

Schwingungsüberwachung von Primärkreiskomponenten in Kernkraftwerken

Von dem Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Phys. Jürgen Fiedler
geboren am 23.02.1964 in Hameln

2002

Tag der Promotion: 15.08.2002

Prüfungskommission:

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. J. Seume

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. D. Stegemann

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Abstract

In Kernkraftwerken können mechanische Schwingungen von Primärkreis Komponenten wie Reaktordruckbehälter, Brennelemente und Instrumentierungslanzen in den Signalen von Neutronenflußdetektoren identifiziert werden. Dadurch ist es möglich die Eigenfrequenzen dieser Bauteilschwingungen indirekt, durch Analyse der Neutronenflußsignale zu bestimmen und so die mechanische Integrität der Primärkreis Komponenten selbst zu überwachen. Das ermöglicht eine betriebsbegleitende Überwachung ohne die Leistungsproduktion der Anlage zu beeinträchtigen. Unter Verwendung von Neutronenflußdetektoren mit unterschiedlichen Emittiermaterialien wird untersucht, wie eine quantitative Bewertung der Schwingungsamplitude von Bauteilschwingungen anhand der Neutronenflußfluktuationen durchgeführt werden kann. Die Schwingungen von Primärkreis Komponenten in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren der international hauptsächlich vertretenen Reaktortypen und in vier Siedewasserreaktoranlagen werden mit einem Modenseparationsverfahren untersucht, bei dem die spektralen Leistungsdichteanteile von vier Signalen nach ihrer Phasenlage neu geordnet werden. Ergebnisse aus baugleichen Anlagen, sowie zwischen Anlagen unterschiedlicher Leistungsgröße und unterschiedlicher Konstruktion werden verglichen. Die in Druck- und Siedewasserreaktoren erfolgreich eingesetzten Analysemethoden werden auch in zwei schwerwassermoderierten Reaktortypen angewandt. Mechanische Schwingungen der Reaktordruckbehälter, der Brennelemente und Instrumentierungslanzen werden in den Neutronenflußsignalen identifiziert. Es wird ein Verfahren vorgestellt, das die betriebsbegleitende Überwachung der mechanischen Integrität von Brennelementen, Kühlkanälen und Instrumentierungslanzen ermöglicht.

Schlagerworte: Schwingungsüberwachung, Kernbehälter, Neutronenfluß

Abstract

Mechanical vibrations of NPP components like reactor pressure vessel, fuel elements and instrument strings are detectable by analysis of the ex-core and in-core neutron flux signals. The mechanical integrity of these components can be monitored on-line without interference to the normal power plant operation.

Self powered Neutron flux detectors with different emitter materials have been investigated to perform a quantitative information about the amplitude of the mechanical vibration by analysis of the neutron flux fluctuation.

Mechanical vibrations of PWR components have been investigated by phase separation techniques. The results of measurements in PWRs of different size and construction are compared. Application of vibration monitoring techniques are shown for three different BWRs. Reactor vessel and fuel element and instrument tubes vibrations are identified and vibration monitor methods are proposed for two different heavy water moderated reactors.

Keywords: vibration monitoring, core barrel vibration, neutron noise

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren der Universität Hannover unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. D. Stegemann.

Wesentliche Teile der Arbeit wurden im Rahmen der wissenschaftlich technologischen Zusammenarbeit mit Argentinien, der Slowakischen Republik und der Republik Südkorea, durch das Internationale Büro des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Die experimentellen Untersuchungen im Forschungsreaktor der Technischen Universität Budapest wurden mit dem Ziel der Weiterentwicklung von Neutronenflußsensoren zur Schwingungsüberwachung und Schadenfrüherkennung in Kernreaktoren von der Stiftung Volkswagenwerk finanziell unterstützt.

Die den vergleichenden Analysen zugrundeliegenden Messungen an Leistungsreaktoren wurden in Kooperation mit den Kernkraftwerken Obrigheim, Stade, Brunsbüttel, Krümmel, Brokdorf, Grohnde, Emsland und Gundremmingen in der Bundesrepublik Deutschland, den Kernkraftwerken Dukovany in der Tschechischen Republik, den Kernkraftwerken Atucha und Embalse in Argentinien sowie den Kernkraftwerken Yongwang, Ulchin und Wolsong in Südkorea durchgeführt.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern der Universität Hannover und der an den Untersuchungen beteiligten Kernkraftwerke, die mir bei der Durchführung der Arbeit behilflich waren. Besonders zu Dank verpflichtet bin ich den Herren Prof. Dr.-Ing. D. Stegemann, Dr.-Ing. J. Runkel, Dr.-Ing. P. Heidemann und Dipl.-Phys. B. Hellmich, deren freundliche Unterstützung, fachliche Anleitung und engagierte Mitwirkung diese Arbeit erst ermöglichten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Abbildung von Bauteilschwingungen in Neutronenflußsignale	3
2.1. Messung von Neutronenflußfluktuationen	3
2.2. Einfluß von verschiedenen SPN-Detektor Emittermaterialien	5
2.3. Übertragung von mechanischen Schwingungen in Signale von SPN-Detektoren	12
2.4. Kalibrierung durch simultane Messung von Neutronenfluß und Beschleunigung	17
2.5. Signalseparation mittels Multi-Sensor-Analyse	21
3. Schwingungsanalyse durch Anwendung des Modenseparationsverfahrens in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren	25
3.1. DWR deutscher Bauart in 300MW _{el} , 600MW _{el} und 1300MW _{el} Leistungsklasse	26
3.1.1. Betriebliche Instrumentierung an Primärkreislauf und Reaktor	27
3.1.2. Reaktordruckbehälter- und Kernbehälterschwingungen	28
3.1.3. Interpretation von Fluidresonanzen im Primärkreis	38
3.2. DWR russischer WWER-440 Bauart	42
3.2.1. Schwingungen von Reaktordruck- und Kernbehälter	44
3.2.2. Fluidresonanzen im Primärkreis	46
3.2.3. Schwingungen der Primärkreisleitungen und Dampferzeuger	47
3.2.4. Frequenzlage der Eigenschwingungen im Vergleich	50
3.3. DWR amerikanisch-koreanischer Bauart	52
3.4. DWR Framatome Bauart	56
3.4.1. Fahrkammermessungen im Reaktorkern	57
3.4.2. Abbildung von Druckfluktuationen in Neutronenflußsignale	61
3.4.3. Relativbewegung von Reaktordruck- und Kernbehälter	62
4. Bauteilschwingungen in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktor	64
4.1. Schwingungen des Reaktordruckbehälters	65
4.2. Zustandsüberwachung durch Analyse der In-Kern Neutronenflußsignale	68

5. Überwachung von Bauteilschwingungen in Schwerwasserreaktoren	73
5.1. Schwerwasserreaktor mit vertikalen Druckrohren	73
5.1.1. Bewegungen von Reaktordruckbehälter und Moderator tank	74
5.1.2. Brennelementschwingungen	76
5.1.3. Schwingungen von Instrumentierungsanlagen	77
5.2. Schwerwasserreaktor mit horizontalen Druckrohren	80
5.2.1. Schwingungen von vertikalen Instrumentierungsanlagen	81
5.2.2. Schwingungen von horizontalen Instrumentierungsanlagen	83
5.2.3. Eigenschwingungen der Kühlkanäle	84
5.2.4. Schwingungen von Brennelementen / Brennstäben	85
5.2.5. Druckfluktuationen und Vibrationen des Moderatorbehälters	86
5.3. Betriebsbegleitende Überwachung der mechanischen Integrität von Kühlkanälen in einem CANDU-600 Schwerwasserreaktor	89
5.3.1. Beurteilung von Veränderung der Kühlkanalschwingungen	90
5.3.2. Abschätzung der Ortsauflösung	95
5.3.3. Freistellung von Kühlkanalschwingungen mit dem Modenseparationsverfahren ..	96
6. Zusammenfassung	98

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

A1 - A4	Absolutwegaufnehmer
A/D	Analog/Digital
AC	Wechselstrom
ABB-CE	Asea Brown Boveri-Combustion Engineering
ADC	Analog-Digital-Konverter
AKF	Autokorrelationsfunktion
ANP	Advanced Nuclear Power
ASLD	Autospektrale Leistungsdichte
B1, B2	Balkenschwingungsmoden
BA	Beschleunigungsaufnehmer
B1, B2	Beschleunigungsaufnehmer
BE	Brennelement
BEZ	Brennelementzyklus
COH	Kohärenz
d.h.	das heißt
DC	Gleichstrom
DE	Dampferzeuger
Det.	Detektor
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DWR	Druckwasserreaktor
Eb	Ebene
EDF	Electricité de France
FR	Fluidresonanz
FFT	Fast Fourier-Transformation
FKR	Fahrkammerrohr
FRAMATOME	Framatome ANP GmbH
G	Gemeinsamer Schwingungsmode
GE	General Electric
ges.	gesamt
HF	Hochfrequenz
HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
K01 - K08	Körperschallaufnehmer
KB	Kernbehälter

KFMR	Kernflußmeßgehäuserohr
KK	Kühlkanal
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
KKS	Kernkraftwerk Stade
KP	Kernposition
KSLD	Kreuzspektrale Leistungsdichte
KÜS	Körperschallüberwachungssystem
KWO	Kernkraftwerk Obrigheim
KWU	Kraftwerk Union
LVD	Leistungsverteilungsdichte
M01 - M12	Körperschallaufnehmer
MSLD	Modenseparierte Spektrale Leistungsdichte
MW _{el}	Elektrische Leistung in MW
NASLD	Normierte Autospektrale Leistungsdichte
N1 - N6	Außenkernneutronenflußkammern
P1 - P4	Druckaufnehmer
ppm	parts per million
RDB	Reaktordruckbehälter
RMS	Root Mean Square Value
RW	Relativwegaufnehmer
RX, RY	Relativwegaufnehmer
S	Schalenschwingungsmode
SAR	Steuerstabantriebsraum
SF	Skalierungsfaktor
SPND	Self-Powered-Neutron-Detector
SWR	Siedewasserreaktor
TS	Thermischer Schild
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
WWER	Wassergekühlter Wassermoderierter Energie Reaktor
YU10/YU80	Umwälzpumpen
z.B.	zum Beispiel

Formelzeichen

Zeichen	Name	Einheit
t	Zeit	s
$T_{1/2}$	Halbwertszeit	s
ω	Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}
m	Masse	g
f	Frequenz	s^{-1}
I_{Res}	Resonanzintegral	<i>barn</i>
σ_h	Wirkungsquerschnitt bei Neutronenenergie E_0	<i>barn</i>
Φ	Fluß	$cm^{-2} s^{-1}$
Φ_γ	Externer γ -Fluß	$cm^{-2} s^{-1}$
$\Phi_{n,t}$	Thermische Neutronenfluß	$cm^{-2} s^{-1}$
$\Phi_{n,e}$	Epithermische Neutronenfluß	$cm^{-2} s^{-1}$
λ	Zeitkonstante von Zerfallsprozessen	s^{-1}
P	Anteil	%
I_γ	Strom aus (γ, e^-) -Prozessen durch externe γ -Strahlung	nA
$I_{n,t}$	Strom aus (n, γ, e^-) - und (n, β^-) -Prozessen durch thermische Neutronen	nA
$I_{n,e}$	Strom aus (n, γ, e^-) - und (n, β^-) -Prozessen durch epithermische Neutronen	nA
I_R	Detektorstrom aus dem Hintergrundrauschen	nA
S_γ	Empfindlichkeit für externe γ -Strahlung	Acm^2s
$S_{n,t}$	Empfindlichkeit für thermische Neutronen	Acm^2s
$S_{n,e}$	Empfindlichkeit für epithermische Neutronen	Acm^2s
$S_{\beta,t}$	verzögerte Empfindlichkeit für den thermischen Neutronenfluß	Acm^2s
α_{pb}	Relative Empfindlichkeit für externe γ -Strahlung bezüglich des Pb-SPGDs	%
N	Teilchenzahl	
$g(t)$	Gleichphasiger Modus	
$s(t)$	Schalenschwingungsmodus	
$b_1(t)$	Balkenschwingungsmodus 1	
$b_2(t)$	Balkenschwingungsmodus 2	

Naturkonstanten

Zeichen	Name	Wert und Einheit
λ_m	Zeitkonstante für den Zerfall von Rh-104*	$0,002626 s^{-1}$
λ_g	Zeitkonstante für den Zerfall von Rh-104	$0,0165 s^{-1}$

Mathematische Funktionen

Zeichen	Name
$\tilde{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int dt f(t) e^{i\omega t}$	Fouriertransformierte von $f(t)$
$F(\omega) = \tilde{f}(\omega)$	Fouriertransformierte von $f(t)$
$ a $	Betrag von a
$\langle f \rangle$	Erwartungswert von f
$ASLD(a) = \langle \tilde{a} ^2 \rangle$	Autospektrale Leistungsdichte
$CSLD(a) = \langle \tilde{a} \cdot \tilde{b} ^2 \rangle$	Kreuzspektrale Leistungsdichte
$\text{coh}(a, b) = \frac{CSLD(a, b)^2}{ASLD(a) \cdot ASLD(b)}$	Kohärenz von a und b
$Re(z)$	Realteil von z
$Im(z)$	Imaginärteil von z

1. Einleitung

Die Schwingungsüberwachung von Primärkreiskomponenten in Kernkraftwerken ermöglicht die zustandsbezogene und vorausschauende Instandhaltung der Anlage und damit die Reduzierung von unplanmäßigen sowie die Verkürzung von geplanten Anlagenstillständen. Informationen über den Schwingungszustand der Anlage können als Entscheidungshilfen zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit dienen und so zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Anlage beitragen.

In Kernkraftwerken sind Systeme zur betrieblichen Überwachung von Schwingungen der Primärkreiskomponenten installiert. Die Schwingungsüberwachung wird mit dem Ziel durchgeführt, Veränderungen im Schwingungsverhalten von Primärkreiskomponenten so frühzeitig zu erkennen, daß sich entwickelnde Fehler entdeckt und beseitigt werden können, bevor sie zu Schäden an der Anlage führen. Die direkte Montage von Sensoren an zu überwachenden Bauteilen ist jedoch nur dort möglich, wo die Umgebungsbedingungen wie Druck, Temperatur, Feuchte und Strahlung dieses zulassen. Zusätzlich zur Schwingungsüberwachung durch direkt am Bauteil montierte Sensoren, gibt es die Möglichkeit, durch Analysen der Signale der bereits vorhandenen Betriebsinstrumentierung gleichwertige Informationen zu erhalten, selbst wenn diese Instrumentierung in erster Linie für andere Aufgaben installiert wurde. Mechanische Schwingungen und Druckfluktuationen sind oft in verschiedenen physikalisch unterschiedlichen Signalen meßbar, selbst wenn diese ursprünglich nicht für Schwingungsmessungen ausgelegt wurden. So können beispielsweise die Signale der Außenkernneutronenflußinstrumentierung für die Schwingungsüberwachung der Reaktordruckbehälter und Signale der Inkernneutronenflußinstrumentierung zur Untersuchung von Bauteilschwingungen der Kerneinbauten benutzt werden. Hierzu werden die dem jeweiligen Neutronenflußmittelwert überlagerten, sogenannten Rauschanteile analysiert.

Die Analyse von Rauschquellen in Neutronenflußdichteschwankungen begann mit der Beobachtung von Schwankungen in der Neutronenflußdichte von Nullleistungsreaktoren Ende der vierziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts und wird heute in den Leistungsreaktoren praktisch aller Industrieländer durchgeführt. Der in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentierten historische Verlauf mit verschiedenen theoretischen Modellvarianten zum Neutronenflußrauschen in Nullleistungsreaktoren und der Entwicklung der Rauschdiagnostik in Leistungsreaktoren kann anhand von zusammenfassenden Darstellungen nachvollzogen werden /1, 2, 3/.

Es gehört mittlerweile zum anerkannten Stand der Technik, daß die Schwingungsüberwachung in Kernkraftwerken sowohl anhand der direkt gemessenen Größen als auch mit indirekten Meßverfahren, wie der Neutronenflußrauschenanalyse, durchgeführt werden kann, falls die Übertragungsfunktion zu der zu überwachenden Größe bekannt ist /4/.

Die Übertragung von mechanischen Schwingungen in die Neutronenflußsignale der Reaktorinstrumentierung ist jedoch stark abhängig von der Reaktorkonstruktion und den jeweiligen, zum Teil sehr verschiedenen thermohydraulischen und neutronenphysikalischen Gegebenheiten. Eine allgemeingültige Lösung in Form einer für alle Reaktortypen gültigen Übertragungsfunktion ist hier also

per se nicht zu erwarten. Jedoch können dort, wo gemeinsame Konstruktionsmerkmale in den Reaktoren vorhanden sind, auch vergleichbare Bauteilschwingungen festgestellt werden. Mehr als 90 Prozent der heute weltweit in zur Energieerzeugung eingesetzten Kernkraftwerken betriebenen Reaktoranlagen kann grob in drei Kategorien eingeteilt werden /5, 6/:

- etwa 60 Prozent aller Kernkraftwerke haben leichtwassermoderierte Druckwasserreaktoren
- über 20 Prozent aller Kernkraftwerke haben leichtwassermoderierte Siedewasserreaktoren
- etwa 10 Prozent aller Kernkraftwerke haben schwerwassermoderierte Reaktoren.

In Kapitel 2 wird zunächst grundsätzlich untersucht, wie sich mechanische Schwingungen in die Signale von unterschiedlichen Neutronenflußsensoren abbilden und wie Skalierungsfaktoren bestimmt werden können, die eine quantitative Bewertung der Schwingungsamplitude von Bauteilschwingungen nur anhand der Neutronenflußfluktuationen ermöglichen.

Die Schwingungen von Primärkreis Komponenten in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren der international hauptsächlich benutzten Reaktortypen werden mit Hilfe der Neutronenfluß-, Beschleunigungs- und Schwingwegsignalen in Kapitel 3 analysiert und, sofern möglich, mit einem Modenseparationsverfahren von anderen Signalkomponenten isoliert. Der Vergleich von Ergebnissen aus baugleichen Anlagen einerseits, sowie zwischen Anlagen unterschiedlicher Leistungsgröße und unterschiedlicher Konstruktion andererseits, verdeutlicht die gute Übertragbarkeit und Belastbarkeit der hier angewandten Analysetechnik.

In Kapitel 3 werden erstmals Ergebnisse der Anwendung des Modenseparationsverfahrens auf Schwankungen der Reaktoreintrittsdrucksignale veröffentlicht. Besonders die gute Trennung der durch Hohlraumresonanzen verursachten, globalen Druckfluktuationen von den durch akustische, stehende Wellen verursachten und in den einzelnen Primärkreisschleifen leicht unterschiedlichen Druckfluktuationen, ist sehr bemerkenswert.

Im Vergleich zu den Druckwasserreaktoren ist die Instrumentierungsdichte der In-Kern Neutronenflußdetektoren von den in Kapitel 4 untersuchten Siedewasserreaktoren erheblich größer. Das ermöglicht die nahezu lückenlose Überwachung der Brennelementeschwingungen und der Schwingungen der Instrumentierungslanzen selbst. Hierzu wird erstmals auch in Siedewasserreaktoren das Modenseparationsverfahren eingesetzt.

In schwerwassermoderierten Reaktoren sind die physikalischen Bedingungen für die Analyse von Bauteilschwingungen mittels Neutronenflußanalyse besonders günstig, da die parasitäre Absorption von Neutronen geringer ist als in leichtwassermoderierten Reaktoren. Die zuvor in Druck- und Siedewasserreaktoren erfolgreich eingesetzten Analysemethoden werden im Kapitel 5 an einem schwerwassermoderierten Druckkesselreaktor und einem schwerwassermoderierten Druckröhrenreaktor auf ihre Anwendbarkeit zur Beobachtung von Bauteilschwingungen an Primärkreis Komponenten von schwerwassermoderierten Reaktoren untersucht.

2. Abbildung von Bauteilschwingungen in Neutronenflußsignale

2.1 Messung von Neutronenflußfluktuationen

In Kernkraftwerken mit Leistungsreaktoren ist die im Reaktor erzeugte thermische Leistung proportional zur Anzahl der Kernspaltungen pro Zeiteinheit. Diese wiederum ist proportional zur Anzahl von spaltfähigen Neutronen pro Volumen- und Zeiteinheit, der sogenannten Neutronenflußdichte. Die Neutronenflußdichte ist deswegen eine wichtige Meßgröße. Diese wird in den in dieser Arbeit untersuchten Reaktoren außerhalb des Reaktordruckbehälters, mit sogenannten Neutronenflußaußenkammern, oder innerhalb des Reaktorkerns mit sogenannten In-Kern-Neutronenflußdetektoren, gemessen. Die Neutronenflußsignale lassen sich mit Tiefpass-Filtern in Signalmittelwerte, die der Reaktorleistung proportional sind, und mit Hilfe von Hochpass-Filtern in fluktuierende Signalanteile, die sogenannten Rauschsignale zerlegen. Über unterschiedliche Mechanismen können sich Bauteilschwingungen in Neutronenflußrauschsignale abbilden. Ein gut bekanntes Beispiel ist die Relativschwingung von Kernbehälter und Reaktordruckbehälter in leichtwassergekühlten Druckwasserreaktoren, wobei die Breite eines Wasserspaltes zwischen beiden Behältern periodisch verändert wird. Bei abnehmender Dicke dieser Wasservorlage werden die aus dem Kernreaktor ausfließenden thermischen Neutronen weniger abgeschwächt und so werden mehr Neutronen pro Zeiteinheit in den Außenkammern gemessen. Bei zunehmender Breite des Wasserspaltes ist es umgekehrt. Durch die ebenfalls modulierte Reflektionsrate von Neutronen ist dieser Effekt auch in den In-Kern Neutronenflußdetektoren im Kernrandbereich meßbar. Die Frequenz dieses sogenannten Abschwächungsrauschens ist zugleich die Frequenz der Relativschwingung von Kernbehälter und Reaktordruckbehälter [1].

Neutronenflußfluktuationen werden in der Regel mit der bereits vorhandenen Instrumentierung der Reaktoren gemessen. Dies sind permanent oder temporär installierte Miniaturspaltkammern außerhalb und innerhalb des Kerns, sowie permanent installierte Self Powered Neutron Detectors (SPN-Detektoren) im Kern. Miniaturspaltkammern sind Ionisationskammern mit einer Auflage aus spaltfähigem Material, z.B. Uran oder Plutonium. Unter dem Einfluß der Neutronen ionisieren die Spaltprodukte das Füllgas in der Kammer welches sich an der Anode bzw. Kathode der Ionisationskammer entlädt und ein Meßsignal liefert, das dem thermischen Neutronenfluß proportional ist. Das Signal ist prompt und der Anteil epithermischer und schneller Neutronen an der Entstehung des Signals ist zu vernachlässigen. Deswegen sind die Spaltkammersignale in der Regel gut für Schwingungsmessungen geeignet.

Die Signale von SPN-Detektoren sind dagegen in Abhängigkeit vom Emittiermaterial zum Teil verzögert (z.B. Detektoren mit Rhodium- und Vanadiumemitter) und haben wesentliche Anteile aus Reaktionen des Detektoremitters mit epithermischen Neutronen und der Gammastrahlung im Reaktor. Das macht eine genauere Analyse der Signalentstehung in SPN-Detektoren in Hinblick auf ihre Verwendung zur Neutronenflußrauschanalyse notwendig. Da die Neutronenflußsignale zum Teil mit verschiedenen Detektortypen gemessen werden, ist eine Methode zur Normierung der Signale

erforderlich, bevor Neutronenflußrauschmessungen miteinander verglichen werden können. In der Neutronenflußrauschanalyse wird diesem Problem meistens dadurch begegnet, daß das Rauschsignal auf den Mittelwert des absoluten Detektorsignals normiert wird. Dieses Verfahren ist dann zulässig, wenn Rauschsignal und Mittelwert aus miteinander korrelierten Komponenten bestehen. Andernfalls können Signalanteile die sich im DC Anteil des Signals aufsummieren, im AC Anteil des Signals gegenseitig aufheben. In Spaltkammersignalen ist das nicht der Fall, da diese prompt sind. Für SPN-Detektoren wird die Korrelation der verschiedenen Signalanteile in den folgenden Abschnitten aus diesem Grund untersucht.

