehälter mit Einbauten zu ermitteln.

Literatur

/ 1 / Wehling H.-J. et al., Experimentelle Bestimmung der dynamischen Kennwerte von Brennelementen für Druckwasserreaktoren, 6th SMIRT Conference, Paris August 1981, Paper D3/7.

/ 2 / V. K. Gabrielson, "SHOCK Code User's Manual, a Computer Code to Solve the Dynamic Response of Lumped-Masses-Systems", Sandia Corp., Livermore Laboratory, SCL-DR-65-34, January 1966.

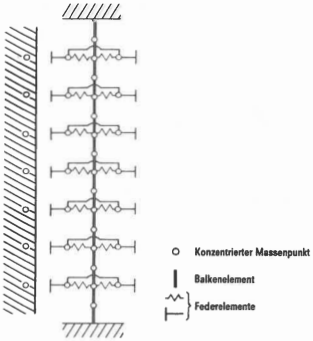



Flußdiagramm für horizontale Schwingungsuntersuchungen der BE

E 81099

Bild 1 Flußdiagramm für horizontale Schwingungsuntersuchen der BE

Kraftwerk Union

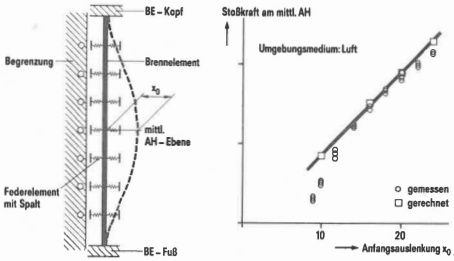



1 - Brennelement - Horizontal - Modell

E 81107

Bild 2 1-Brennelement-Horizontal-Modell

Kraftwerk Union

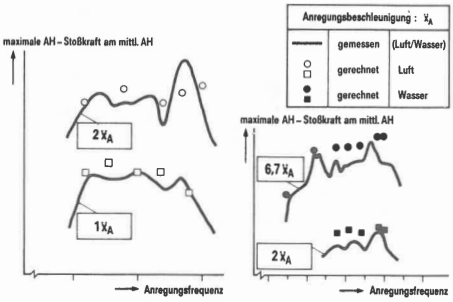



Vergleich Berechnung mit Versuch
AH - Stoßkraft in Abhängigkeit der Anfangsauslenkung (Zupf - Stoß - Versuch)

E 81102

Bild 3 Vergleich Berechnung mit Versuch AH-Stoßkraft in Abhängigkeit der Anfangsauslenkung (Zupf-Stoß-Versuch)

Kraftwerk Union

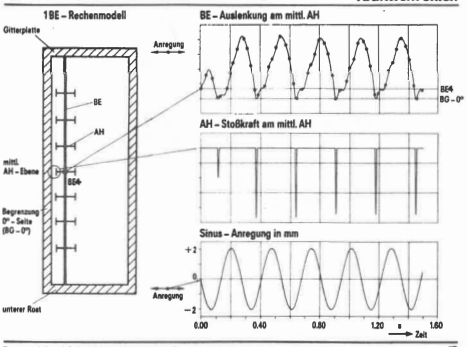



Vergleich Berechnung mit Versuch
1 BE - Schwingungsversuch mit Gleitsinusanregung

E 81101

Bild 4 Beispiel für 1BE-Berechnung mit Sinusanregung

Kraftwerk Union




Beispiel für 1 BE - Berechnung mit Sinusanregung

E 81111

Bild 5 Vergleich Berechnung mit Versuch 1BE-Schwingungsversuch mit Gleitsinusanregung

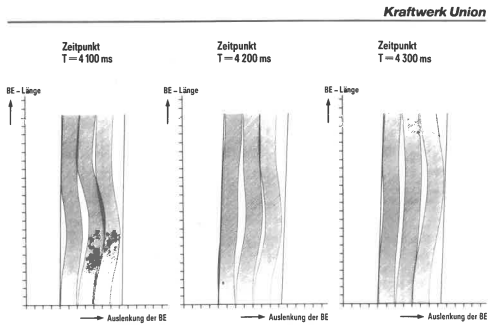



Bild 6 Bildliche Darstellung der BE-Bewegungen aus einer 3BE-Reihenmodell-Berechnung mit stochastischer Anregung

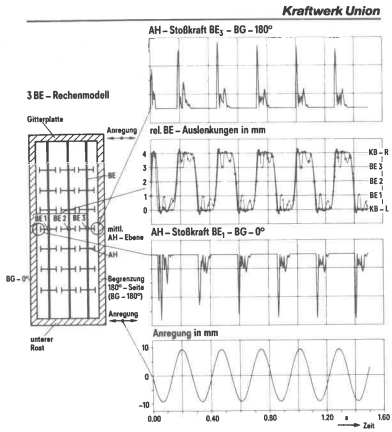



Bild 7 Beispiel für 3BE-Berechnung mit Sinusanregung

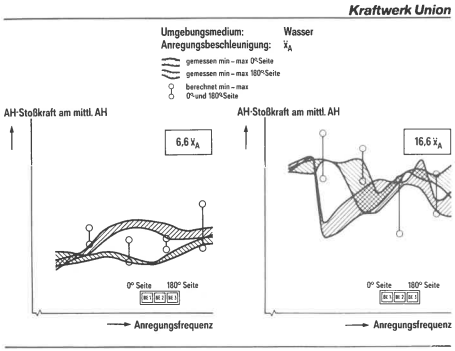



Bild 8 Vergleich Berechnung mit Versuch 3BE-Schwingungsversuch mit Gleitsinusanregung

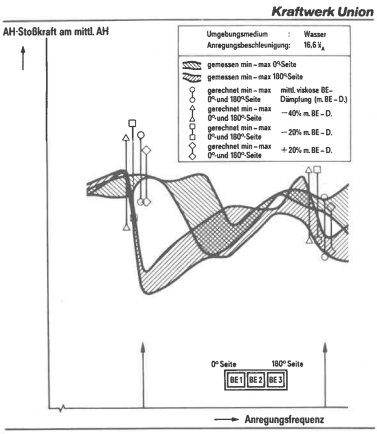



Bild 9 Änderung der BE-Dämpfung 3BE-Schwingungsversuch mit Gleitsinusanregung

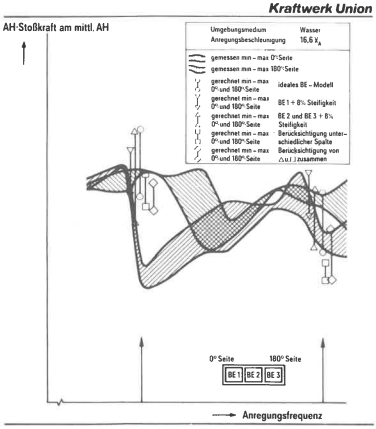



Bild 10 Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen 3BE-Schwingungsversuch mit Gleitsinusanregung