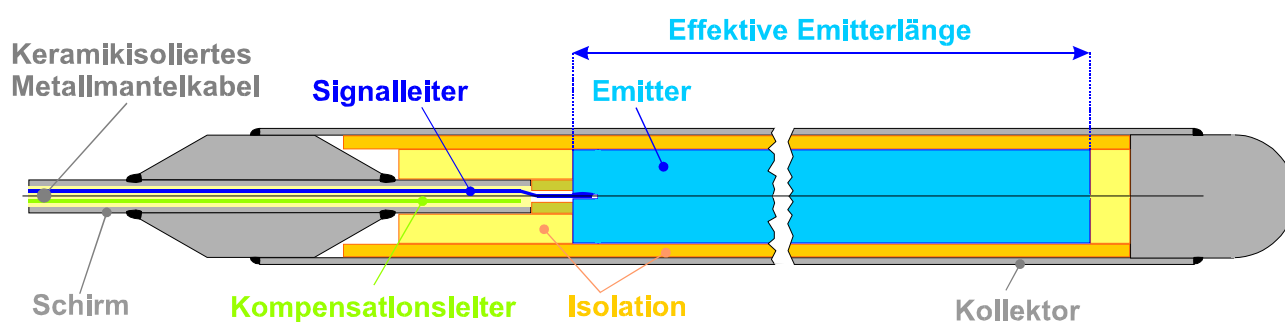


Bild 2.1: Typischer Aufbau eines Self-Powered-Neutron Detectors

Ein SPN Detektor (SPND) besteht aus einem Emitter, einem Isolator und einem Kollektor (Bild 2.1). Der Kollektor ist gleichzeitig die äußere Hülle des Detektors. Er wird durch eine Keramikisolierung vom Emitter elektrisch isoliert. Im Emitter werden aufgrund von Wechselwirkungen der Neutronen mit den Atomen des Emittermaterials Elektronen herausgelöst. Bei den abgelösten Elektronen handelt es sich um Beta-Teilchen aus Neutroneneinfangprozessen oder um Elektronen aus innerer Konversion und Gamma-Wechselwirkungsprozessen. Je nach Halbwertszeit des Emittermaterials erfolgt die Aussendung der Elektronen beim Beta-Zerfall verzögert, während die Elektronen aus den Neutronen-Gamma-Wechselwirkungsprozessen prompt ausgesendet werden. Verbindet man Emitter und Kollektor, so fließt ein Strom der als Meßgröße dient. Er ist dem Neutronenfluß durch den die Elektronen herausgelöst worden sind proportional. Schwankungen im Neutronenfluß werden somit als Schwankungen im Stromsignal des Detektors registriert. Die Empfindlichkeit eines SPND, diese Neutronenflußschwankungen zu registrieren, hängt stark von seiner Geometrie und dem verwendeten Emittermaterial ab. Im Jahr 1968 wurde eine zylinderförmige SPND Konstruktion in einer AECL Patentschrift ausgelegt. Am Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren der Universität Hannover wurden SPN-Detektoren, entwickelt, die zur qualitativen Leistungsverteilungsdichtebestimmung sowie zur Beobachtung von Bauteilschwingungen im Inneren von Kernreaktoren eingesetzt wurden. Als Emittermaterialien werden hauptsächlich die Elemente Vanadium und Rhodium für verzögert ansprechende SPND und Kobalt, Hafnium, Erbium und Platin für prompt ansprechende verwendet /7/. Wichtige Kriterien bei der Auswahl der Emittermaterialien für den praktischen Einsatz sind neben der Empfindlichkeit auch das Abbrand- und Abklingverhalten.

2.2 Einfluß von verschiedenen SPN-Detektor Emittermaterialien

Um den Einfluß des Emittermaterials auf das Signal von SPN-Detektoren zu untersuchen, sind an einem Leichtwasser Poolreaktor sowjetischer Bauart (WWR-C) am Institut for Nuclear Technology (INT) der Technischen Universität Budapest Experimente mit SPN-Detektoren gleicher Geometrie und Bauweise mit Rhodium-, Hafnium-, Erbium und Kobaltemitter durchgeführt worden. Der Reaktorkern des WWR-C Reaktors besteht aus 20 Brennelementen mit 7 cm x 7 cm Querschnitt und 0,5 Meter Höhe. Jedes Brennelement faßt maximal 16 Brennstäbe. In einige Brennelemente und im Reflektor sind anstelle der Brennstäbe freie Kanäle, die für Experimente genutzt werden oder Kanäle für Steuerstäbe und Meßblenden eingelassen. Der Reaktorbehälter ist oben offen, so daß für die Versuche Materialien in den Reaktorkern und den Reflektor eingebracht werden können.

Die Versuche wurden bei unterschiedlichen thermischen Reaktorleistungen bis maximal 100 kW in drei Abschnitten durchgeführt:

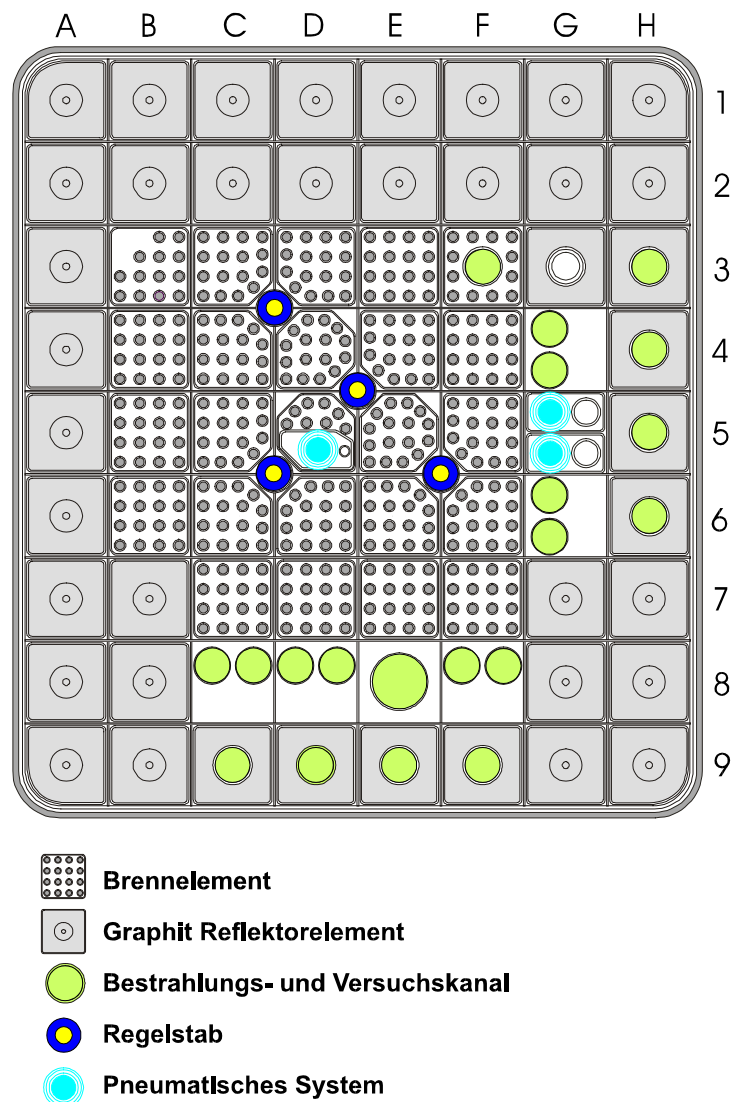
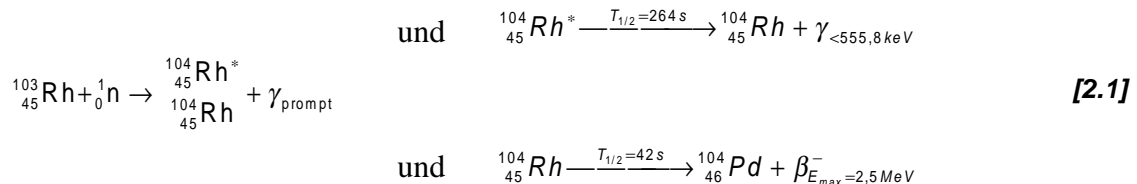


Bild 2.2: Kernquerschnitt des WWR-C Reaktors im INT

- Einleiten einer Transiente im Neutronenfluß durch den Einschub einer Kadmiumkapsel mit einer Reaktivitätsänderung von 16 cent durch ein pneumatisches System
- Einleiten einer Transiente im Neutronenfluß durch eine Reaktorschnellabschaltung mit den Regelstäben
- Einleiten einer periodischen Reaktivitätsänderung von etwa 0,2 cent im Neutronenfluß durch einen rotierenden Absorber im Experimentierkanal innerhalb eines Brennelementes auf der Reaktorkernposition F3 (Position siehe Bild 2.2).

Mit Ausnahme eines Detektors mit Rhodiumemitter sind alle hier verwendeten Detektoren prompt. Das bedeutet, daß die zeitliche Änderung des Signals unmittelbar der Änderung im gemessenen Neutronenfluß folgt. Im Gegensatz hierzu liefern SPN-Detektoren mit Rhodiumemitter einen Anteil ihres Signals verzögert.

Der Grund für die verzögerte Signalabgabe der Rhodiumemitter ist aus den Kernreaktionen ersichtlich, die bei der Aktivierung von Rh-103 durch thermischen Neutronen Elektronen freisetzen:



Während die prompte Gammastrahlung den prompten Signalanteil eines Rh-SPN Detektors erzeugt, wird das verzögertes Signal von Rh-SPN Detektoren durch Elektronen aus dem Gammazerfall von Rh-104 erzeugt. Um den prompten und verzögerten Anteil zu messen, ist das Signal der Rh-SPN Detektoren Rh5 und Rh6 nach einer Reaktorschnellabschaltung durch Steuerstabeinwurf in den Reaktorkern aufgenommen worden. Der Steuerstabeinwurf bewirkt das Abschalten des Reaktors innerhalb von etwa einer halben Sekunde. Nach der Abschaltung des Reaktors, werden im Kern allerdings noch verzögert Neutronen frei. Der Anteil ist bei der Spaltung von U-235 ungefähr 0,78% der insgesamt frei werdenden Neutronen. Dieser verzögerte Neutronenfluß fällt exponentiell mit der Zeit ab. Wiederum weniger als 30% der verzögerten Neutronen haben eine Halbwertszeit größer als 20 Sekunden /8/. Deshalb kann bei der Bestimmung des Signalanteils aus dem Zerfall von Rh-104 der verzögerte Neutronenfluß vernachlässigt werden. Aus dem Zerfallsschema und dem Zerfallsgesetz ergeben sich dann folgende gekoppelte Differentialgleichungen :

$$\dot{N}_m(t) = -\lambda_m N_m(t) + R_m(t) \quad [2.2.a]$$

$$\dot{N}_g(t) = -\lambda_g N_g(t) + \lambda_m N_m(t) + R_g(t) \quad [2.2.b]$$

mit:	$N_m(t)$:	Anzahl der Rh-104* Kerne im Detektor
	$\lambda_m = 0,002626 \text{ s}^{-1}$:	Zeitkonstante für den Zerfall von Rh-104*
	$R_g(t)$:	Reaktionsrate für die Aktivierung von Rh-104* [s^{-1}]
	$N_g(t)$:	Anzahl der Rh-104 Kerne im Detektor
	$\lambda_g = 0,0165 \text{ s}^{-1}$:	Zeitkonstante für den Zerfall von Rh-104
	$R_m(t)$:	Reaktionsrate für die Aktivierung von Rh-104 [s^{-1}]

Unter der Bedingung, daß der Reaktor mit konstanter Leistung P_0 und damit auch mit konstantem Neutronenfluß betrieben wird, ist $R(t) = \text{const} = R$. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann für den Reaktorstart der Zeitpunkt $t_0 = 0$, $N(t) = 0$ gewählt werden. Dann ist die Lösung der Differentialgleichungen 2.2.a und 2.2.b während des Reaktorbetriebs :

$$N_m(t) = \frac{R_m}{\lambda_m} (1 - e^{-\lambda_m t}) \quad [2.3.a]$$

$$N_g(t) = \frac{1}{\lambda_g} \left(R_g + R_m - \left(R_g - \frac{\lambda_m R_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right) e^{-\lambda_g t} - \frac{\lambda_g R_m}{\lambda_g - \lambda_m} e^{-\lambda_m t} \right) \quad [2.3.b]$$

Wird der Reaktor hinreichend lange mit konstanter Leistung betrieben, so tritt die Sättigung ein und es gilt näherungsweise $N(t) = N(t \rightarrow \infty)$. Für eine Zeit $t = 6$, $T_{1/2} = 6 \ln(2)/\lambda$ ist $e^{-\lambda t} = 0,015 \approx 0$. Das heißt in diesem Fall gilt nach etwa halbstündigem Reaktorbetrieb bei konstanter Leistung: $N_m = R_m / \lambda_m$ und $N_g = (R_g + R_m) / \lambda_g$.

Für die Zeit nach der Abschaltung des Reaktors ist oben angenommen worden, daß auch der Neutronenfluß verschwindet. Dann ist $R(t) = 0$. Setzt man für den Zeitpunkt der Reaktorabschaltung $t_0 = 0$ als Randbedingung sowie $N_m(t_0) = R_m / \lambda_m$ und $N_g(t_0) = (R_g + R_m) / \lambda_g$ so folgt als Lösung für die Differentialgleichungen nach der Abschaltung des Reaktors :

$$N_m(t) = \frac{R_m}{\lambda_m} e^{-\lambda_m t} \quad [2.4.a]$$

$$N_g(t) = \frac{1}{\lambda_g} \left(\left(R_g - \frac{\lambda_m R_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right) e^{-\lambda_g t} - \frac{\lambda_g R_m}{\lambda_g - \lambda_m} e^{-\lambda_m t} \right) \quad [2.4.b]$$

Damit fällt die Anzahl der aktiven Kerne im Detektor mit den beiden Zerfallskonstanten λ_m und λ_g exponentiell ab. Der Anteil am Detektorstrom, der auf diese aktiven Kerne zurückgeht, wird nun anhand der Kenntnis ihrer Zerfallsfunktion bestimmt. Vernachlässigt wird dabei der Beitrag der verzögerten Gammastrahlung aus dem Zerfall von Rh-104* zur Stromproduktion, da ihr Energiespektrum im wesentlichen unterhalb der Mindestenergie liegt, die Photoelektronen benötigen, um das elektrische Potential im Emitter zu überwinden. Gleiches gilt für Elektronen, die durch interne Konversion erzeugt werden. Die Anzahl der Elektronen, die durch den β^- -Zerfall von Rh-104 pro Zeiteinheit freigesetzt werden, ist nach dem Zerfallsgesetz $\lambda_g N_g(t)$. Die Effizienz der Stromproduktion durch den β^- -Zerfall von Rh-104 hängt nun vom Ort des emittierenden Rh-104 Kerns im Emitter als auch von der Energie des freigesetzten Elektrons ab, aber nicht von der Zeit. Deshalb muß das als Funktion der Zeit gemessene Signal des Rh-SPN-Detektors nach der Abschaltung des Reaktors der Funktion $N_g(t)$ proportional sein.

Durch Einpassen der Funktion $f(t) = C_0 + C_1 e^{-\lambda_g t} + C_2 e^{-\lambda_m t} \quad [2.5]$

in ein gemessenes Stromsignal des Rh-Detektors lassen sich die Konstanten C_i bestimmen.

Dies ist für den Detektor Rh6 mit Meßdaten berechnet worden, die vor während und nach einer Reaktorschnellabschaltung durch Steuerstabeinwurf mit einer Abtastrate von 1 Hz aufgezeichnet wurden. Die gemessenen Ströme sowie die eingepaßten Funktionen sind im Bild 2.3 über der Zeit dargestellt. Die errechneten Parameter dazu sind in Tabelle 2.1 zusammengefaßt.

Der verzögerte Signalanteil ist dann

$$P_{\text{delay}} = \frac{C_0 + C_1 + C_2}{I_{Rh}} \quad \text{und} \quad P_{\text{prompt}} = 1 - P_{\text{delay}} \quad [2.6]$$

Detektor	Kanal	Reaktorl.	C_0 [nA]	C_1 [nA]	C_2 [nA]	I_{Rh} [nA]	P_{prompt} [%]	P_{delay} [%]
Rh6	E8	30 kW	0,02	5,35	0,42	6,36	91	9
Rh6	F3	20 kW	0,03	3,16	0,23	3,77	90,7	9,3

Tabelle 2.1: Errechnete Parameter der Funktion 2.5 für den Strom aus Rh-SPN-Detektoren nach Reaktorschnellabschaltungen

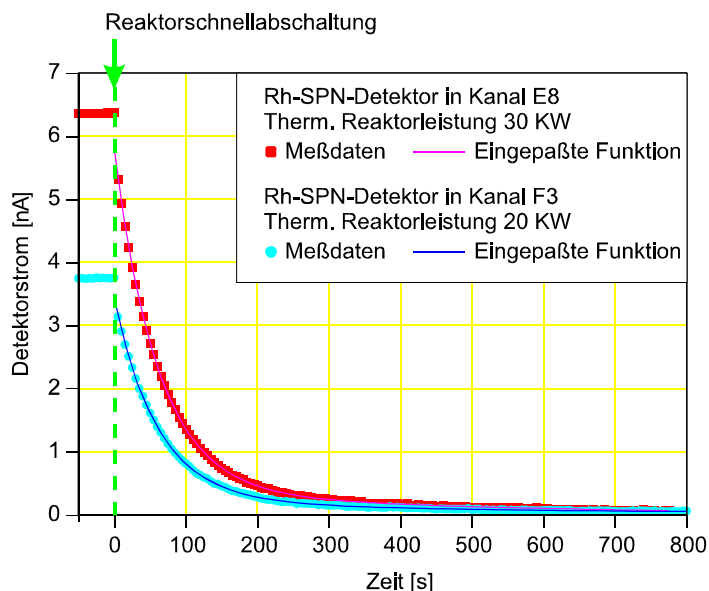


Bild 2.3 : Stromsignal eines Rhodium SPN-Detektors vor- und nach einer Reaktorschnellabschaltung

Der gemessene Differenzstrom I eines SPN-Detektors setzt sich aus drei verschiedene Teilströmen zusammen, die aus den drei ladungsfreisetzenden Effekten stammen:

$$I = I_{\gamma} + I_{n,t} + I_{n,e} \quad \text{und} \quad I_n = I - I_{\gamma} = I_{n,t} + I_{n,e} \quad [2.7]$$

mit: I_{γ} Strom aus (γ, e^-) -Prozessen durch externe Gammastrahlung [A]
 $I_{n,t}$ Strom aus (n, γ, e^-) - und (n, β^-) -Prozessen durch thermische Neutronen [A]
 $I_{n,e}$ Strom aus (n, γ, e^-) - und (n, β^-) -Prozessen durch epithermische Neutronen [A]

Außerdem wird angenommen, daß jeder der einzelnen Teilströme proportional zu seinem verursachenden Fluß ist :

$$I = S_{\gamma} \Phi_{\gamma} + S_{n,t} \Phi_{n,t} + S_{n,e} \Phi_{n,e} \quad [2.8]$$

mit: S_{γ} Empfindlichkeit für externe γ -Strahlung [Acm^2s]
 $S_{n,t}$ Empfindlichkeit für thermische Neutronen [Acm^2s]
 $S_{n,e}$ Empfindlichkeit für epithermische Neutronen [Acm^2s]
 Φ_{γ} Externer γ -Fluß [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
 $\Phi_{n,t}$ Thermischer Neutronenfluß [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
 $\Phi_{n,e}$ Epithermischer Neutronenfluß [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

Die Größen $S_{n,t}$ und $S_{n,e}$ können für verschiedene SPN-Detektoren gleicher Geometrie und unterschiedener Emittmaterialien bestimmt werden. Dazu sind die in Tabelle 2.2 aufgeführten Detektoren zusammen mit Aktivierungsproben bestrahlt und der Detektorstrom während der Bestrahlung gemessen worden. Die Werte, die für die Kalibrierung verwendet wurden, sind in Tabelle 2.3 zusammengefaßt. Alle Werte sind um den Hintergrundstrom der Detektoren korrigiert. Der Hintergrundstrom ist der Strom, den die Meßapparatur nach dem Einführen der Detektoren vor dem Start des Reaktors anzeigt.

	Co1	Er2	Hf3	Rh6	Pb7
Materialien:					
Emitter	Co	Er	Hf	Rh	Pb
Isolation	Al ₂ O ₃ Pulver				
Kollektor	Inconel 600				
Kabelhülle	Inconel 600				
Leitungsdrähte	Inconel 600				
Kabelisolation	MgO Pulver			Al ₂ O ₃ Pulver	
Abmessungen					
Emitterradius [mm]	0,5				
Außenradius Isolation [mm]	0,85				
Außenradius Kollektor [mm]	1,1				
Kabellänge [m]	10				9,2
Eff. Emittlerlänge [mm]	60				
Massen [g]					
Emitter	0,39138	0,41543	0,6337	0,56704	0,52732
Isolation	366	366	366	366	366
Kollektor	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62

Tabelle 2.2: Technische Daten der verwendeten Detektoren

Detektor	Co1	Er2	Hf3	Rh6	Pb7
I_{E8} [nA]	0,23	0,878	0,65	6,37	0,33
I_{F3} [nA]	0,111	0,558	0,467	3,76	0,274

Tabelle 2.3: Für die Kalibrierung verwendete Werte der Detektorströme /9/

Anstatt der absoluten Messung des externen Gammaflusses Φ_γ , wurde I_γ direkt bestimmt. Dazu wurde mit einer numerischen Berechnung die Gammaempfindlichkeit α_{pb} der verschiedenen SPN-Detektoren relativ zu der eines baugleichen äquivalenten Self Powered Gamma (SPG) Detektors mit Bleiemitter (Pb-SPGD) bestimmt. Zusammen mit den SPN-Detektoren wurde dann das Signal $I_{\gamma,Pb}$ eines solchen Detektors (Pb7) gemessen und bestimmt. Damit gilt :

$$\alpha_{Pb,i} = \frac{I_{\gamma,i}}{I_{\gamma,Pb7}} \quad i \in (Co1, Er2, Hf3, Rh6) \quad [2.9]$$

Für die numerische Berechnung von α_{pb} wurden folgende Annahmen gemacht /9/:

- Der Gammafluß ist im Detektor homogen.
- Das Gammaenergiespektrum entspricht im ganzen Reaktor dem prompten Gammaenergiespektrum einer Spaltung von U-235 mit thermischen Neutronen.
- Der photoelektrische Absorptionswirkungsquerschnitt für Photonen berechnet sich nach Pratt-Gavrila.
- Der gesamte Absorptionsquerschnitt ist 1,25 mal der Absorptionsquerschnitt der K-Schale.
- Paar und Tripletbildung werden vernachlässigt.
- Die minimale Energie für Elektronen zum Durchdringen der Isolierung ist für alle verwendeten Detektoren $E_{Min}=0,482MeV$
- Der Energieverlust von Elektronen in Materie durch Ionisationsprozesse berechnet sich nach Bethe-Bloch.
- Die Elektronen geben Energie durch Bremsstrahlung ab.
- Der Detektor wird für die näherungsweise Berechnung unendlich lang angenommen

Die berechneten Werte für α_{pb} sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

Detektor	Co1	Er2	Hf3	Rh6	Pb7
Kernladungszahl	27	68	72	45	82
Elektronendichte [$10^{24}/cm^3$]	2,4555	2,22	3,2332	3,268	2,705
α_{pb}	0,1305	0,63824	0,61307	0,17601	1

Tabelle 2.4: Berechnete Werte für die relative Gammaempfindlichkeit α_{pb} /9/

Mit Hilfe der relativen Empfindlichkeit α_{pb} der SPN-Detektoren für externe Gammastrahlung aus Tabelle 2.4 und den gemessenen Detektorströmen des Pb-SPGD Pb7 in Tabelle 2.3 läßt sich der durch externe Gammastrahlung produzierte Detektorstrom der SPN-Detektoren Co1, Er2, Hf3 und Rh6 berechnen. Für den Strom I_n , der durch den Neutronenfluß erzeugt wird, gilt :

$$I_{n,i} = I_i - \alpha_{Pb,i} I_{\gamma,Pb} \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta I_{n,i}}{I_{n,i}} = \frac{\Delta I_i + \alpha_{Pb,i} \Delta I_{\gamma,Pb}}{I_i - \alpha_{Pb,i} I_{\gamma,Pb}} \quad [2.10]$$

Aus einem in diesem Reaktor durchgeführten Unfolding Experiment sind außerdem noch die Verhältnisse zwischen thermischen und epithermischen Neutronenenergien für die Meßkanäle E8 ($\Phi_t/\Phi_e=38$) und F3 ($\Phi_t/\Phi_e=15$) bekannt /9/. Das Verhältnis des thermischen Neutronenflusses Φ_t zum epithermischen Neutronenfluß Φ_e ist in beiden Meßkanälen unterschiedlich. Unter dieser Voraussetzung ist das lineare Gleichungssystem

$$I_{n,E8} = S_t \Phi_{t,E8} + S_e \Phi_{e,E8} \quad \text{und} \quad I_{n,F3} = S_t \Phi_{t,F3} + S_e \Phi_{e,F3} \quad [2.11]$$

für die Unbekannten S_t und S_e eindeutig lösbar. Die Ergebnisse für die Berechnung von S_t und S_e sind (in $\text{Acm}^2\text{s pro cm}$ Emitterlänge) in Tabelle 2.5 zusammengefaßt.

Detektor	Co1	Er2	Hf3	Rh6 gesamt	Rh6 verzögert	Rh6 prompt
I_{E8} [nA]	23	878	65	637	577	6
I_{F3} [nA]	111	558	467	376	339	37
$I_{n,E8}$ [nA]	21	68	48	631	577	54
$I_{n,F3}$ [nA]	95	38	3	371	339	32
$\Delta I_n / I_n$ [%]	112	43	54	3	3	37
S_t [$10^{-22} \times \text{A} \times \text{cm} \times \text{s}$]	487	128	724	118	108	101
$\Delta S_t / S_t$ [%]	420	313	407	201	200	304
S_e [$10^{-22} \times \text{A} \times \text{cm} \times \text{s}$]	62	122	134	126	115	112
$\Delta S_e / S_e$ [%]	4834	505	422	227	226	427
S_e / S_t	127	951	1841	1065	1061	1114
I_{Res} / σ_{th}	203	874	1862	7,58/11,27*	7,58/11,27*	7,58/11,27*

Tabelle 2.5: Ergebnisse der Kalibrierung von Signalen der SPN-Detektoren auf den absoluten Neutronenfluß (*Gemessene Werte : $\sigma_{th}=144,5$ barn und $I_{Res}=1629$ barn) /9/

Mit den auf diese Weise erhaltenen Ergebnissen für die materialabhängigen Emitterempfindlichkeiten für den thermischen (S_t) und epithermischen Neutronenfluß (S_e) ergibt sich nun theoretisch die Möglichkeit, Neutronenflußschwankungen quantitativ unabhängig vom Emittermaterial des verwendeten SPN-Detektors bewerten zu können. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit im praktischen Experiment ein durch mechanische Schwingungen verursachtes Abschwächungsrauschen innerhalb eines Forschungsreaktors unabhängig vom verwendeten Emittermaterial mit SPN-Detektoren gemessen werden kann.

2.3. Übertragung von mechanischen Schwingungen in Signale von SPN-Detektoren

Um die Meßbarkeit mechanischer Schwingungen mit Hilfe von Neutronenflußsignalen zu untersuchen, ist ein Plastikzylinder mit 5 cm Durchmesser als rotierender Cadmium-Absorber in einen Versuchskanal (F3) des Leichtwasser Poolreaktors sowjetischer Bauart (WWR-C) am Institut of Nuclear Technology der Technischen Universität Budapest eingelassen worden. Auf der Oberfläche des Zylinders sind drei Cd-Streifen im Abstand von 120° in dafür vorgesehene Nuten geklebt worden. Als absoluter Wert für die dadurch verursachte Reaktivitätsänderung des Reaktors wurden 21 cent berechnet. Der Plastikzylinder wurde über eine in einem Aluminiumrohr geführte Welle von einem Elektromotor außerhalb des Reaktors angetrieben. Die Rotationsfrequenz war einstellbar zwischen 4 Hz und 8 Hz. Durch die Rotation des Absorbers innerhalb des räumlich abfallenden Neutronenfluß am Rand des Reaktorkerns wurde eine periodische Reaktivitätsänderung von ungefähr $\pm 0,2$ cent aufgeprägt. Die daraus resultierende Fluktuation des Neutronenflusses wurde

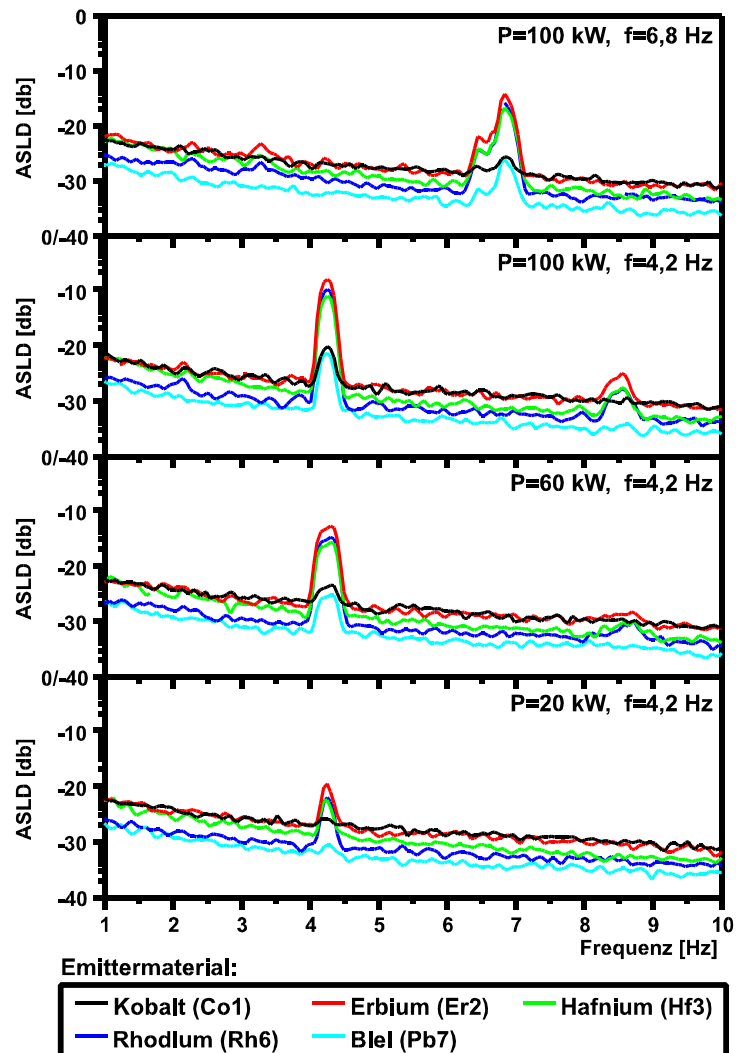


Bild 2.4: Abbildung der Schwingungen in den ASLD der gemessenen Neutronenflußsignale als Folge eines rotierenden Cd-Absorbers im Reaktor

zeitgleich mit unterschiedlichen SPN-Detektoren, ausgestattet mit verschiedenen Emittiermaterialien (Kobalt: Co1, Erbium: Er2, Hafnium: Hf3, Rhodium Rh6 und Blei: Pb7), im Kanal E8 gemessen worden. Die Messungen wurden bei drei Leistungsstufen (20kW, 60kW und 100kW thermische Leistung) des Reaktors mit einer Rotationsfrequenz des Elektromotors von 4,2 Hz und 6,8 Hz ausgeführt. Es ist jeweils für eine Dauer von 19 Minuten mit einer Abtastrate von 100 Hz gemessen worden. Der Wechselspannungsanteil des Signals ist mit einem Bandpaßfilter von 0,3 Hz bis 40 Hz gefiltert worden. Der Eingangswiderstand der Verstärker betrug 1 Megaohm mit Ausnahme des Detektors Pb7, der über einen Eingangswiderstand von 2 Megaohm angeschlossen worden ist. Die Fourier-Transformation der gemessenen Zeitreihen wurden mit einer Fensterlänge von 2048 Pkt., 50 % Überlappung und Hammig-Fensterfunktion berechnet.

In den resultierenden autospektralen Leistungsdichten (Bild 2.4) sind bei unterschiedlich eingestellten Rotationsfrequenzen des Absorbers jeweils ein klare Peaks in allen Neutronenflußspektren bei der jeweils eingestellten Rotationsfrequenz zu erkennen. Daraus ist klar ersichtlich, daß sich hier die mechanischen Schwingungen im Reaktor gut meßbar in die Neutronenflußfluktuationen übertragen.

Es ist jedoch ebenfalls deutlich erkennbar, daß die Magnituden in Abhängigkeit des verwendeten SPN-Detektors stark unterschiedlich sind. Da die Detektoren geometrisch gleich aufgebaut sind, jedoch unterschiedliche Emitter haben, muß eine Abhängigkeit vom verwendeten Emittermaterial vorliegen.

Für die Vergleichbarkeit von Messungen, die in verschiedenen Kernreaktoren mit zum Teil unterschiedlichen Sensoren ermittelt, werden ist eine vom Emittermaterial unabhängige Magnitude wünschenswert. Eine Normierung der gemessenen Schwingungsmagnitudo auf die Empfindlichkeit des verwendeten Emittermaterial ist also der naheliegende nächste Schritt:

Zur Berechnung läßt sich der fluktuierende Anteil des Detektorsignals für diese Messung in vier Komponenten zerlegen:

$$I(t) = I_R(t) + I_{t,AC}(t) + I_{e,AC}(t) + I_{\gamma,AC}(t) \quad [2.12]$$

Die letzten drei Terme in Gleichung 2.12 sind die Wechselstromanteile die von dem rotierenden Absorber durch eine Modulation des thermischen, epithermischen und Gammafluß verursacht werden. Der erste Term bezeichnet das Hintergrundrauschen und umfaßt das gesamte übrige Neutronen- und Gammaflußrauschen, sowie das elektronische Rauschen der Meßkette. Das Autospektrum des Detektorsignals ist dann ausgedrückt durch diese Terme :

$$\begin{aligned} ASLD = \langle |\tilde{I}|^2 \rangle &= \langle |\tilde{I}_R|^2 \rangle + \langle |\tilde{I}_t|^2 \rangle + \langle |\tilde{I}_e|^2 \rangle + \langle |\tilde{I}_g|^2 \rangle + \\ &2 \langle Re(\tilde{I}_R \tilde{I}_t) \rangle + 2 \langle Re(\tilde{I}_R \tilde{I}_e) \rangle + 2 \langle Re(\tilde{I}_R \tilde{I}_g) \rangle + \\ &2 \langle Re(\tilde{I}_t \tilde{I}_e) \rangle + 2 \langle Re(\tilde{I}_t \tilde{I}_g) \rangle + 2 \langle Re(\tilde{I}_e \tilde{I}_g) \rangle \end{aligned} \quad [2.13]$$

Das Hintergrundrauschen ist stochastisch und daher nicht korreliert mit den anderen Signalanteilen, so daß die Terme in der zweiten Zeile von Gleichung 2.13 gleich null sind. Um die dritte Zeile exakt zu berechnen, müßte die Phasenbeziehung zwischen den Termen bekannt sein. Da aber insbesondere der thermische und epithermische Anteil immer zusammen gemessen werden, lassen sich die Phasenbeziehungen nicht aus den Meßdaten ermitteln. Nur für die drei Fälle, daß

- 1 alle drei Anteil nicht miteinander korreliert sind (alle Terme in der dritten Zeile von 2.13 sind Null), oder
- 2 der Anteil aus dem thermischen und epithermischen Neutronenfluß vollständig korreliert ist (dann ist der thermisch Neutronenfluß proportional zur Summe von I_t und I_e) oder
- 3 alle drei Anteile miteinander korreliert sind (dann ist der thermisch Neutronenfluß proportional zur Summe von I_g , I_t und I_e . Damit ist die Voraussetzung für das Normieren des fluktuierenden Signalanteils auf das Kurzzeitmittelwertsignal erfüllt.)

Letzteres gilt nur dann, wenn die Detektoren zu 100% prompt sind, andernfalls muß auf den prompten Anteil des DC Signals normiert werden. Unter der Voraussetzung, daß

$$\frac{\langle |\tilde{\Phi}_i|^2 \rangle}{\langle |\tilde{\Phi}_e|^2 \rangle} = \frac{\Phi_i^2}{\Phi_e^2} \quad \text{und} \quad \tilde{I}_{i,AC}(f) = S_i \tilde{\Phi}_i(f) \quad [2.14]$$

gilt, läßt sich für die oben aufgezählten drei Fälle aus dem Signal jedes SPN-Detektors in Kanal E8 das Autospektrum des thermischen Neutronenflusses berechnen /10/. Die so berechneten Spektren sind in Bild 2.5 für Fall 1, in Bild 2.6 für Fall 2 und in Bild 2.7 für Fall 3 dargestellt.

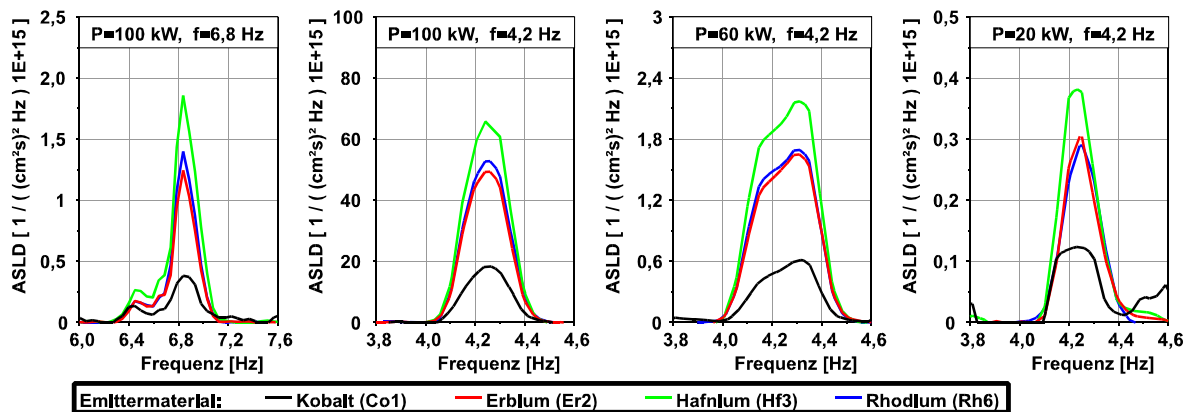


Bild 2.5: ASLDs berechnet unter den Voraussetzungen nach Fall 1: Stromanteile aus Gamma-thermischem und epithermischem Neutronenfluß sind unkorreliert angenommen

In Bild 2.5 stimmen lediglich die Graphen des Rh- und Er-Detektors überein, während der Graph des Hf- Detektors über diesen und der des Co Detektors darunter liegt. Die Höhe der Magnitude spiegelt die Empfindlichkeit der Detektoren bezüglich ihres relativen Signalanteils aus epithermischen Neutronen wieder. Das bedeutet, die Annahme, daß die Anteile nicht korreliert sind (Fall 1), ist falsch.

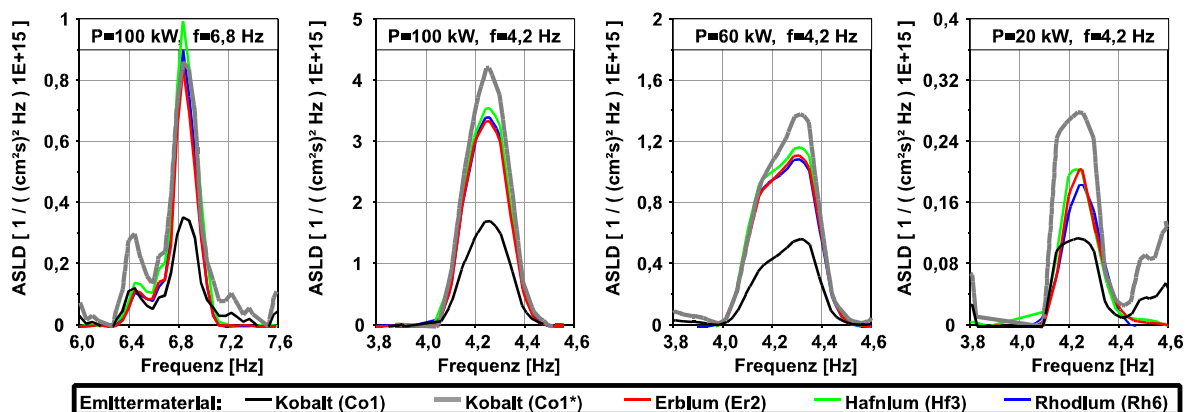


Bild 2.6: ASLDs berechnet unter den Voraussetzungen nach Fall 2: Die Stromanteile aus thermischem und epithermischem Neutronenfluß sind korreliert angenommen

Für die Berechnung der Kurven in Bild 2.6 wurde unterstellt, das der thermische und epithermische Neutronenflußanteil korreliert sind (Fall 2). Für den Co1 Detektor sind hier zwei Linien eingetragen.

Die durchgezogenen Linien stellen die Graphen dar, die mit den Werten für S und S_e aus Tabelle 2.5 berechnet worden sind. Allerdings fällt auf, daß für alle Detektoren die prompte Empfindlichkeit ungefähr proportional zu ihrem mikroskopischen Wirkungsquerschnitt bzw. Resonanzintegral ist, und daß das Verhältnis $S_l/\sigma_{th} \sim S_e/I_{Res} \sim 0,8 \text{ Acm}^{-1}\text{s}$ ist. Einzige Ausnahme ist hier der Wert $S_l/\sigma_{th}=1,3 \text{ Acm}^{-1}\text{s}$ für den Co1 Detektor. Da es keine physikalischen Unterschiede zwischen den Detektoren gibt, die diese Differenz erklären könnte, ist davon auszugehen, daß es sich bei dem Wert $S_{l,Co1} = 0,487 \cdot 10^{-22} \text{ Acms}$ um einen Meßfehler handelt. Setzt man auch hier den Wert 0,8 für S_l/σ_{th} an, so folgt daraus ein Wert von $0,3 \cdot 10^{-22} \text{ Acms}$. Die gepunktet eingetragenen Linien sind mit dem korrigierten Wert für den Co1 Detektor berechnet. Es zeigt sich damit, daß hier die Graphen der Detektoren ER2,Hf3,Rh5 gut übereinstimmen. Die beiden Graphen des Co1 Detektors umschließen die anderen Detektoren, so daß auch der Co1 Detektor innerhalb des Meßfehlers mit den übrigen Detektoren übereinstimmt. Damit hat sich die Annahme bestätigt, daß der thermische und epithermische Signalanteil korreliert sind.

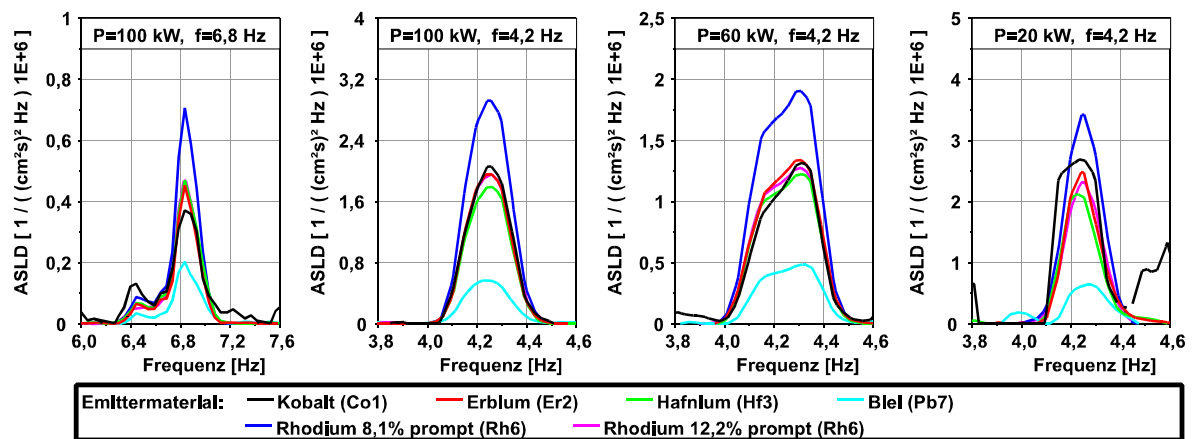


Bild 2.7: ASLDs berechnet unter Voraussetzungen nach Fall 3: Alle Stromanteile aus Gamma-, thermischem und epithermischem Neutronenfluß sind korreliert angenommen

In Bild 2.7 ist der dritte Fall dargestellt, die Normierung auf den Mittelwert des Detektorsignals. Hier stimmen die Graphen der prompten Detektoren Co1, Er2 und Hf3 gut überein. Der Graph des Pb7 SPG-Detektors (Hellblaue Kurve) liegt jedoch unerwarteterweise in allen Messungen unterhalb der anderen Graphen. Obwohl der Bleiemitter des Pb7 SPG-Detektors prompt ist, reagiert er nicht zu 100% prompt auf Änderungen des Gammaflusses der durch Fluktuationen des Neutronenflusses verursacht wird. Die Ursache ist in einem parasitären, ungewolltem zusätzlichem lokalem Gammaflußanteil zu finden. Der SPG-Detektor ist innerhalb eines Aluminiumführungsrohres in seine Position im Reaktor gesteckt worden. Dieses Verfahren ist für die Betriebsmannschaft des Forschungsreaktors gängige und bewährte Praxis, denn aufgrund der geringen Dichte und der kurzen Halbwertszeit des Aluminiums lassen sich die Rohre gut handhaben und sind bereits kurze Zeit nach der Bestrahlung im Reaktorkern wieder ohne zusätzliche Strahlenschutzmaßnahmen bearbeitbar. Für die Experimente mit dem SPG-Detektor war die Umhüllung durch das Aluminium aber von Nachteil, denn insbesondere aktiviertes Al-28 erhöht bei aufeinanderfolgenden Messungen den Gamma-Strahlungshintergrund im Bestrahlungskanal. Deshalb liefert eine Normierung auf den DC-Wert des Detektors mit Bleiemitter (PB1) kein zu den SPN-Detektoren vergleichbares Ergebnis /10/.

Die Graphen für den Rh6 Detektor liegen dagegen in allen Messungen über denen der anderen Detektoren. Bei der Normierung ist hier als prompter Signalanteil 8,1% des absoluten Signals verwendet worden. Dieser Anteil ist offensichtlich zu niedrig. Unterstellt man versuchsweise ein übereinstimmendes Ergebnis mit den anderen SPN-Detektoren (alle Kurven liegen übereinander) , so ergibt sich für den Rh6 Detektor ein prompter Anteil von 12,2 % des absoluten Signals.

Insgesamt ist damit die Voraussetzung erfüllt, das alle Signalanteile korreliert sind (Fall 3), so daß das Normierungsverfahren bei der Analyse von Neutronenflußsignalen aus unterschiedlichen Detektoren zulässig ist, wenn der prompte Anteil des Detektorsignals bekannt ist.

Durch die Normierung der Neutronenflußsignale auf ihren Kurzzeitmittelwert, können mechanische Schwingungen im Abschwächungsrauschen der Neutronenflußsignale von SPN-Detektoren unabhängig von deren Emittiermaterial gemessen werden, sofern bekannte prompte Signalanteil vorhanden sind.

2.4 Kalibrierung durch simultane Messung von Neutronenfluß und Beschleunigung

Die Abbildung der Bauteilschwingungen von Reaktordruckbehälter, Kernbehälter und thermischem Schild in die Signale der Außenkern-Neutronenflußinstrumentierung ist bereits in vielen früheren Arbeiten nachgewiesen worden /11, 12, 13, 14, 15/. Eine quantitative Bestimmung der Schwingungsamplitude allein durch Analyse der Neutronenflußsignale ist jedoch nicht möglich. Einen Ausweg bietet die Bestimmung von Skalierungsfaktoren durch gleichzeitige Messung der Neutronenflußschwankung und der mechanischen Schwingungsamplitude. Mit Beschleunigungsaufnehmern an der Außenfläche des Reaktordruckbehälters und den Signalen der Außenkerninstrumentierung wurden Skalierungsfaktoren (SF) ermittelt, mit denen sich Schwingungen im Neutronenflußsignal der Außenkammern auf Relativbewegungen der Reaktorbehälter umrechnen lassen /13/ .

Bezüglich der Schwingungen von Kerneinbauten enthalten die Neutronenflußsignale der Außenkerninstrumentierung deutlich weniger Informationen über Schwingungen von einzelnen Brennelementen und Instrumentierungslanzen als die SPN-Signale der im Reaktorkern positionierten Leistungsverteilungsdichteinstrumentierung (LVD-Instrumentierung). Die Schwingungen von Brennelementen und Instrumentierungslanzen sind in den Neutronenflußsignalen der SPN-Detektoren bereits qualitativ nachgewiesen worden /15/ . Zur Quantifizierung der in SPN-Signalen detektierten Bauteilschwingungen und zur nachfolgenden Berechnung von Skalierungsfaktoren sind erstmals in zwei Instrumentierungslanzen des Kernkraftwerks Obrigheim (DWR, 350 MW_e) biaxiale, piezoelektrische Miniaturbeschleunigungsaufnehmer als Sonderinstrumentierung für die Dauer eines Brennelementzyklus eingebaut worden. Das Schwingungsverhalten der Reaktoreinbauten konnte mit dieser Sonderinstrumentierung bei uneingeschränktem Leistungsbetrieb gemessen werden /21/ .

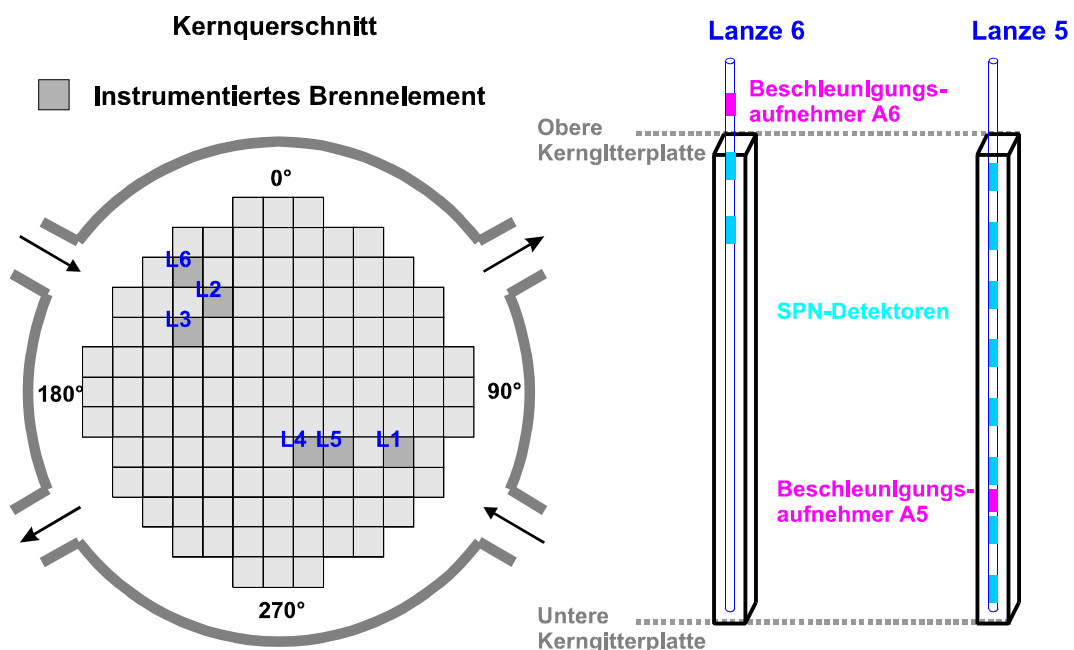


Bild 2.8: Kernquerschnitt und Instrumentierungslanzen mit Meßstellenanordnung

Zusätzlich zur Betriebsinstrumentierung mit SPN-Detektoren wurden zwei Instrumentierungslanzen mit biaxialen Beschleunigungssensoren bestückt. In der ersten Lanze (L5) wurde der Beschleunigungssensor etwa 710 Millimeter oberhalb der unteren Kerngitterplatte im Kern installiert. In der zweiten Lanze (L6) wurde er etwa 260 Millimeter oberhalb der oberen Kerngitterplatte außerhalb des Reaktorkerns positioniert, weil die vorausberechnete zu erwartende Lebensdauer im Neutronen- und Gammafluß des Kerns bei Vollast nur wenige Stunden betrug. Bild 2.8 zeigt schematisch den Kernquerschnitt des Kernkraftwerks Obrigheim und die Einbaupositionen der Beschleunigungssensoren und SPN-Detektoren.

Der Innendurchmesser der Lanzenrohre beträgt sechs Millimeter, der Außendurchmesser des Beschleunigungssensors aber nur vier Millimeter. Um eine möglichst starre Ankoppelung zu erreichen, wurden die Beschleunigungssensoren mit den Metallmantelkabeln der SPN-Detektoren verlötet und im Lanzenrohr verkeilt. In beiden Instrumentierungslanzen befanden sich SPN-Detektoren (SPN5-2 bzw. SPN6-2) mit 300 Millimeter langen Hafniumemittern in unmittelbarer Nähe der Beschleunigungssensoren

Die Aufzeichnung der Beschleunigungs- und Neutronenflußsignale erfolgte simultan, d.h. alle Kanäle wurden über Halteglieder per A/D-Wandlerkarte und Meßrechner zeitgleich abgetastet.

Die autospektralen Leistungsdichten eines mit dem Beschleunigungsaufnehmer in Lanze 5 (AX5) gemessenen Signals in X- Richtung und die auf den Signalmittelwert normierte autospektrale Leistungsdichte des SPN-Detektors unterhalb des Beschleunigungsaufnehmers (SPN5-2) zeigen beide die Abbildung einer Lanzenschwingung bei 36 Hz. (Bild 2.9 rote Kurven im ersten und zweiten Achsenkreuz).

Die Kohärenz zwischen Beschleunigungs- und Neutronenflußrauschsignal zeigt bei dieser Frequenz ebenfalls einen deutlichen Peak (Bild 2.9 rote Kurven im dritten Achsenkreuz). Zum Zeitpunkt dieser Messung wurde der Reaktor mit etwa 60 Prozent der thermischen Reaktorleistung gefahren.

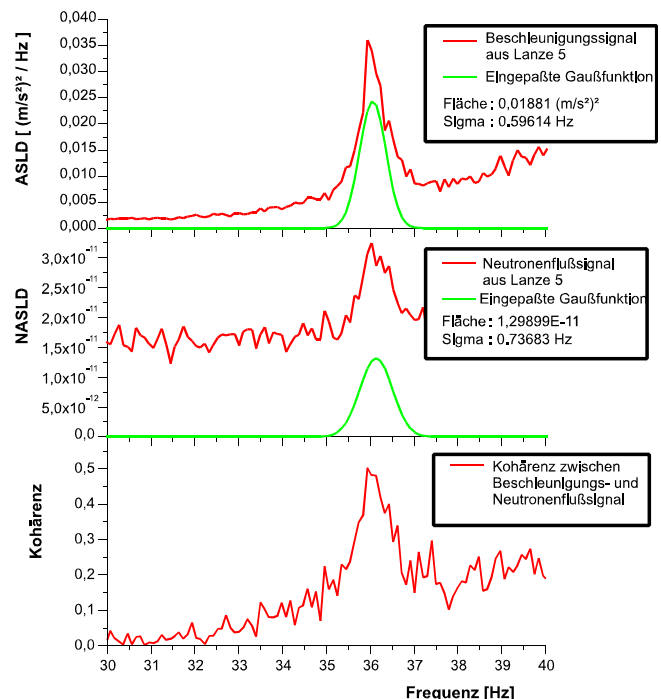


Bild 2.9: Instrumentierungslanzenschwingung

Im dargestellten Ausschnitt ist die Schwingung der Instrumentierungslanze in allen drei Kurven um 36 Hz erkennbar. Die Korrelation, d.h. der gemeinsame Anteil in beiden Signalen, beträgt etwa 50 Prozent, während die Korrelation der Signale von SPN5-2 und Beschleunigungsaufnehmer A5Y (hier nicht dargestellt) etwa 16 Prozent beträgt. Dieses Verhalten läßt auf eine Orientierung der Meßrichtung des

Aufnehmers A5X auf die Hauptschwingrichtung der Lanze schließen. Diese Orientierung ist relativ, da eine absolute Orientierung die Kenntnis der räumliche Ausrichtung des Beschleunigungsaufnehmers im Reaktor voraussetzt.

Im Frequenzbereich zwischen 4 Hz bis 8 Hz ist eine Brennelementschwingung, bei etwa 5,6 Hz in den Spektren des Beschleunigungsaufnehmers aus Lanze sechs (A6Y) und in der auf den Signalmittelwert normierten autospektralen Leistungsdichte eines SPN-Detektors aus LVD-Lanze zwei (SPN2-2) und in der Kohärenz beider Signale erkennbar (Bild 2.10). Im Vergleich mit Bild 2.9 ist erkennbar, dass hier offensichtlich mehrere Schwingungen mit leicht unterschiedlichen Frequenzen überlagert sind (Die Peaks in den roten Kurven sind breiter um die Eigenfrequenz verteilt).

Anhand des Kernquerschnittes (Bild 2.8) ist ersichtlich, daß die auf angrenzenden Positionen stehenden Brennelemente, in denen der Beschleunigungsaufnehmer A6 und der SPN-Detektor SPN2-2 positioniert wurden, von weiteren Brennelementen umgeben sind. Zwei davon sind gemeinsame Nachbarn, so daß von insgesamt vier Brennelementschwingungen ausgegangen werden muß, die in dem gemeinsamen Signalanteil sichtbar sein könnten. Aufgrund der unterschiedlichen Übertragungsmechanismen sind die Abbildungen der benachbarten Brennelement in den beiden Signalen verschieden:

Die mit der jeweiligen Eigenfrequenz der Brennelemente erzeugten Schwankungen im Neutronenfluß übertragen sich durch das Kühlmittel auf benachbarte Brennelemente. SPN-Detektoren registrieren also zusätzlich zu den Schwingungen des Brennelementes in dem sie positioniert sind auch noch Schwingungen der benachbarten Brennelemente.

Die Brennelement sind mechanisch im unteren und oberen Kerngitter gelagert. Eine andere direkte Koppelung zwischen zwei benachbarten Brennelementen ist nicht vorhanden. So werden zwar Schwingungen des gesamten oberen Kerngitterverbandes auf alle Brennelemente übertragen, jedoch nicht individuelle Schwingungen eines Brennelementes auf ein anderes.

Beschleunigungsaufnehmer registrieren also in Bezug auf die Brennelementschwingungen nur die Schwingungen des Brennelementes in dem sie positioniert sind und nicht zusätzlich Schwingungen der benachbarten Brennelemente.

Diese beiden Mechanismen sind unmittelbar anhand der autospektralen Leistungsdichten des Beschleunigungs- und SPN-Detektors (Bild 2.10 rote Kurven im ersten und zweiten Achsenkreuz) ablesbar.

Die Berechnung des Skalierungsfaktors für die Übertragung von mechanischen Schwingungen in Schwingungen, die im Neutronenflußrauschen nachweisbar sind, erfolgte hier auf numerischem Weg /20/. Hierzu werden Gauß-Verteilungen in die Peaks der autospektralen Leistungsdichten eingepaßt und diese um den Rauschuntergrund bereinigt. Die anschließende numerische Integration erfolgt über eine Breite von drei Standardabweichungen um die Frequenz der Schwingung (Bild 2.9). Die zweifach Integration des Beschleunigungssignals erfolgte näherungsweise durch zweifache Division mit der Kreisfrequenz der Schwingung. Anschließend wurde der Skalierungsfaktor als das Verhältnis der Flächen beider Gauß-Verteilungen berechnet.

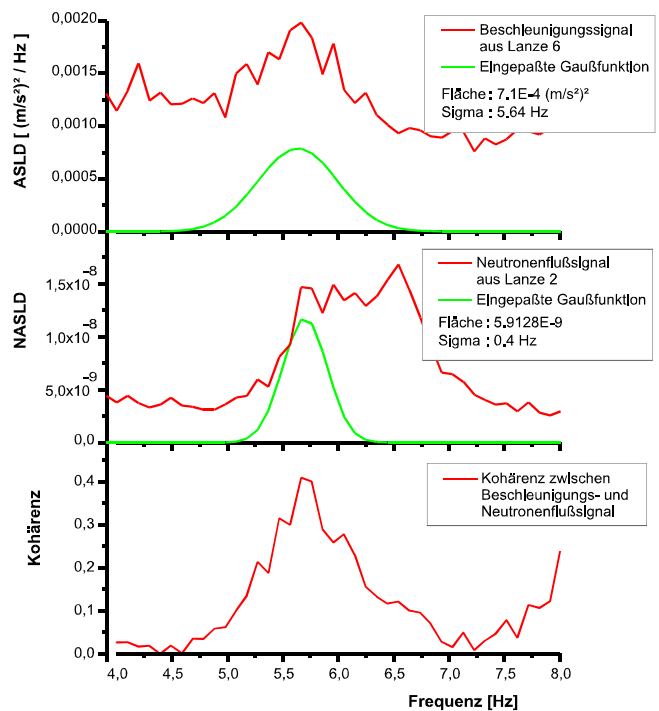


Bild 2.10: BE-Schwingungsmodus bei 5,8 Hz

Zuvor wurde an einem Versuchsstand mit dem zweiachsigen Beschleunigungssensor in einem Rohr und zwei Relativwegaufnehmern an der Außenfläche des Rohres bei verschiedenen Anregungen nachgewiesen, daß sich durch zweifache Integration bei geeigneter Wahl der Berechnungsparameter Relativwegsignale aus den Beschleunigungssignalen berechnen lassen, die mit denen der zeitgleich an dem Relativwegaufnehmer gemessenen übereinstimmen /20/.

Bauteilschwingung	Frequenz [Hz]	Integral über Peak im Neutronenfluß	Integral über Auslenkung [mm]	Skalierungsfaktor [1/mm]
Brennelement	5,8	77,9-E06	20,0-E03	3,9-E03
Lanze	36,2	3,6-E06	2,7-E03	1,3-E03

Tabelle 2.6: Skalierungsfaktoren für die Übertragung von mechanischen Schwingungen in Neutronenflußsignale

Die berechneten Skalierungsfaktoren für die Übertragung der mechanischen Schwingungen eines Brennelementes bei 5,8 Hz und einer Instrumentierungslanze bei 36,2 Hz in die Neutronenflußsignale der SPN-Detektoren sind in Tabelle 2.6 aufgelistet. Hiermit sind exemplarisch für wesentliche RDB-Einbauten des 350 MW_e Reaktors Skalierungsfaktoren für die Übertragung von mechanischen Schwingungen in die Neutronenflußsignale der SPN-Detektoren ermittelt worden, die nun eine quantitative Schwingungsüberwachung der Reaktorkerneinbauten an Hand der Neutronenrauschenanalyse in diesem Reaktor ermöglichen.

2.5 Signalseparation mittels Multi-Sensor-Analyse

Das Mittelwertsignal eines Sensors ist oft überlagert mit deterministischen und stochastischen Rauschanteilen. Deterministische Signale können mathematisch exakt in ihrem Zeitverlauf beschrieben werden, stochastische Signale sind in ihrem Zeitverlauf zufällig und können bestenfalls durch Wahrscheinlichkeitsaussagen beschrieben werden. Eine Untergruppe der deterministischen Signale sind die periodischen, sich in einem festen Zeitintervall ständig wiederholenden Signale. Sie können besonders einfach in den Frequenzbereich transformiert werden. Zur detaillierten mathematischen Beschreibung und Klassifikation von Rauschsignalen siehe [22, 3].

Werden Signale von mehreren Sensoren zeitgleich aufgezeichnet, lassen sich die Signalanteile in kohärente, in mehreren Signalen gemeinsam enthaltene, und inkohärente, voneinander unabhängige, Signalkomponenten zerlegen.

Die Multi-Sensor-Analyse ermöglicht die Separation von gemischten Signalanteilen aus verschiedenen Signalquellen in mit mehreren Sensoren zeitgleich gemessenen Signalen.

Das Ziel ist eine „Entmischung“ der Signale im Frequenzraum, so daß jeder Signalquelle ein eigenes Leistungsdichtespektrum zugeordnet werden kann.

Für periodische Signale läßt sich das Problem im Frequenzraum allgemein wie folgt formulieren :

$$\tilde{X}_j(f) = \sum_i^n \tilde{a}_{ij}(f) \tilde{s}_i(f) \quad [2.15]$$

mit: x_j Meßsignal gemessen mit Detektor j
 s_i Signalquelle i
 a_{ij} Übertragungsfunktion des Signals i zum Detektor j
 n Anzahl der Signalquellen

Die Matrixelemente a_{ij} sind in der Regel unbekannt. Für zwei Sensoren deren Signale jeweils Signalanteile aus gemeinsamen Quellen s_k und solche aus verschiedenen, unabhängigen Quellen haben, lassen sich die gemeinsamen Signalanteile mit der Kohärenzfunktion aus dem Meßsignal heraus separieren. Für den Signalanteil g aus der gemeinsamen Quelle gilt dann:

$$\langle |\tilde{g}_i|^2 \rangle = \langle |\tilde{a}_{kj} s_k|^2 \rangle = \langle |\tilde{x}_i|^2 \rangle \text{coh}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j) \quad i, j \in \{1, 2\} \quad i \neq j \quad [2.16]$$

Bei der Verallgemeinerung dieses Verfahrens auf mehr als zwei Sensoren muß die Kohärenzfunktion bzw. die Kreuzspektralfunktion, durch die Kreuzspektralmatrix $R(f)$ ersetzt werden.

$$R(f) = \begin{bmatrix} \langle \tilde{x}_1 \tilde{x}_1^* \rangle & \cdots & \langle \tilde{x}_n \tilde{x}_1^* \rangle \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \langle \tilde{x}_1 \tilde{x}_n^* \rangle & \cdots & \langle \tilde{x}_n \tilde{x}_n^* \rangle \end{bmatrix} \quad [2.17]$$

Wenn die Quellen in 2.15 unabhängig sind, sind die Eigenwerte von R gleich $\langle |\tilde{s}_i|^2 \rangle / 16$. Das Problem in der Praxis ist, daß sich mit entsprechenden numerischen Methoden zwar die Matrix R diagonalisieren läßt, aber die errechneten Eigenwerte sich nicht den Quellen zuordnen lassen. So erhält man für jede Frequenz einen Satz von Eigenwerten, der noch der entsprechenden Quelle zugeordnet werden muß. Die Zuordnung läßt sich aber nur mit der Einführung zusätzlicher Bedingungen wie z.B. der Stetigkeit der Quellenautospektren etc. realisieren. Dennoch ist es ein praktikables Verfahren bei der Suche nach einer begrenzten Anzahl von unbekanntem Quellen in einem gemischtem Meßsignal /17/.

Gegenüber der allgemeinen Aufgabenstellung für die Signalseparation ohne Randbedingungen (blind signal separation) sind die praktischen Vorgaben in den im folgenden betrachteten Kernkraftwerken stark einschränkend. Die räumliche Lage der Sensoren ist vorgegeben und so liegen bei kohärenten Signalanteilen durch Vorgabe des Schwingungsmodes die Phasenbeziehungen der einzelnen Signale zueinander von Anfang an fest.

Mit kohärenten Signalen mehrerer Sensoren, die in einer Ebene angeordnet sind, lassen sich aus den Phasendifferenzen der Signale Schwingungsmoden der Signalquelle ermitteln. Der Algorithmus für die Modenseparation hängt dabei von der Anzahl der Sensoren und der Geometrie ihrer Anordnung ab. Den einfachsten Fall bilden dabei zwei gegenüberliegende Sensoren. Diese Anordnung erlaubt die Separation der Signalquellen in eine gleich- und eine gegenphasige Schwingung. Dieser von Charles Mayo vorgeschlagene Algorithmus wurde bis 1976 mehrfach erfolgreich in Babcock&Wilcox Druckwasserreaktoren eingesetzt, um die von Schwingungen der Reaktoreinbauten verursachten Signalanteile im Neutronenflußrauschen zu separieren /18/.

Als Erweiterung des Mayo'schen Algorithmus ist 1995 von T.R. Kim et al. /19/ ein Modell mit vier Sensoren (x_1 , y_1 , x_2 und y_2) die in einer Ebene um jeweils 90 Grad versetzt angeordnet sind, vorgeschlagen worden. Das ist die typische Anordnung der jeweils vier Neutronenflußaußenkammern bei Druckwasserreaktoren auf einer oder mehreren Ebenen. Aus den auf den vier Positionen gemessenen Signalen können vier linear unabhängige Funktionen, die vier verschiedenen Schwingungsmoden entsprechen, gebildet werden. Die Funktionen repräsentieren eine mit allen Sensoren gleichphasig gemessene Schwingung $g(t)$, zwei senkrecht zueinander angeordnete Balkenschwingungen $b_1(t)$ und $b_2(t)$ (gegenüberliegende Sensoren messen gegenphasige Schwingung) und eine Ovalisierungs- oder Schalenschwingung $s(t)$. Die Phasenbeziehungen der Signale und die Formen für die jeweiligen Schwingungsmoden sind in Bild 2.11 dargestellt.

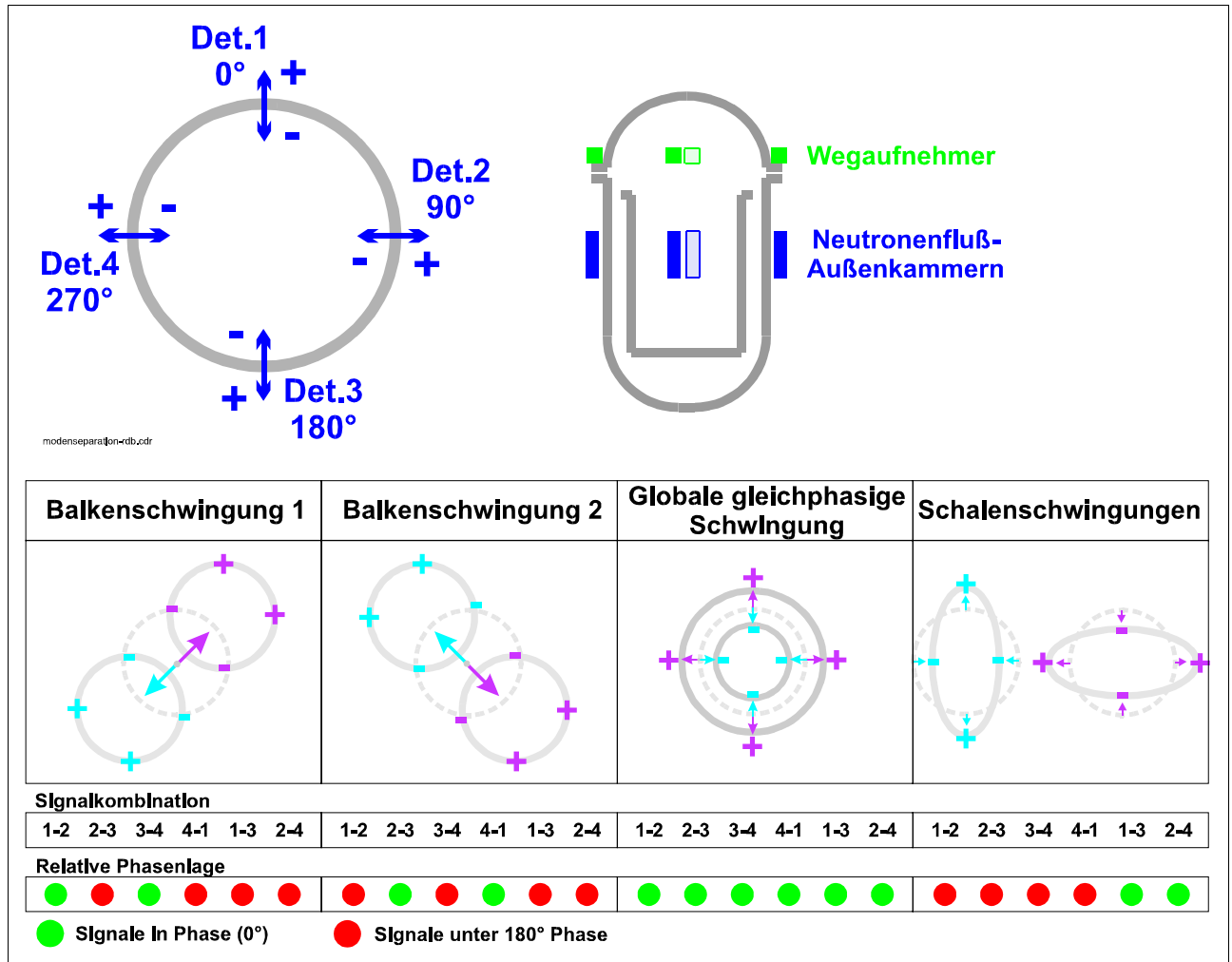


Bild 2.11: Anordnung der Meßstellen und Schwingungsmoden für das Modenseparationsmodell

Nimmt man einen simultan gemessenen Satz von Zeitsignalen der Detektoren 1 (x_1) mit $x_1(t)$, 2 (x_2) mit $x_2(t)$, 3 (y_1) mit $y_1(t)$ und 4 (y_2) mit $y_2(t)$ als gegeben an, so lassen sich diese gemessenen Zeitsignale als Linearkombination der vier Schwingungsmoden $g(t)$, $b_1(t)$, $b_2(t)$ und $s(t)$ darstellen.

Aus der geometrische Anordnung der Meßstellen und der Kenntnis der Phasenlage (Bild 2.11) ergeben sich für die Darstellung der Zeitsignale $x_1(t)$, $y_1(t)$, $x_2(t)$ und $y_2(t)$ durch die vier Schwingungsmoden $g(t)$, $b_1(t)$, $b_2(t)$ und $s(t)$ folgende Linearkombinationen im Zeitbereich:

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &= g(t) + s(t) + b_1(t) + b_2(t) & x_2(t) &= g(t) + s(t) - b_1(t) - b_2(t) \\
 y_1(t) &= g(t) - s(t) + b_1(t) - b_2(t) & y_2(t) &= g(t) - s(t) - b_1(t) + b_2(t)
 \end{aligned}
 \quad [2.19]$$

Die Transformation in den Frequenzbereich kann durch die gegebene Phasenlage der Signale und die Eigenschaft der Fourier-Transformation für realwertige Funktionen, daß der Realteil immer eine gerade und der Imaginärteil eine ungerade Funktion ist, formal einfach durchgeführt werden /19/.

Definiert man die komplexen Funktionen

$$\begin{aligned} z_1(t) &= x_1(t) + iy_1(t) \\ z_2(t) &= x_2(t) + iy_2(t) \end{aligned} \quad [2.20]$$

und setzt voraus, daß die Signale $x_i(t)$ und $y_i(t)$ reelle Funktionen der Zeit sind, so ergeben sich aus (2.19) und (2.20) für die Schwingungsmoden im Frequenzraum folgende Beziehungen :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{G(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} + \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ + \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Im}\{G(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} - \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ - \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Re}\{S(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} + \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ + \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Im}\{S(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} + \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} - \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ + \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Re}\{B_1(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} + \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ - \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Im}\{B_1(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} - \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ + \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Re}\{B_2(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} + \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ - \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \\ \operatorname{Im}\{B_2(f)\} &= \frac{1}{8} \left[\begin{array}{l} + \operatorname{Re}\{Z_1(f)\} + \operatorname{Im}\{Z_1(f)\} - \operatorname{Re}\{Z_1(-f)\} - \operatorname{Im}\{Z_1(-f)\} \\ - \operatorname{Re}\{Z_2(f)\} - \operatorname{Im}\{Z_2(f)\} + \operatorname{Re}\{Z_2(-f)\} + \operatorname{Im}\{Z_2(-f)\} \end{array} \right] \end{aligned} \quad [2.21]$$

Durch die Kenntnis der Real- und Imaginärteile der einzelnen Schwingungsmoden ist analog zur der autospektralen Leistungsdichte (ASLD) eine Leistungsdichte der nach den vorgegebenen Moden separierten Leistungsdichte (MSLD) anteilig berechenbar:

$$\begin{aligned} \operatorname{MSLD}(G(f)) &= \operatorname{Re}(G(f))^2 + \operatorname{Im}(G(f))^2 \\ \operatorname{MSLD}(S(f)) &= \operatorname{Re}(S(f))^2 + \operatorname{Im}(S(f))^2 \\ \operatorname{MSLD}(B_1(f)) &= \operatorname{Re}(B_1(f))^2 + \operatorname{Im}(B_1(f))^2 \\ \operatorname{MSLD}(B_2(f)) &= \operatorname{Re}(B_2(f))^2 + \operatorname{Im}(B_2(f))^2 \end{aligned} \quad [2.22]$$

3. Schwingungsanalyse durch Anwendung des Modenseparationsverfahrens in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren

Die charakteristischen Konstruktionsmerkmale von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor sind die Trennung von nuklearer Leistungserzeugung und konventionellem Dampf-Kraft-Prozeß in Primär- und Sekundärkreislauf und die Nutzung von leichtem Wasser unter etwa 160 bar Systemdruck im Primärkreis als Moderator und Kühlmittel zugleich. Die Reaktordruckbehälter sind im Vergleich mit anderen Reaktortypen gleicher Leistungsklasse kompakt und die Leistungsdichte ist im Vergleich mit anderen wassergekühlten Reaktortypen hoch. Etwa 60 Prozent aller Kernkraftwerke werden heute mit leichtwassergekühlten und -moderierten Druckwasserreaktoren betrieben. Die erste kommerzielle Anlage wurde 1957 durch Westinghouse gebaut (136 MW_{el}, Shippingport, USA). Danach wurden Druckwasserreaktoren weitgehend baugleich durch Westinghouse, Asea Brown Boveri-Combustion Engineering (ABB-CE), Framatome, Siemens/KWU, Mitsubishi und Babcock & Wilcox hergestellt. Die größten Anlagen haben elektrische Nettoleistungen von über 1400 MW_{el}.

Bereits 1968, vor der Fertigstellung des ältesten, heute in der Bundesrepublik Deutschland in Betrieb befindlichen kommerziellen Leistungsreaktors im Kernkraftwerk Obrigheim (KWO), waren Schwingungsprobleme an den Kerneinbauten von Leichtwasserreaktoren bekannt geworden. Die Erkenntnisse aus den Schadensberichten führten zu systematischen Schwingungsuntersuchungen an den Kerneinbauten des KWO und anschließenden Verbesserungen der Schwingfestigkeit der Kerneinbauten dieser und nachfolgender Anlagen /23/. Beobachtungen der Bewegungen von Reaktoreinbauten in Neutronenflußmessungen des Trino-Reaktors 1970 /24/ und der Nachweis von Pendelbewegungen des Kernbehälters in den Signalen der Neutronenflußaußenkammern des Kernkraftwerkes Stade (KKS) 1972 zeigten die prinzipiellen Möglichkeiten zur Beobachtung von Relativbewegungen des Kernbehälters während des Betriebes, ohne die Montage zusätzlicher Instrumentierung /25/.

Die Entwicklung von Modellen und Berechnungen auf der Basis von Pendelbewegungen gekoppelter Massen mit mehreren Freiheitsgraden und unterschiedlichen Anregungsmechanismen, ermöglichen eine weitgehende Interpretation der gemessenen Schwingungs- und Neutronenflußspektren /26/. Seitdem wurden eine Vielzahl von Arbeiten auf diesem Gebiet durchgeführt. Eine Darstellung der Grundlagen und eine Zusammenfassung dieser Arbeiten findet sich bei Thie /1, 13/.

Seit 1984 ist in Deutschland die Schwingungsüberwachung von Reaktordruckbehältereinbauten während des Betriebes, mindestens dreimal je Brennelementzyklus, obligatorisch. Hierzu sind indirekte Verfahren, wie die Schwingungsanalyse anhand der Außenkernneutronenflußsignale, ausdrücklich zugelassen /27/. Neuere Untersuchungen, zu denen auch das im Kapitel 2.5 behandelte Modenseparationsverfahren zählt, befassen sich mit der Weiterentwicklung von Methoden zur Zerlegung der Meßsignale in Anteile, die durch das Reaktivitätsrauschen, das Hintergrundrauschen und die Anisotropie der Behälterschwingungen verursacht werden /28, 29/.

3.1 DWR deutscher Bauart in 300MW_{el}, 600MW_{el} und 1300MW_{el} Leistungsklasse

In den folgenden Abschnitten wird dargestellt, wie mit dem Modenseparationsverfahren aus früheren Arbeiten bereits bekannte Bauteilschwingungen in deutschen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor kleiner, mittlerer und großer Leistungsklasse voneinander getrennt werden können. Hierzu wurden durch den Verfasser stellvertretend für die in der Bundesrepublik häufigste Kernkraftwerksbauart, das sind Kernkraftwerke mit Siemens/KWU Druckwasserreaktor, Messungen aus drei Kernkraftwerken verschiedener Leistungsklassen (350 MW_{el}, 600MW_{el}, 1300MW_{el}) und einem Kernkraftwerk der zuletzt verwendeten, modernsten Bauart (Konvoityp, 1300MW_{el}) durchgeführt. Eine Übersicht der bereits veröffentlichten, meßtechnisch festgestellten Bauteilschwingungen /15, 30, 31/ in Abhängigkeit der Leistungsklasse enthält Tabelle 3.1. Bei den Brennelement- und Behälterschwingungen ist der Einfluß der Bauteilgröße auf die Eigenfrequenzen besonders gut zu erkennen: Je größer die Komponente, desto kleiner ist die dazugehörige Eigenfrequenz. Für die beiden 1300MW Anlagen sind die Eigenfrequenzen der hier untersuchten Bauteile näherungsweise gleich.

Leistungsklasse / Reaktortyp	350 MW	600 MW	1300 MW Vorkonvoi	1300 MW Konvoi
Bauteil / Schwingungsform / Schwingungsursache	Frequenz [Hz] / Kommentar			
Thermischer Schild Taumelbewegung	3,2-4,5	* Thermischer Schild und Kernbehälter bilden bei diesen Reaktoren eine Einheit und können keine Relativbewegung ausführen		
BE 1. Mode	5,8-6,4	4,5	2,6-3,5	2,0-3,0
RDB/KB/TS mit Relativbewegung	8,8-8,9	*		
BE 2. Mode	11,0-12,0	11,2	6,0-7,0	6,0-7,0
RDB/KB mit Relativbewegung	14,7	13,0	8,1-8,3	8,4
RDB/KB Taumelbew. o. R.	-	-	10,3-10,5	11,1
KB/TS Schalenmodus	15,0	*		
BE 3. Mode	18,0-19,0	-	10,5-12,5	11,0
RDB/KB Taumelbew. o.R.	-	-	12,4	12,4
RDB/KB Vertikalbew. o.R.	-	19,0	14,7	14,7
BE 4. Mode	22,0-26,0	-	15,0-17,0	-
KB Schalenmodus	30,0-34,0	24,0	18,1-18,8	21,0-22,0
HKMP / Restunwuchten	24,8	24,8	24,8	24,8
Kernschemel Biegeschwingung	-	39,7/39,8	29,3/29,8	Kernschemel durch Siebtonne ersetzt

Tabelle 3.1: Schwingungen von Primärkreiskomponenten in Abhängigkeit der Leistungsklasse

3.1.1 Betriebliche Instrumentierung an Primärkreislauf und Reaktor

Die hier untersuchten Druckwasserreaktoren der 1300 MW_{el} Leistungsklasse sind mit Systemen zur Schwingungs- und zur Körperschallüberwachung ausgestattet. Für die betriebliche Schwingungsüberwachung werden jeweils die Signale von 8 Neutronenflußaußenkammern, 16 Relativwegaufnehmern, 4 Absolutwegaufnehmern und 5 piezoelektrischen Druckaufnehmern verwendet /32/. Zum betrieblichen Körperschallüberwachungssystem (KÜS) gehören 16 Beschleunigungsaufnehmer, von denen 8 am Reaktordruckbehälter und jeweils 2 an den Dampferzeugern angebaut sind. An den vier Hauptkühlmittelpumpen sind jeweils zwei Wellenschwingungsaufnehmer rechtwinklig versetzt montiert. Die In-Kern Neutronenflußinstrumentierung besteht aus 48 SPN-Detektoren, die in Meßlanzen zu je sechs Stück und je drei Thermoelementen auf acht verschiedenen Kernpositionen montiert sind. Bild 3.1 zeigt schematische die Anordnung der für Schwingungsdiagnosen verwendeten Sensoren.

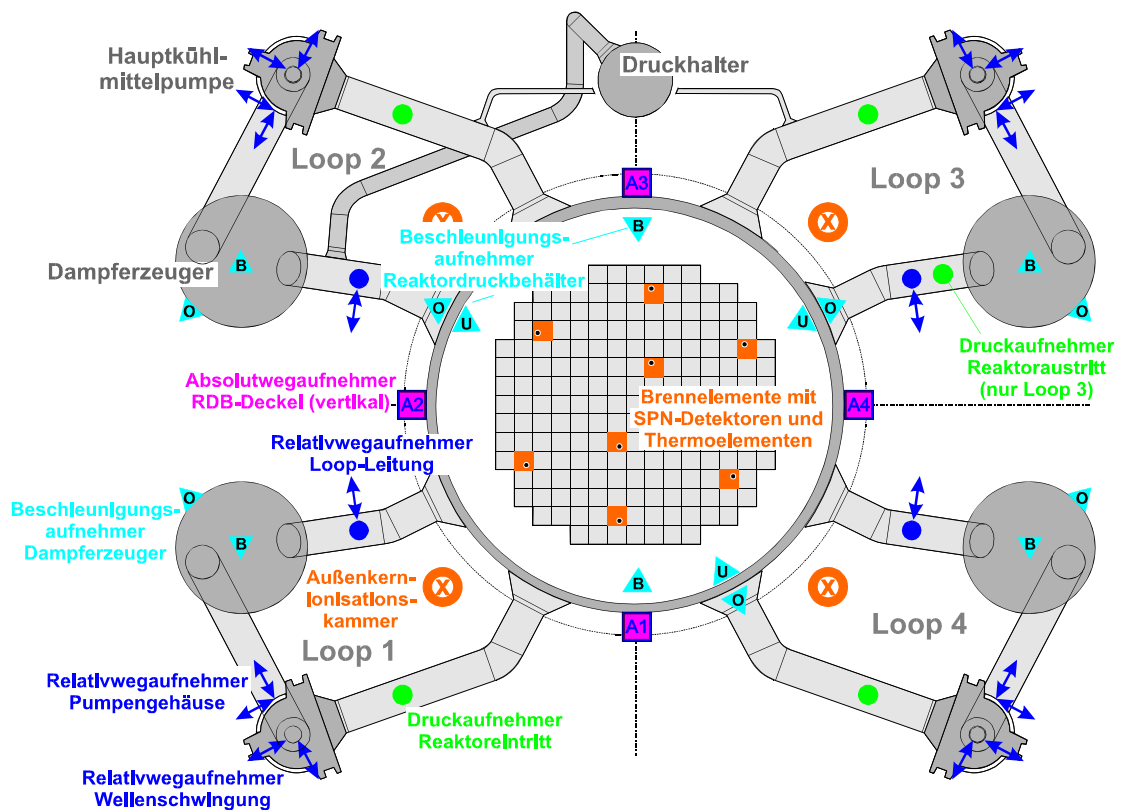


Bild 3.1: Primärkreisinstrumentierung eines Druckwasserreaktors (Konvoityp 1300 MW_{el})

Die Reaktoren der 300 MW_{el} und der 600 MW_{el} Leistungsklasse verfügen über eine Untermenge der oben aufgezählten Sensoren. Auf eine ausführlichere Beschreibungen der Primärkreisinstrumentierung von Siemens/KWU Druckwasserreaktoren kann hier verzichtet werden, da diese bereits an anderer Stelle veröffentlicht sind /15, 30, 31, 32, 33, 34/.

3.1.2 Reaktordruckbehälter- und Kernbehälterschwingungen

Bis zur Inbetriebnahme des Kernkraftwerkes Stade (600 MW_{e1} Anlage) wurden die Reaktordruckbehälter in Kernkraftwerken als nicht schwingfähig angenommen. Erst bei Schwingungstests zur Bestimmung der Eigenfrequenz des Kernbehälters wurde festgestellt, daß der RDB ebenfalls Pendelbewegungen ausführt /32/. Die Bewegungen von RDB und KB sind mit einem Pendelmodell von gekoppelten Massen berechnet worden. Der RDB ist in diesem Modell über Federkonstanten, die in der Realität die sogenannten Niederhaltefedern und die Kernschemelbefestigung repräsentieren, an den Kernbehälter gekoppelt. Der Vergleich der autospektralen Leistungsdichten eines berechneten und eines gemessenen Wegsignals zeigt praktisch Übereinstimmung /26/. Später folgten Untersuchungen zur Genauigkeit der Modelle und der Empfindlichkeit der gemessenen Signale auf mechanische Veränderungen an der Kopplung der überwachten Primärkreis Komponenten /35/. Es ist möglich, die mechanische Integrität der Niederhaltefedern und der Kernschemelbefestigung indirekt über die Frequenz der Relativbewegung von RDB und KB, beziehungsweise über die Frequenzen der richtungsabhängigen Kernschemelschwingungen zu bestimmen. Inspektionen der Niederhaltefedern und der Kernschemelbefestigung können so in zustandsbezogenen, anstatt in zeitbezogenen Intervallen durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise bietet einerseits den wirtschaftlichen Vorteil, auf unnötige Inspektionen verzichten zu können und andererseits den sowohl wirtschaftlichen als auch sicherheitsrelevanten Vorteil, notwendige Inspektionen so frühzeitig durchführen zu können, daß mögliche Schäden an der Anlage vermieden werden.

Bislang wird das Schwingungsverhalten von Reaktordruck- und Kernbehälter in deutschen Kernkraftwerken anhand von Kennfunktionen im Frequenzbereich, zumeist autospektraler Leistungsdichtefunktionen einzelner Signale, beurteilt. Hierzu wird das aktuelle Leistungsdichtespektrum mit einem Referenzspektrum des jeweiligen Signals verglichen. Signifikante Abweichungen von dem Referenzspektrum in der Frequenz oder Magnitude leiten dann weitere Maßnahmen ein. Die Überwachungstechnik und die Durchführung der Überwachung sind in der DIN 25475 beschrieben /4/. Darüber hinaus werden vereinzelt Kohärenz- und Phasenfunktionen in die Überwachung einbezogen, die eine richtungsabhängige Schwingungsüberwachung ermöglichen. Ein großer Nachteil ist vor allem bei mehrkanaligen Signalaufzeichnungen die mit der Auswertung von Leistungsdichte-, Kohärenz- und Phasenfunktionen unvermeidliche hohe Anzahl von zu untersuchenden Kurven. Außerdem erfordert die dreifache Maskierung des zu überwachenden Effektes, zum einen mindestens eine Fachkraft für Korrelationsanalyse zum anderen viel Zeit für die Auswertung und Interpretation. Das in Kapitel 2.5 vorgestellte Modell eines Modenseparationsverfahrens berücksichtigt die geometrische Anordnung der Sensoren und die bekannten Auswirkungen des zu überwachenden Effektes auf die Phasenlage der Signale. Hierdurch können die zu überwachenden Bauteilschwingungen von anderen Signalquellen getrennt werden, auch wenn sie im selben Frequenzbereich liegen. Das Modenseparationsverfahren kann eine Vereinfachung der Korrelationsanalyse darstellen.

Das Modenseparationsverfahren wird im Folgenden auf Absolutwegsignale am RDB-Deckel, auf Außenkernneutronenflußsignale und auf Beschleunigungssignale von Körperschallsensoren an der

Außenwand von Reaktordruckbehältern in Kernkraftwerken unterschiedlicher Leistungsklassen angewendet.

Am Beispiel der aus der Literatur bekannten Schwingungen der Primärkreiscomponenten RDB, KB, TS und Kernschemel (siehe Tabelle 3.1) wird die Trennbarkeit der einzelnen Effekte aus dem Gesamtsignal durch die Modellbildung untersucht. Die modenseparierten spektralen Leistungsdichtespektren stellen die spektrale Magnitudenverteilung der in dem Modell festgelegten Phasenlagen dar (Bild 2.11).

Angewandt auf die Signale der vier Neutronenflußaußenkammern sind dies zwei orthogonal zueinander ausgerichtete Balkenschwingungsmoden (B1 und B2) sowie ein gemeinsamer Modus (G) und ein Schalenschwingungsmodus (S).

Die geometrische Anordnung der Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel der Konvoi-, Vorkonvoi und 300 MW_{el} Anlage ist gegenüber der Anordnung der Neutronenflußaußenkammern um etwa 45 Grad im Uhrzeigersinn versetzt. Das bedeutet für die Ausrichtung der beiden Balkenschwingungsmoden der Absolutwegsignale ebenfalls eine Drehung um 45 Grad gegenüber den Balkenschwingungsmoden der Neutronenflußsignale. Auf den gemeinsamen Modus G hat diese Drehung offensichtlich keinen Einfluß. Die 600 MW_{el} Anlage ist abweichend von den anderen Anlagen mit zwei Wegaufnehmern instrumentiert. Hier kann deswegen nur zwischen einem gleichphasigen und einem gegenphasigen Modus in den Wegsignalen unterschieden werden.

Die absolute räumliche Orientierung der Balkenschwingungsmoden in Abhängigkeit der Signalart entsprechend der in Bild 2.5.1 festgelegten Detektoranordnung zeigt Tabelle 3.2.

Signalart:	Absolutweg	Außenkammerneutronenfluß
Balkenschwingungsmodus	Schwingrichtung	
B1	45°/225°	90°/270°
B2	135°/315°	0°/180°

Tabelle 3.2: Zuordnung der Schwingrichtung

Daß in der Praxis die vorherrschende Schwingungsrichtung des gekoppelten Systems aus RDB und KB genau in Richtung einer dieser modellierten Balkenschwingungen fällt, wäre Zufall. Dennoch ermöglicht gerade die zueinander versetzte Anordnung der Absolutweg- und Neutronenflußinstrumentierung eine gute Eingrenzung der Hauptschwingrichtung für die Konvoi und Vorkonvoi-Anlagen. Die genaue Amplitude und Ausrichtung der maximalen Auslenkung kann durch Vektoraddition der Balkenschwingungen errechnet werden.

Die Vorteile der Schwingungsanalyse mit dem Modenseparationsverfahren gegenüber den bisher angewandten Verfahren sind die höhere statistische Sicherheit und die damit einhergehende Vermeidung von Fehlinterpretationen. Die zu überwachende Bauteilschwingung wird mit vier Sensoren gleichzeitig und bei zueinander bekannter Phasenlage gemessen und analysiert. Bei der verbreiteten Kreuzkorrelationsmethode werden üblicherweise die Signale von simultan gemessenen Detektoren paarweise ausgewertet. Oft wird die zu überwachende Bauteilschwingung erst bei der Korrelation zweier Signale überhaupt sichtbar. Bei der Verwendung der Neutronenflußsignale, die ja ursprünglich nicht für Schwingungsmessungen bestimmt waren, wird die Überwachung von Bauteilschwingungen durch die betriebsbedingten Veränderungen während eines Brennelementzyklus erschwert. So ist beispielsweise der als Neutronengift wirksame Borsäuregehalt im Kühlmittel bei Zyklusbeginn über 1000 ppm und sinkt bei Zyklusende bis auf 0 ppm ab. Die durch den Borsäuregehalt verursachte Signalveränderung wird gewöhnlich durch die Normierung der Meßwerte auf den Mittelwert des Neutronenflußsignals kompensiert. Eine weitere typische Quelle für Fehlinterpretationen sind die sich über den Brennelementzyklus verändernden Kern-eintrittstemperaturen des Kühlmittels, die zu temperaturbedingten Verschiebungen der Eigenfrequenzen führen können.

Leistungsklasse 1300 MW_{el}

Die Signale der Neutronenflußaußenkammern sind aufgrund der betrieblich angestrebten Symmetrie von Kernbeladung und Leistungsdichte sehr ähnlich. Das ist hier in Bild 3.2 anhand der auf den Signalmittelwert normierten autospektralen Leistungsdichten beider Druckwasserreaktoren der 1300 MW_{el} Klasse deutlich zu erkennen:

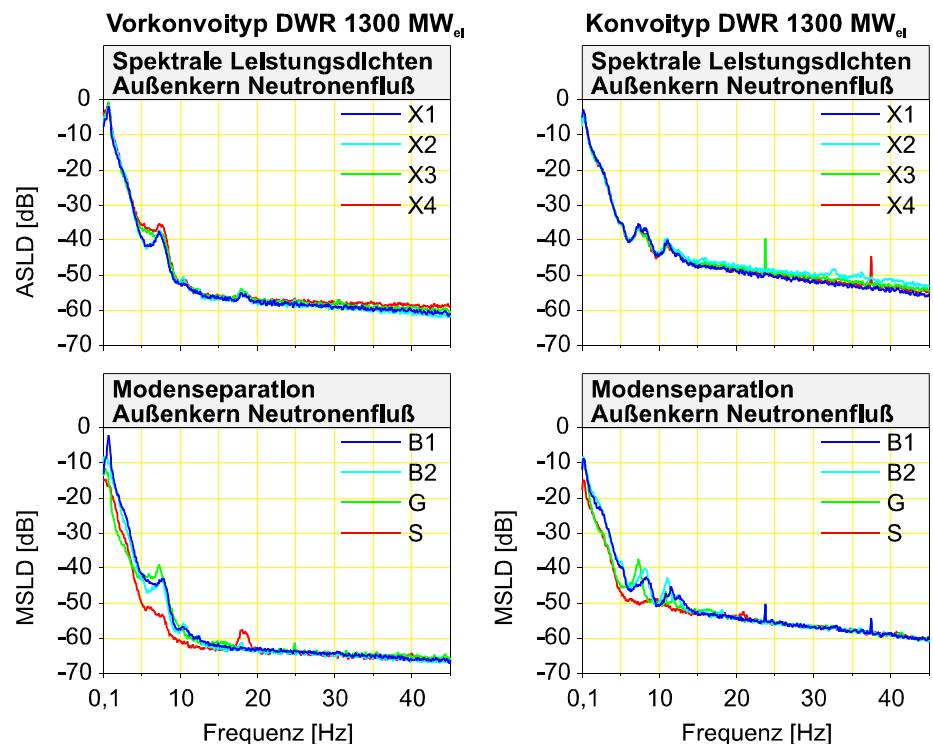


Bild 3.2: ASLD und Modenseparation von Neutronenflußsignalen aus Vorkonvoi und Konvoianlagen mit 1300 MW_{el}

Die Graphen aller vier Neutronenflußaußenkammersignale liegen im

dargestellten Frequenzbereich nahezu deckungsgleich übereinander. Im Gegensatz dazu gibt es zwischen den Magnituden der modenseparierten spektralen Leistungsdichten in mehreren Frequenzbereichen deutliche Unterschiede. Der Balkenschwingungsmodus B1 der separierten Leistungsdichte der Neutronenflußsignale aus der Vorkonvoianlage hat einen dominanten Peak bei 0,8

Hz (Bild 3.2). Hier liegt die Eigenfrequenz einer Biegeschwingung des gesamten Kerns und einer gemeinsamen Biegeschwingung der Brennelemente, die bereits in In- und Außenkernneutronenflußsignalen identifiziert wurde. Weitere Eigenfrequenzen der in der Vorkonvoianlage verwendeten Brennelemente wurden für Biegeschwingung zwischen 2,6 Hz und 3,5 Hz festgestellt /15/. Diese Biegeschwingungen der Brennelemente sind in den beiden Anlagen anhand eines breiten Peaks zwischen 2 Hz und 4 Hz in den Balkenschwingungsmoden erkennbar, die in diesem Frequenzbereich höhere Magnituden aufweisen als die anderen Moden (Bild 3.2).

Bei den Frequenzen 8,5 Hz, 10,5 Hz und 12,2 Hz sind unterscheidbare lokale Maxima in dem B1 Modus der Außenkernneutronenflußsignale aus der Vorkonvoianlage erkennbar. Der entsprechende B2 Modus weist Peaks bei 8,0 Hz, 10,5 Hz und 12,2 Hz auf (Bild 3.2).

Der B1 Modus der Absolutwegsignale hat die entsprechenden Peaks bei 8,5 Hz, 10,5 Hz und 12,0 Hz während der B2 Modus bei 8,0 Hz, 10,5 Hz und 12,4 Hz lokale Maxima aufweist. Ein vergleichbares Verhalten ist in der Konvoianlage für den B2 Modus der Absolutwegsignale bei 8,4 Hz, 11,2 Hz und 13,0 Hz feststellbar (Bild 3.3).

Bei 10,5 Hz sind die maximalen Magnituden in den autospektralen Leistungsdichten der Absolutwegsignale A1 und A3 am Reaktor der Vorkonvoianlage sowie des B2 Modes im dargestellten Frequenzbereich. Dasselbe gilt für die Konvoianlage bei 11,2 Hz für das Absolutwegsignal A1. Die Magnituden der beiden Balkenschwingungsmoden sind hier etwa gleichgroß (Bild 3.3). Es handelt sich hier also in beiden Anlagen um die Hauptkomponente der RDB-Taumelbewegung.

In der Konvoi-Anlage sind die Magnituden des B2 Modus der Außenkernneutronenflußsignale und des B2 Modus der Absolutwegsignale hier deutlich höher als die der entsprechenden B1 Moden. Daraus folgt eine Schwingrichtung dieser Pendelbewegung, die etwa mittig zwischen den Achsen A1/A3 und X1/X3 liegt. Bei 8,5 Hz (B1) und 8,0 Hz (B2) koppelt diese RDB Pendelbewegung mit der Bewegung des Kernbehälters gleichphasig, bei 12,5 Hz (B1) und 12,0 Hz (B2) gegenphasig.

Die hier vorgefundenen Schwingungen in Absolutweg- und Außenkernneutronenflußsignalen und die Interpretationen der Schwingwegspektren sind keine Besonderheiten dieser Reaktoren. Sie sind in Übereinstimmung mit Interpretationen der Schwingwegspektren für andere DWR-Anlagen /36/.

Die Relativbewegungen von RDB und KB modulieren die Breite des den Wasserspaltes zwischen beiden Behältern und verursachen so eine Veränderung der Neutronenflußabschwächung und - Reflexion mit der Frequenz der Relativbewegung. Der Zusammenhang wurde durch simultane Messung von Relativbewegung und Neutronenflußrauschen bestimmt, nachdem schon alleine Neutronenflußmessungen diesen Mechanismus vermuten ließen /24/.

In den Leistungsdichtespektren der gleichphasigen Moden von Absolutweg und Neutronenfluß in Vorkonvoi- und Konvoianlage ist jeweils ein Peak bei 7,3 Hz stark ausgeprägt. Die Trennung dieser gleichphasigen Signalanteile erfolgt für die Neutronenflußsignale vollständig, d.h. in keinem anderen Modus ist ein Peak bei dieser Frequenz erkennbar. Als Ursache für diese Schwingung, die sich für die

Absolutwegsignale als Vertikalschwingung des RDB und für die Neutronenflußsignale als Reaktivitätseffekt auswirkt, wurde eine Hohlraumresonanz identifiziert /15/.

Die Frequenzlage deutet auf eine vertikale subharmonische Schwingung mit der zweiten starken Ausprägung eines Peaks in dem gleichphasigen Modus der Absolutwegsignale bei 14,5 Hz, die durch eine vertikale Bewegung des gesamten RDB verursacht wird. An dieser Stelle wird der Vorteil des Modenseparationsverfahrens besonders deutlich. Die vertikale Bewegung kann bei 14,5 Hz klar von den Pendelbewegungen

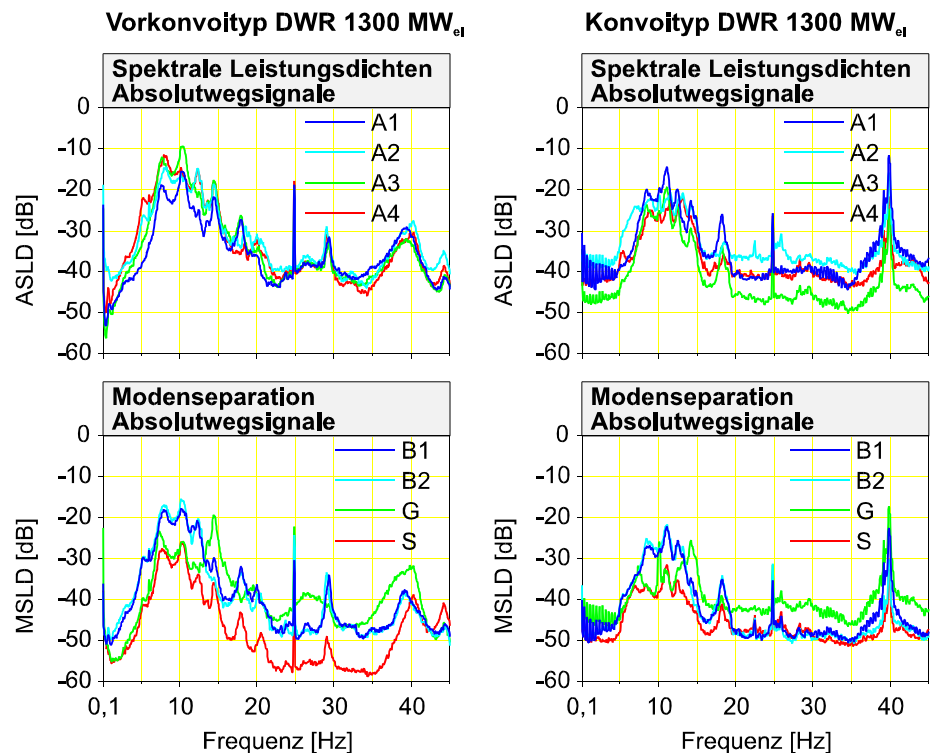


Bild 3.3: ASLD und Modenseparation von Absolutwegsignalen aus Vorkonvoi und Konvoianlagen mit 1300 MW_{el}

getrennt und beide können unabhängig voneinander überwacht werden. In dem gleichphasigen Modus der Absolutwegsignale der Vorkonvoianlage sind weitere Peaks, ein sehr schmalbandiger bei 24,8 Hz, der Drehfrequenz der Hauptkühlmittelpumpen, und zwei breitbandige zwischen 25 Hz und 30 Hz sowie zwischen 35 Hz und 40 Hz vorhanden, die durch Fluidresonanzen verursacht sind.

Mit dem Modenseparationsverfahren, angewandt auf die Signale der Außenkernneutronenflußsignale kann hier in drei der vier untersuchten Druckwasserreaktoren ein Schalenschwingungsmodus diagnostiziert werden. Für die Vorkonvoi und Konvoianlage (siehe Bild 3.2) sind die Magnituden der berechneten Schalenschwingungsmoden im dargestellten Frequenzbereich kleiner oder gleich groß wie die der anderen Moden, mit Ausnahme des Frequenzbereichs von 18 Hz bis 19 Hz und 21 Hz bis 22 Hz, respektive. Hier dominieren die berechneten Schalenschwingungsmoden. Hiermit werden Ergebnisse bestätigt, die in einem 1300MW_{el} DWR (Vorkonvoi) einen Peak von 18,0 Hz bis 18,5 Hz und für einen 1350 MW_{el} DWR (Konvoi) einen Peak von 21,5 Hz bis 22,5 Hz als Resonanzfrequenz der Kernbehälterschalenschwingung interpretieren /36/.

In den Absolutwegsignalen der hier untersuchten Druckwasserreaktoren ist keine vertikale Schalenschwingung feststellbar: Die Magnituden der berechneten Schalenschwingungsmoden (S) liegen im gesamten Frequenzbereich tiefer als die der andern Moden (Bild 3.2 und 3.3). Es ist kein Peak erkennbar, der nur oder vorwiegend in den Schalenschwingungsmoden auftritt. Die erkennbaren Peaks

sind in den anderen Moden mit höheren Magnituden vorhanden, es muß der Schluß gezogen werden, daß sie durch Abweichungen der realen Sensorpositionen von der im Modell angenommenen verursacht werden. Da die Meßrichtung der Absolutwegaufnehmer vertikal ist, hätte ein mit dem zugrundeliegenden Modell detektierbarer Schalenschwingungsmodus vertikale Auslenkungen. Eine solche Bewegungsform ist nicht sehr wahrscheinlich, da hier die höchstmögliche Steifigkeit des RDB vorliegt.

Als Reaktion auf eine Fluidresonanz bei 5,2 Hz, auf die in Abschnitt 3.1.4 näher eingegangen wird, ist in beiden Balkenschwingungsmodi der Absolutwegsignale von der Vorkonvoianlage ein lokales Maximum mit gleicher Magnitude, d.h. ohne eindeutige Zuordnung der Schwingrichtung, erkennbar. Das ist etwas weniger ausgeprägt auch in der Konvoianlage der Fall. Bei dieser Frequenz ist kein Peak in den korrespondierenden Spektren der Neutronenflußsignale vorhanden, d.h. es gibt weder eine Relativbewegung zwischen RDB und Kernbehälter, durch die ein Abschwächungsrauschen eingepreßt werden würde, noch einen Reaktivitätseffekt, der sich bei einer Dichteänderung des Primärmediums einstellen müßte.

Die ausgeprägten Peaks bei 29,0 Hz im B2 Modus und bei 29,3 Hz im B1 Modus der Absolutwegsignale der Vorkonvoianlage sind deutlich richtungsabhängig. Sie sind auf die Eigenschwingungen des Kernschemels entlang seiner Hauptachsen zurückzuführen. Die Funktion des Kernschemels ist in der Konvoianlage konstruktiv durch eine Siebtonne ersetzt worden. Konsistenterweise sind in den Balkenschwingungsmoden der Konvoianlage diese Peaks nicht vorhanden.

Als Folge einer in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Fluidresonanz sind in den Balkenschwingungsmoden der Absolutwegsignale der Vorkonvoianlage bei 18,0 Hz und der Konvoianlage bei 18,2 Hz ausgeprägte lokale Maxima zu erkennen. Im Falle der Vorkonvoianlage erfolgte die Modenseparation vollständig in die Balkenschwingungen, jedoch mit annähernd gleichen Magnituden. Das bedeutet, es ist keine Vorzugsschwingrichtung feststellbar. In beiden Anlagen ist bei dieser Frequenz kein Peak in den Balkenschwingungsmoden der Außenkernneutronenflußsignale und keine richtungsabhängige Frequenzverschiebung feststellbar.

Zusätzlich zur Schwingungsüberwachung von RDB und Einbauten mit Hilfe der Außenkernneutronenfluß- und Absolutwegsignale kann in einigen Anlagen die KÜS-Instrumentierung zur Überwachung von Bauteilschwingungen genutzt werden. Von den an der Außenwand des RDB montierten sechs Aufnehmern wurden vier für die Berechnung der Modenseparation ausgewählt, die so eine neue Meßebeine orthogonal zu der bisher betrachteten aufspannen. Abgesehen von den unterschiedlichen Meßrichtungen, lassen sich Behälterschwingungen auf diese Art ebenfalls in den Signalen der KÜS-Instrumentierung nachweisen. Im Vergleich mit den Absolutwegsignalen, die ihren Nutzbereich unter 1000 Hz haben, sind die Nutzsensoren Beschleunigungssensoren mit hochfrequenten Anteilen, die zumeist mit Hochpassfiltern unterhalb 1000 Hz bedämpft werden.

Deswegen sind die hier dargestellten autospektralen Leistungsdichten der KÜS-Signale aus einer Konvoi- und einer Vorkonvoi Anlage (Bild 3.4) zunächst nur relativ zueinander auswertbar.

Dennoch zeigen sie im betrachteten Frequenzbereich dieselben Schwingungssignaturen wie die autospektralen Leistungsdichten der Absolutwegsignale am RDB-Deckel (Bild 3.3).

Die oben beschriebenen Frequenzlagen der RDB und KB Relativbewegungen sind deutlich erkennbar.

Die Eigenfrequenzen des Kernschemels treten in den ASLD aus der Vorkonvoianlage ebenfalls deutlich auf, während

in diesem Frequenzbereich in den ASLD der Konvoianlage keine Peaks erkennbar sind.

Das hier experimentell, ohne exakte Berücksichtigung der tatsächlich vom Modell abweichenden Geometrie der verwendeten Aufnehmeranordnung, durchgeführte Modenseparationsverfahren ermöglicht im Fall der Vorkonvoianlage bereits eine sehr deutliche Trennung, und damit Überwachung, der gleichphasigen RDB-Bewegung bei 14,5 Hz und eine deutliche Aufspaltung der beiden richtungsabhängigen Kernschemeigenfrequenzen bei 29,0 Hz und 29,3 Hz. Es existiert hiermit eine zum Schwingungsüberwachungssystem diversitäre Möglichkeit die Schwingungen von RDB, KB und Kernschemel modenselektiv zu überwachen.

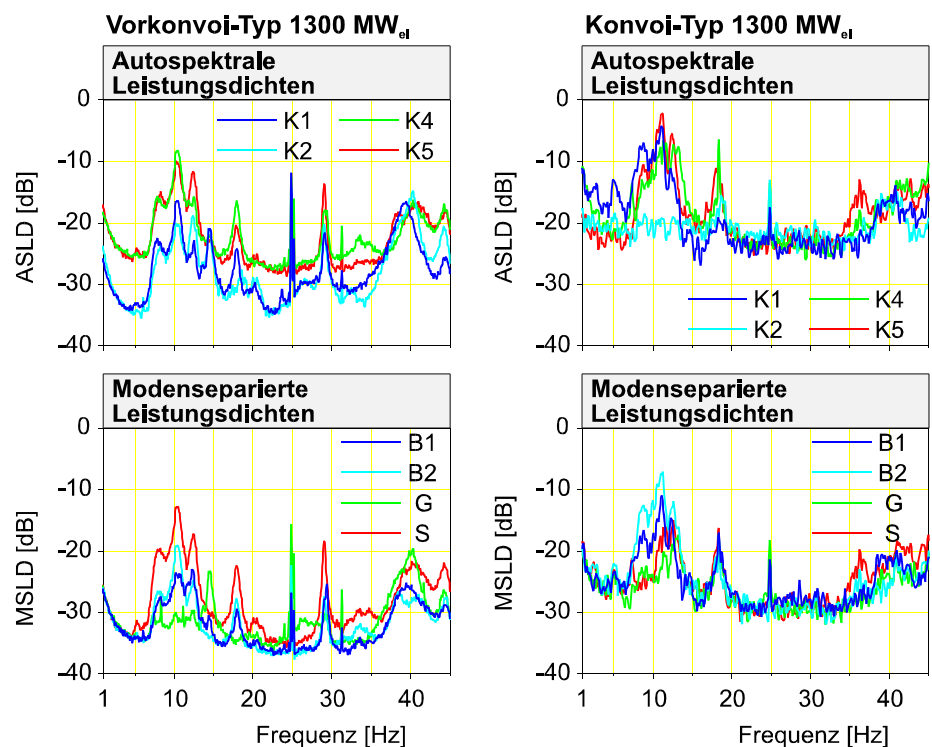


Bild 3.4: ASLD und Modenseparation von KÜS-Signalen in einer Vorkonvoi und einer Konvoianlagen mit 1300 MW_{el}

Leistungsklassen 300 MW_{el} und 600 MW_{el}

In der 300 MW_{el} Anlage dominiert der B2 Modus der Neutronenflußsignale deutlich im Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 3,0 Hz, bei 1,1 Hz und 2,0 Hz sind weitere Peaks erkennbar. Es ist deswegen also ebenfalls auf eine bevorzugte Schwingrichtungen für den Kern und die Brennelemente bei 1,1 Hz und 2,0 Hz zu schließen (Bild 3.5).

Der entsprechende B1 Modus sowie der B2 Balkenschwingungsmodus der Absolutwegsignale weisen einen breiten Peak zwischen 3 Hz und 5 Hz, bei 9 Hz und einen bei 14 Hz auf (Bild 3.6). Die Ursache der Schwingung zwischen 3 Hz und 5 Hz ist eine Taumelbewegung des thermischen Schildes /15/. Der thermische Schild ist hier im Unterschied zu den anderen drei Reaktoren nicht fest als ein Bauteil im Kernbehälter inte-

gruiert. Die hierdurch ermöglichten zusätzlichen Relativbewegungen von RDB, KB und TS sind der Grund für das im Vergleich zu den anderen Anlagen stark unterschiedliche Verhalten der Balkenschwingungsmoden.

Der Balkenschwingungsmodus B1 der Neutronenflußsignale hat bei 4,0 Hz, 9,1 Hz und 14,0 Hz lokale Maxima. Aus der Dominanz des 4 Hz Peaks in diesem B1 Modus läßt sich die Vorzugspendelrichtung der Relativbewegung von RDB, KB und thermischem Schild ablesen. In derselben Richtung liegt die größte Auslenkung der gleichphasig gekoppelten Relativbewegung von RDB, Kernbehälter und thermischem Schild mit der Frequenz 9,1 Hz und der gegenphasig gekoppelten Relativbewegung bei 14,0 Hz. Diese Relativbewegung ist jedoch, wie bei der Interpretation des Schalenschwingungsmodus verdeutlicht wird, nicht die Ursache für den ebenfalls deutlich erkennbaren Peak bei 14,9 Hz in den Signalen der Neutronenflußaußenkammern.

Der aus den Außenkernneutronenflußsignalen des 300 MW_{el} Druckwasserreaktors berechnete Schalenschwingungsmodus weist einen ausgeprägten breiten Peak um 14,9 Hz auf, der die Magnituden der anderen drei berechneten Schwingungskomponenten deutlich übertrifft (Bild 3.5). Es handelt sich

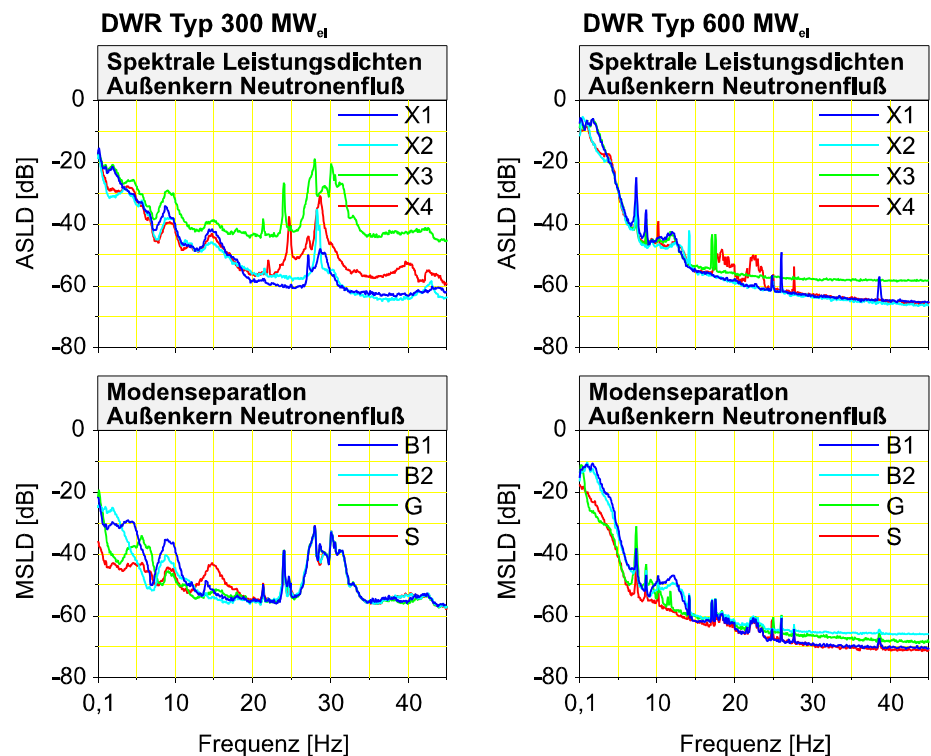


Bild 3.5: ASLD und Modenseparation der Neutronenflußsignale von Reaktoren der 300 MW_{el} und 600 MW_{el} Leistungsklasse

hier zweifelsfrei um eine Schalenschwingung in den Neutronenflußsignalen die durch Bewegungen des thermischen Schildes relativ zu Kernbehälter und RDB verursacht wird. Von diesem Peak überdeckt ist bei 14,0 Hz ein kleiner Peak im Balkenschwingungsmodus B1 zu erkennen (Bild 3.5), bei derselben Frequenz ist ein Peak im Balkenschwingungsmodus B2 der Absolutwegsignale, der zusammen mit dem Peak bei 9,2 Hz die höchsten Magnituden aufweist und oben bereits als gegenphasig gekoppelte Relativbewegung von RDB, Kernbehälter und thermischem Schild interpretiert wurde (Bild 3.6).

Diese Relativbewegung ist jedoch nicht die Ursache für den breiten Peak in den Spektren der Neutronenflußsignale bei 14,9 Hz sondern, wie hier mit dem Modenseparationsverfahren erstmals dargestellt, eine Ovalisierungs- oder Schalenschwingung von thermischem Schild relativ zu Kernbehälter und RDB. Die B1 und B2 Moden der Neutronenflußsignale aus der 600 MW_{el} Anlage zeigen ein deutlich richtungsabhängiges Schwingungsverhalten. Bei 1 Hz hat der B2 Modus die höheren Magnituden, bei 1,8 Hz der B1 Modus. Es folgen also bevorzugte Schwingrichtungen für den Kern und die Brennelemente bei 1 Hz entlang der Achse 135°/315° und für 1,8 Hz orthogonal dazu entlang der Achse 45°/225° (Bild 2.11).

In der 600 MW_{el} Anlage sind zwei Wegsignale am RDB-Deckel und zwei Beschleunigungssignale an der RDB-Kalotte, jeweils um 90 Grad versetzt messend, ausgewertet worden. Aufgrund der Signalanzahl und –geometrie lassen sich mit einem auf zwei orthogonale Signale reduziertem Modenseparationsmodell jeweils ein gleichphasiger Modus (G) und ein Balkenschwingungsmodus (B1) pro Signalart berechnen.

Da in beiden Fällen die gleichphasigen Moden im dargestellten Frequenzbereich dominieren, bringt die Modenseparation hier keinen Erkenntnisvorteil gegenüber der Analyse der autospektralen Leistungsdichten.

Durch beide Berechnungsverfahren finden sich nur in den Spektren der Wegsignale und der Balkenmoden (B1 und B2) der Neutronenflußsignale bei 13 Hz breite lokale Maxima, jedoch nicht in den Spektren der

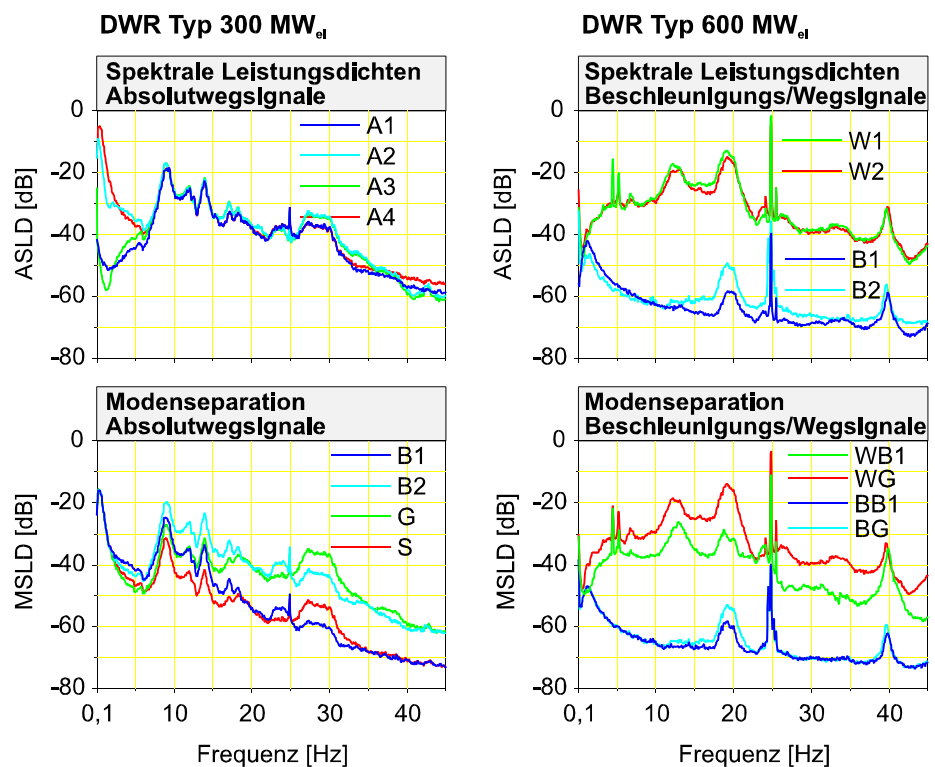


Bild 3.6: ASLD und Modenseparation von Absolutweg- und Beschleunigungssignalen von Reaktoren der 300 MW_{el} und 600 MW_{el} Leistungsklasse

Beschleunigungssignale.

Der Balkenschwingungsmodus B2 der Absolutwegsignale der 300 MW_{el} Anlage dominiert im Frequenzbereich von 2 Hz bis 17 Hz. Bei 4 Hz, 9,1 Hz, 12,1 Hz und 14,0 Hz sind weitere lokale Maxima deutlich erkennbar (Bild 3.6). Als Ursache der Schwingung um 4 Hz ist oben bereits eine Taumelschwingung des thermischen Schildes identifiziert worden.

Bei 9,1 Hz, 12,1 Hz und 14,0 Hz sind die höchsten Magnituden in den autospektralen Leistungsdichten der Absolutwegsignale. Es ist im Vergleich mit anderen Anlagen plausibel, hier die Eigenschwingungen des RDB und gekoppelte Schwingungen zusammen mit dem Kernbehälter anzunehmen. Bei 12,1 Hz ist jedoch kein Peak in den autospektralen Leistungsdichten der Neutronenflußsignale vorhanden, es handelt sich hier also um eine Pendelbewegung des RDB ohne Relativbewegung des Kernbehälters, denn eine solche würde durch eine Modulation des Wasserspaltes zwischen beiden Behältern als Abschwächungsrauschen in den Neutronenflußsignalen erkennbar sein.

Im Gegensatz hierzu muß bei 9,1 Hz und um 15 Hz auf Grund der ausgeprägten Peaks in den autospektralen Leistungsdichten der Neutronenflußsignale auf Relativbewegungen von RDB, KB und thermischem Schild geschlossen werden.

Ein vergleichbares Verhalten wie in den Anlagen der 1300 MW Klasse ist in der 300 MW_{el} Anlage ebenfalls für den B2 Modus der Absolutwegsignale bei 9,0 Hz, 12,0 Hz und 14,0 Hz feststellbar. In Analogie zu den Interpretationen der Schwingwegspektren für andere DWR-Anlagen /36/ sind hier ebenfalls richtungsabhängige Pendelbewegungen mit Relativbewegungen von RDB und KB die Ursache.

Die Peaks in den gleichphasig registrierten Signalanteilen der Absolutwegsignale bei 24,8 Hz sind durch die mit der Drehfrequenz umlaufenden Restunwuchten der Hauptkühlmittelpumpen verursacht.

Die bei 39,7 Hz und 39,8 Hz in den Absolutweg- und Beschleunigungssignalen der 600 MW_{el} Anlage sichtbaren Peaks sind auf die Eigenschwingungen des Kernschemels entlang seiner Hauptachsen zurückzuführen. In der 300 MW_{el} Anlage können im dargestellten Frequenzbereich keine Eigenschwingungen des Kernschemels identifiziert werden. Aufgrund der Größenverhältnisse muß analog zur Lage der Eigenfrequenzen der jeweils zwei leicht unterschiedlichen Kernschemelschwingungen in der Vorkonvoi-Anlage im Frequenzbereich von 29 Hz bis 30 Hz und in der 600 MW_{el} Anlage im Frequenzbereich von 39 Hz bis 40 Hz, mit einem Auftreten der Kernschemeleigenfrequenzen oberhalb des hier dargestellten Frequenzbereichs gerechnet werden.

Die spektrale Leistungsdichte des gleichphasigen Modus der Außenkernneutronenflußsignale in der 600 MW_{el} Anlage hat bei 0,25 Hz, 7,3 Hz, 8,6 Hz und 9,3 Hz signifikante Peaks, die die Magnituden der anderen Moden überragen. Die aus der geringen Halbwertsbreite der Peaks bei 7,3 Hz und 8,6 Hz ableitbare geringe Dämpfung läßt als Ursache elektrische Störsignaleinstreuung vermuten. In dem gleichphasigen Modus der Wegaufnehmersignale sind Peaks bei 4,8 Hz und 5,2 Hz, um 13 Hz, bei 19,5 Hz, 24,9 Hz und um 39,8 Hz. Die schmalen nadelförmigen Peaks bei 4,8 Hz und 5,2 Hz sind auf

elektrische Signaleinstreuungen oder lokale mechanische Schwingungen eines kleinen Bauteils am Ort des Sensors zurückzuführen, denn sie sind weder in den Neutronenflußsignalen, noch in den Körperschallsignalen detektierbar. Um 13 Hz wurden in den Balkenmoden der Neutronenflußsignale bereits die richtungsabhängigen Resonanzfrequenzen der RDB/KB Relativbewegungen identifiziert. Sie erscheinen für die Wegsignale gleichphasig, d.h. die Meßrichtungen der Wegaufnehmer stimmen nicht mit einer der bevorzugten Schwingrichtungen der RDB/KB Relativbewegungen überein.

Da bei 19,5 Hz die gleichphasig auftretenden Signalanteile von Weg- und Beschleunigung überwiegen und bei dieser Frequenz in den Neutronenflußsignalen kein Peak zu sehen ist, wird auf die Resonanzfrequenz einer vermutlich vertikalen RDB Schwingung ohne Relativbewegung des Kernbehälters geschlossen. Der schmale Peak bei 24,8 Hz ist auf die Drehfrequenz der Hauptkühlmittelpumpen (1500 U/min) zurückzuführen. Um 39,8 Hz sind die Eigenfrequenzen des Kernschemels erkennbar.

In den Außenkernneutronenflußsignalen sind bei 0,25 Hz und 5,8 Hz lokale Maxima erkennbar, die sich von den anderen Moden absetzen. Der erste niederfrequente Peak im Primärdruck ist jedoch erst bei 0,5 Hz feststellbar (Bild 3.5). Bei 0,25 Hz ist keine Korrelation zwischen Primärdruck und Inkernneutronenfluß, wohl aber zwischen Inkern- und Außenkernneutronenfluß erkennbar. Als Ursache des 0,25 Hz Peaks wird deswegen auf geringe Schwankungen der Kühlmiteleintrittstemperatur geschlossen. Im Frequenzbereich um 5,8 Hz ist der erste Biegeschwingungsmodus für beidseitig eingespannte Brennelemente festgestellt worden /15/.

3.1.3 Interpretation von Fluidresonanzen im Primärkreis

Akustische Hohlraumresonanzen zwischen räumlich getrennten und durch Rohrleitungen verbundenen Gasvolumina sowie stehende Druckwellen überlagern als Druckfluktuationen das im Betrieb gewöhnlich konstante Mittelwertsignal von Primärkreis- und Reaktordruckmeßstellen. Ein unvorhergesehenes Auftreten von Hohlraumresonanzen kann ein Indiz für neu entstandene Gasvolumina sein. Frequenzverschiebungen von Hohlraumresonanzen können Veränderungen der vorhandenen Gasvolumina anzeigen. Initiiert durch den erfolgreichen Einsatz von Druckfluktuationmessungen bei der Beseitigung einer Gasblase im Nachstörfallbetrieb des amerikanischen Reaktors TMI-2, wurden in verschiedenen Anlagen umfangreiche Untersuchungen zur Nachweisbarkeit und Ortung von vorhandenen Gasvolumina anhand der Analysen von Primärdruckschwankungen durchgeführt. Die autospektralen Leistungsdichten von Primärdrucksignalen der 300 MW_{el} Anlage und der 600 MW_{el} Anlage sowie von Reaktorein- und Reaktoraustrittsdrucksignalen der Vorkonvoi und Konvoianlage sind in Bild 3.7 dargestellt. In allen Spektren sind zunächst die auf Hohlraumresonanzen mit den Gasvolumina der Druckhalter zurückzuführenden Peaks zwischen 0,5 Hz und 1,0 Hz erkennbar /36/.

Ein Vergleich von allen Eintrittsdrucksignalen eines Reaktors zeigt, daß die Magnitude für den Peak zwischen 0,5 Hz und 1,0 Hz in dem Reaktoreintrittsdrucksignal der Primärkreisschleife zwei (P2E) höher ist als in den Spektren der Reaktoreintrittsdrucksignale der anderen Primärkreisschleifen (Bild 3.8). Dieses Verhalten stützt die oben festgestellte Beteiligung des Druckhalters an dieser Hohlraumresonanz, denn die Verbindungsleitung vom Druckhalter zum Primärkreis mündet in der Primärkreisschleife zwei. Hier ist somit die geringste Dämpfung und damit die höchste Magnitude zu erwarten.

Aus früheren Untersuchungen /15, 36/ kann in den Anlagen der 1300 MW_{el} Klasse auf Druckfluktuationen stehender Wellen im Volumenregelsystem bei 5,2 Hz, in den Reaktoraustrittsleitungen bei 12,4 Hz, 31 Hz und um 45 Hz sowie in den Reaktoreintrittsleitungen um 40 Hz geschlossen werden. Als Anregung zu der Fluidresonanz bei 12,4 Hz wird hier auf die erste Subharmonische des Drehtons der HKMP geschlossen, da die Magnituden für beide Reaktoreintrittsdrucksignale bei dieser Frequenz höher sind als die der entsprechenden Reaktoraustrittsdrucksignale. Die Fluidresonanzen bei 18,1 Hz werden durch stehende Druckwellen in den Saugleitungen zwischen DE und HKMP verursacht. Hier ist in beiden Anlagen der größte Unterschied zwischen den Magnituden der ASLD von Reaktoraus- und Reaktoreintrittsdrucksignalen zu erkennen (Bild 3.7). Der durch den Drehton der Hauptkühlmittelpumpen verursachte Peak bei 24,8 Hz ist aufgrund der räumlichen Nähe in den Reaktoreintrittsdrucksignalen mit deutlich höherer Magnitude als in den Reaktoraustrittsdrucksignalen zu erkennen.

In der 600 MW_{el} Anlage wird aufgrund der ähnlichen Konstruktion auch mit dem Auftreten ähnlicher Fluid- und Hohlraumresonanzen gerechnet. Diese liegen bedingt durch die zum Teil kleineren geometrischen Abmessungen, bei etwas höheren Frequenzen. So kann hier die Hohlraumresonanz mit Beteiligung des Gasvolumens im Druckhalter bei 0,9 Hz und eine stehende Druckwelle zwischen RDB und Druckhalter bei etwa 7 Hz festgestellt werden. Als Ursache für die Fluidresonanz um 12,5 Hz wird auf eine Strukturresonanz, unter Beteiligung der in Abschnitt 3.1.3 behandelten Relativbewegung von Reaktordruckbehälter und Kernbehälter in Folge der Anregung durch die erste Subharmonische der Hauptkühlmittelpumpenwellen

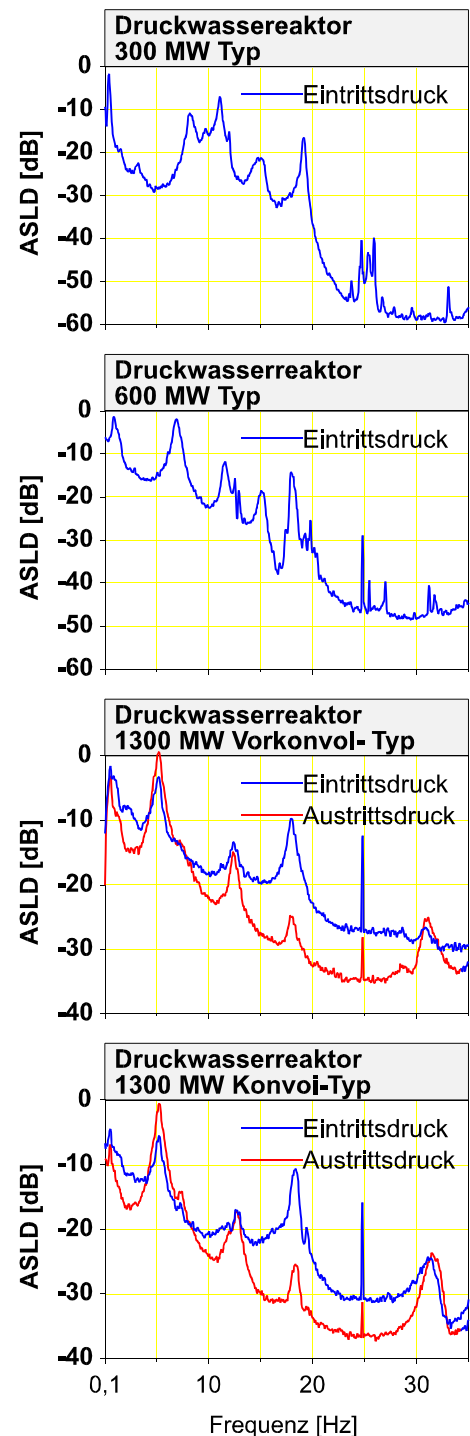


Bild 3.7: ASLD von Primärkreisdrucksignalen aus vier Anlagen mit Druckwasserreaktor

geschlossen. Die in der ASLD des Drucksignals bei 15 Hz erkennbare Fluidresonanz wird auf stehende Druckwellen in den Reaktoraustrittsleitungen zurückgeführt.

Die Hohlraumresonanz mit dem Gasvolumen des Druckhalters ist in der 300 MW_{el} Anlage bei 0,3 Hz feststellbar. Die oben behandelte Taumelschwingung des thermischen Schildes verursacht eine Fluidresonanz bei 4 Hz. Die unter Abschnitt 3.1.3 als Relativbewegungen von RDB, Kernbehälter und thermischem Schild identifizierte Schalenschwingung ist in der ASLD des Drucksignals ebenfalls als breiter Peak um 15 Hz vorhanden.

Bei 5,2 Hz, 12,4 Hz und 18,1 Hz haben die ASLD aller vier Druckeintrittssignale lokale Maxima mit gleicher Frequenz und Magnitude, die Kurven liegen im Rahmen der Darstellungsgenauigkeit annähernd übereinander.

Um 30 Hz sind ebenfalls in allen ASLD der Druckeintrittssignale Peaks zu erkennen, jedoch mit deutlich unterschiedlichen Frequenzen und Magnituden (Bild 3.8).

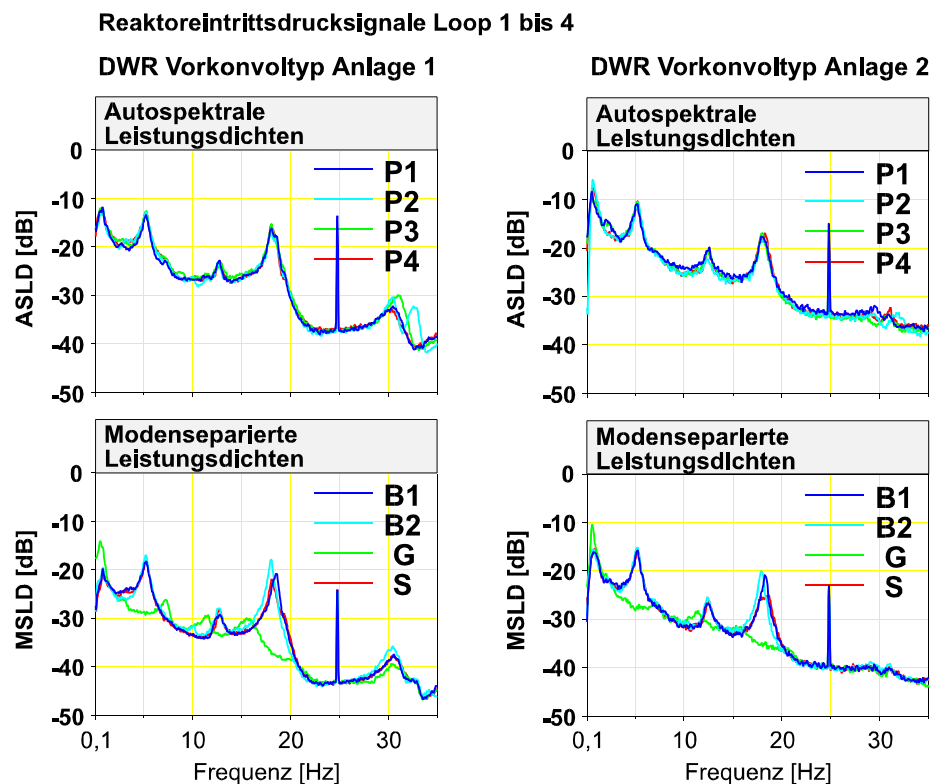


Bild 3.8: ASLD und Modenseparation von Reaktoreintrittsdrucksignalen

Das im Folgenden auf Drucksignale angewendete

Modenseparationsverfahren berücksichtigt nicht die tatsächliche räumliche Anordnung der Druckaufnehmer. Das ursprünglich zu Grunde gelegte Modell wurde, wie in Abschnitte 2.5 beschrieben, auf die Geometrie der um 90 Grad versetzt angeordneten Neutronenflußaußenkammern angepaßt (Bild 2.11). Dennoch können in abstrakter Weise die Modellbilder übertragen werden: Der gleichphasige Modus (G) steht für den Beitrag globaler Druckfluktuationen, die von allen Druckaufnehmern gleichzeitig registriert werden. Die Balkenschwingungsmoden B1 und B2 repräsentieren Druckschwankungen, die an den Aufnehmern P1 und P3 beziehungsweise P2 und P4 um 180 Grad phasenverschoben gemessen werden. Der Schalenschwingungsmodus S ist auf die zylindersymmetrische Form von Reaktordruck- und Kernbehälter ausgelegt. Eine nur durch den Schalenschwingungsmodus S repräsentierte Druckfluktuation mit entsprechendem Phasenverhalten für die realen Einbaupositionen der Drucksensoren ist deshalb nicht zu erwarten und wurde, wie unten gezeigt wird, auch nicht vorgefunden.

In den spektralen Leistungsdichten der gleichphasigen Moden G der Reaktoreintrittsdrucksignale aus beiden hier untersuchten Druckwasserreaktoren ist jeweils bei 0,6 Hz ein Peak erkennbar (Bild 3.8), der bereits auf die Hohlraumresonanz zwischen dem RDB und dem Gasvolumen des Druckhalters zurückgeführt wurde. Weiterhin ist bei 12,4 Hz ein lokales Maximum erkennbar, das als Folge einer Hohlraumresonanz zwischen RDB und Dampferzeugervorraum identifiziert wurde. Durch die Beobachtung dieser Peaks können eventuelle Veränderungen der bestehenden Gasvolumina überwacht bzw. detektiert werden.

Die Peaks bei 18,1 Hz werden in beiden Anlagen übereinstimmend nicht dem gleichphasigen Modus G zugeordnet. Es gibt jedoch keine klare Zuordnung zu einem der anderen Modi. Das bedeutet, daß die hier vorliegende Phasenlage bei dieser Frequenz nicht durch das hier benutzte Modenseparationsverfahren wiedergegeben werden kann. Dieses Ergebnis bestätigt die Annahme, das diese Druckfluktuationen unabhängig voneinander in den vier Primärkreisschleifen durch stehende Druckwellen in den jeweiligen Saugleitungen zwischen Dampferzeuger und Hauptkühlmittelpumpe verursacht werden.

Die Druckfluktuationen um 30 Hz und auch um 39 Hz (im Bild 3.8 nicht dargestellt) können keinem Modus klar zugeordnet werden. Sie werden also auch unabhängig voneinander in den einzelnen Primärkreisschleifen erzeugt. Diese Ergebnis bestätigt für Anlagen dieser Leistungsklasse die Interpretation als $\lambda/2$ -Stehwellenfelder in den Eintrittsleitungen (um 30 Hz) und in den Austrittsleitungen (um 39 Hz).

Es kann hiermit, zumindest für den Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 35 Hz, gezeigt werden, daß der gleichphasigen Modus der Reaktoreintrittsdrucksignale die bekannten Hohlraumresonanzen deutlich von den Fluidresonanzen, die durch stehende Druckwellen oder Bauteilschwingungen verursacht werden, separiert. Damit ist eine Kennfunktion gefunden, die es erlaubt, den Anteil der Hohlraumresonanzen an den Druckfluktuationen, unabhängig von dem Einfluß der sich eventuell verändernden stehenden Druckwellen, in der Frequenzlage zu überwachen. Die im Verlauf eines Brennelementzyklus normalen Veränderungen der Temperatur im Primärkreis verändern alle Druckfluktuationen, Änderungen im Gasvolumen jedoch nur die Hohlraumresonanzen.

3.2 DWR russischer WWER-440 Bauart

Die Russische Variante des leichtwassermoderierten Druckwasserreaktors sind die WWER-Typen (Wassergekühlter Wassermoderierter Energie Reaktor) von denen zwei Leistungsklassen und drei Standardbauarten existieren: Eine 1000 MW_{el} Variante (WWER 1000) mit vier Primärkreisschleifen und zwei Typen mit 440 MW_{el} installierter Leistung und sechs Primärkreisschleifen (WWER 440-230 bzw. die neuere Version WWER 440-213). Eine schematische Aufsicht auf den Primärkreis mit einem Instrumentierungsplan einer WWER-440 Anlage zeigt Bild 3.9.

In Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren vom Typ WWER-440 sind in der Vergangenheit durch Schwingungen verursachte, zum Teil sicherheitsrelevante Schäden bekannt geworden.

In einem Reaktor der Kernkraftwerke Greifswald (ehemalig: Volkseigener Betrieb der DDR Kombinat Kernkraftwerke "Bruno Leuschner") wurden für die Relativbewegung zwischen Kernbehälter und RDB Schwingungsamplituden von bis zu fünf Millimeter festgestellt.

Diese ungewöhnlich hohen Amplituden waren die Folge von plastischen Verformungen der Niederhaltesegmente zwischen RDB-Deckel und Kernbehälter. Durch die ungenügende Fixierung des Kernbehälters und die dadurch möglich gewordene vertikale Bewegung wurden die Führungselemente stark beschädigt. Es wird von Materialerosion an den Führungselementen zwischen dem Kernbehälter und RDB von bis zu 18 Millimeter berichtet /37/.

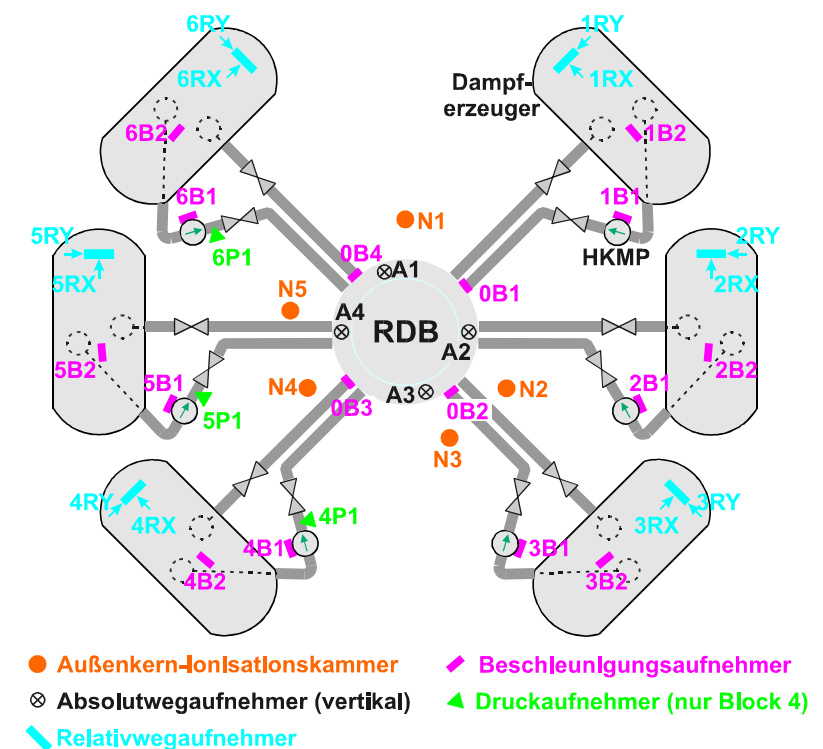


Bild 3.9: Exemplarische Darstellung der Instrumentierung einer WWER 440 Anlage

In technisch-wissenschaftlicher Zusammenarbeit zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Slowakischen Republik ist ein gemeinsames Projekt zur Entwicklung von Diagnosemethoden zur Anwendung in WWER-440 Reaktoren, mit finanzieller Unterstützung des Internationalen Büros im Kernforschungszentrum Karlsruhe, durchgeführt worden. Die den im Folgenden dargestellten Ergebnissen zugrunde liegenden Daten wurden vom Verfasser bei gemeinsam durchgeführten Messungen an der Standardinstrumentierung der Primärkreise von Block 1, 2 und 4 des Kernkraftwerkes Dukovany in der Tschechischen Republik aufgezeichnet.

Die vier Kraftwerksblöcke in Dukovany haben Druckwasserreaktoren vom russischen Typ WWER 440-213 mit je sechs separat absperrbaren Primärkreisschleifen. Alle vier Kraftwerksblöcke wurden in den Jahren 1984 bis 1986 mit Körperschallüberwachungssystemen und Schwingungsüberwachungssystemen (SÜS) ausgerüstet.

Die Sensorpositionen der Neutronenflußaußenkammern am RDB (N1 bis N5), der Absolutwegaufnehmer (A1 bis A4) am RDB-Deckel, von Druckaufnehmern in den Verbindungsleitungen zwischen den Dampferzeugern und den Hauptkühlmittelpumpen der Primärschleifen vier bis sechs (4P1 bis 6P1), Relativwegaufnehmern an Dampferzeugern (1R1X bis 6R1Y) und Beschleunigungsaufnehmern des Körperschallüberwachungssystems (0B1 bis 6B2) sind in Bild 3.9 dargestellt.

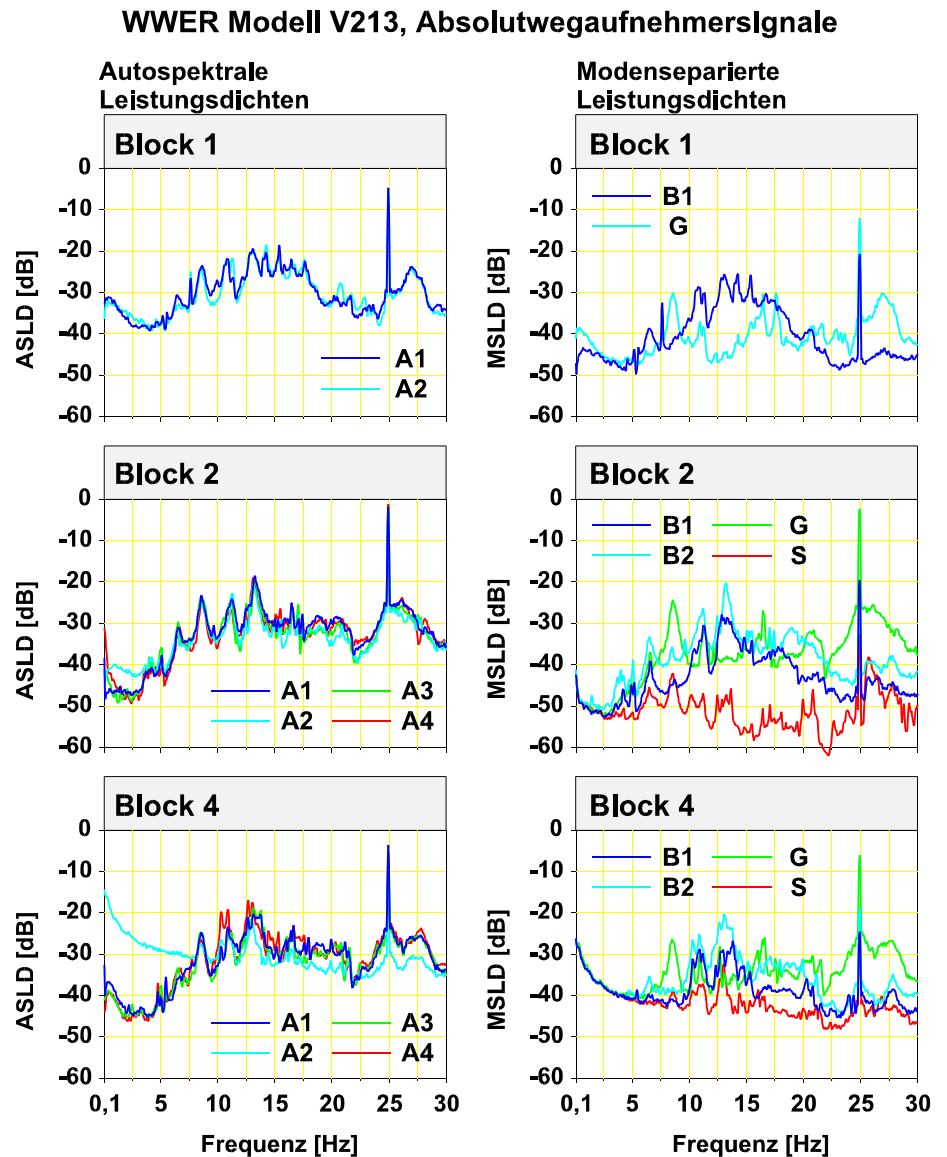


Bild 3.10: Vergleich der ASLD und Modenseparationen von Absolutwegsignalen aus drei WWER 440 Reaktoren

3.2.1 Schwingungen von Reaktordruck- und Kernbehälter

Die Beobachtung der Relativbewegungen von Kernbehälter und RDB sind seit den Untersuchungen am Palisades Reaktor im Jahr 1974 Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen geworden. In WWER-440 Reaktoren wurden jedoch Relativbewegungen von Kernbehälter und RDB zunächst nicht für möglich gehalten, da der Kernbehälter im unteren Bereich mit acht Führungselementen fixiert ist. Überraschenderweise wurde 1988 dennoch erstmals der Nachweis von Kernbehälterbewegungen in einem WWER-440 Reaktor veröffentlicht /38/.

Die autospektralen Leistungsdichten der für die Schwingungsüberwachung nachgerüsteten vertikalen Absolutwegaufnehmer (A1 bis A4) am RDB-Deckel sind in Bild 3.10 für die Blöcke 1,2 und 4 untereinander im Frequenzbereich bis 30 Hz dargestellt. In allen Signalen sind die höchsten Magnituden bei knapp unter 25 Hz. Sie werden durch verbleibende Restunwuchten der Wellen der sechs Hauptkühlmittelpumpen verursacht. Um die Frequenz dieser stärksten Anregung im Primärkreis sind zwei breite Strukturresonanzen im Frequenzbereich von 23 Hz bis 27 Hz und um 28 Hz erkennbar. Die Schwingung von 23 Hz bis 27 Hz ist, mit Ausnahme der Pumpendrehfrequenz bei 24,8 Hz, gut mit den Drucksignalen der Primärkreisleitungen korreliert.

Das gilt nicht für die Schwingung bei 28 Hz, bei der jedoch hohe Kohärenzen zwischen Druck- und Relativwegsignalen an den Dampferzeugern in radialer Richtung zum RDB auftreten (Bild 3.13).

In dem für RDB und Kernbehälterschwingungen relevanten Frequenzbereich sind in allen drei Blöcken markante Peaks bei 6,6 Hz, 8,6 Hz, 11,3 Hz, 13,3 Hz und 16,5 Hz in den Signalen der Absolutwegaufnehmer erkennbar.

Durch die Anwendung des Modenseparationsverfahrens können die Peaks bei 8,6 Hz und 16,5 Hz in allen drei Blöcken klar dem gleichphasigen Modus G zugeordnet werden (Bild 3.10). Das bedeutet, sie werden von Eigenschwingungen verursacht, die von allen vier Absolutwegaufnehmern zeit- und richtungsgleich detektiert werden. Die Ursache sind folglich vertikale Bewegungen des RDBs und des Kernbehälters mit Kerneinbauten. Bei 8,6 Hz existiert eventuell zusätzlich eine Hohlraumresonanz, da bei dieser Frequenz Korrelation zu Drucksignalen besteht (Bild 3.12).

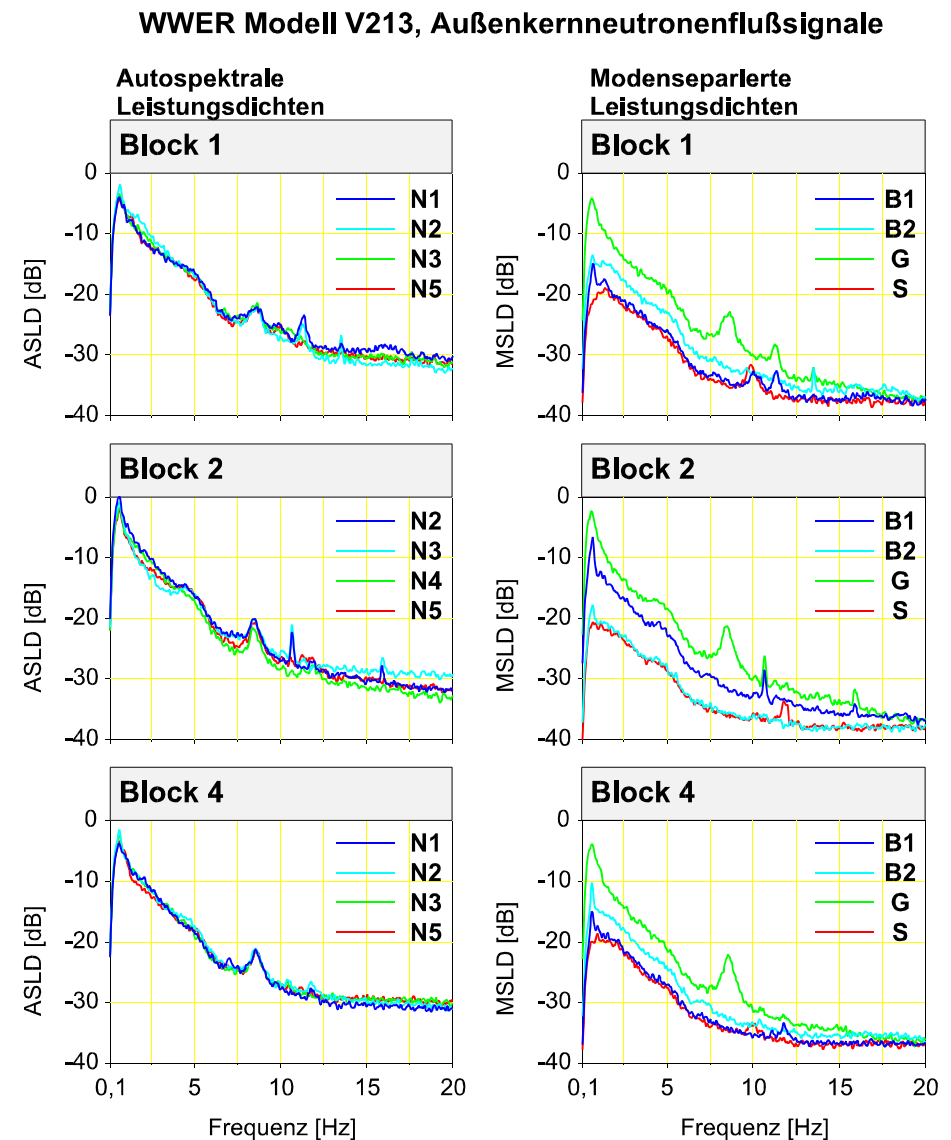
Da die Meßrichtung der Absolutwegaufnehmer vertikal ist, ist es über die unvermeidliche vertikale Komponente jeder Pendelbewegung auch möglich, diese in den Absolutwegsignalen zu detektieren.

Die Peaks bei 6,6 Hz, 11,3 Hz und 13,3 Hz werden für die Blöcke 2 und 4 mit dem Modenseparationsverfahren überwiegend dem Balkenschwingungsmodus B2 zugeordnet. Sie werden von Eigenschwingungen verursacht, bei denen der RDB als Balkenschwinger hauptsächlich in Richtung 135°/315° schwingt. Die beiden verbleibenden Anteile, Balkenschwingungsmodus Nummer 1 in Richtung 45°/225° und Schalenschwingungsmodus, haben keinen wesentlichen Einfluß. Bei der Signalaufnahme im Block eins standen nur zwei der vier Absolutwegsignale zur Verfügung. Die Möglichkeit zur Modenseparation ist deswegen hier beschränkt auf die Zerlegung in einen gleich- und einen gegenphasigen Signalanteil.

In einer Schwingungsanalyse für WWER-400 Reaktoren, die auf der Basis eines Finite Elemente Modells unter Berücksichtigung des Wasserspalt zwischen RDB und Kernbehälter durchgeführt wurde, wird die erste Relativbewegung von Kernbehälter und RDB mit signifikanten Amplituden, sowie einer dynamischen Schwingungsform des Kernbehälters bei 13,7 Hz festgestellt. RDB und Kernbehälter schwingen bei dieser Frequenz gegeneinander. Eine vertikale Kernbehälterbewegung wird bei 17,6 Hz errechnet. Bei 10,3 Hz schwingen RDB und Kernbehälter mit allen Einbauten gleichphasig als Balkenschwinger.

Schalenschwingungen mit Eigenfrequenzen unterhalb von 30 Hz treten nicht auf [37/].

Die Spektren der Signale von jeweils vier Neutronenflußaußenkammern sind für die drei Kraftwerksblöcke untereinander in Bild 3.11 dargestellt. Der allen drei Anlagen gemeinsame Verlauf der Spektren ist geprägt durch einen niederfrequenten Peak mit der höchsten Magnitude in allen Spektren bei etwa 0,5 Hz und einen monotonen Abfall übergehend in eine breite Verteilung zwischen 4 Hz bis 6 Hz und einen deutlich herausragenden breiten Peak bei 8,6 Hz.



Die Analyse mit dem

Modenseparationsverfahren ergibt für alle drei Blöcke eine deutliche Dominanz des gleichphasigen Anteils im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 15 Hz und einem klar hervortretenden Peak bei 8,6 Hz. Das ist gleichbedeutend damit, daß der überwiegende Anteil der Neutronenflußschwankungen in diesem Frequenzbereich von den vier ausgewählten Neutronenflußaußenkammern je Block phasengleich detektiert wird. Als wesentliche Ursachen kommen nur Druckschwankungen oder vertikale Schwingungen von Kernbehälter oder Kerneinbauten in Frage. Dieses Ergebnis wird durch die Analyse

der Signale der im Block vier verfügbaren Drucksensoren im Primärkreis bestätigt (vgl. Abschnitt 3.2.2.).

3.2.2 Fluidresonanzen im Primärkreis

Autospektrale Leistungsdichten der Signale von Druckaufnehmern in drei Primärkreisschleifen und Kohärenzen zu Signalen von Neutronenflußaußenkammern, Absolutwegaufnehmern am RDB-Deckel und Relativwegaufnehmern an den Dampferzeugern sind in Bild 3.12 dargestellt.

Im Frequenzbereich bis 30 Hz treten in den Spektren deutlich Peaks bei 0,6 Hz, 6,6 Hz, 20 Hz, 25 Hz und 28 Hz auf. Bei 0,6 Hz und 8,6 Hz sind die Drucksignale mit Neutronenflußsignalen aus den Außenkammern und Wegsignalen vom RDB-Deckel und von Dampferzeugern korreliert.

Bei 6,6 Hz, 20 Hz und 28 Hz kann keine Kohärenz mit Neutronenflußsignalen aus den Außenkammern festgestellt werden, obwohl die Drucksignale zum Teil über 50 Prozent Kohärenz mit den Signalen der Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel und über 90 Prozent Kohärenz mit Signalen der Relativwegaufnehmer an Dampferzeugern bei diesen Frequenzen aufweisen.

Theoretische Untersuchungen der niederfrequenten Druckschwankungen im Primärkreis eines WWER-440 Reaktors ordnen die Resonanz zwischen Null und einem Hertz eindeutig dem Druckhalter zu /39/. Der gleiche Effekt ist aus Siemens/KWU Druckwasserreaktoren bekannt, hier versuchte man ebenfalls anhand dieser Druckschwankung den Füllstand im Druckhalter zu bestimmen /36/.

Im Kernkraftwerk Greifswald ist die tiefste Druckresonanzfrequenz bei 0,6 Hz gemessen und Kühlmittelschwingungen zwischen Druckhalter und Primärkreisleitung (Hohlraumresonanz mit dem Gasvolumen des Druckhalters) zugeordnet worden /40/.

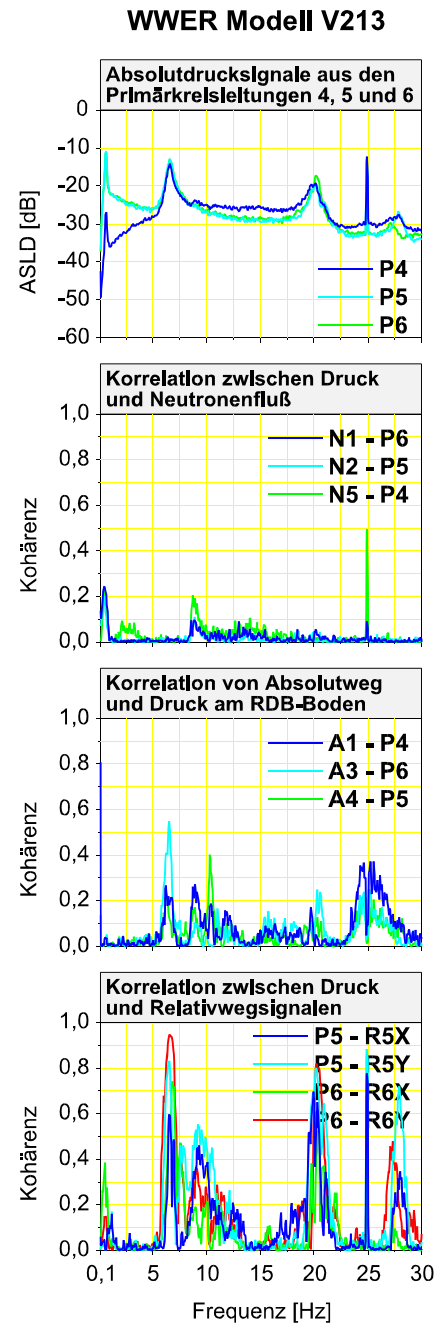


Bild 3.12: Korrelationsanalyse mit Absolutdruck, Neutronenfluß- und Absolutwegsignalen

Im ungarischen Kernkraftwerk Paks (WWER-440 Reaktoren) wurden während der Inbetriebnahme Druckschwankungen im Primärkreis unter normalen Betriebsbedingungen ($T=265\text{ °C}$, $P = 12,3\text{ Mpa}$) bei drei unterschiedlichen Füllständen des Druckhalters gemessen. Die Messungen ergaben einen Anstieg der niederfrequenten Komponente von 0,64 Hz bei 4,0 Meter Füllstand auf 0,68 Hz bei 6,3 Meter Füllstand und von 0,76 Hz bei 8,6 Meter Füllstand /41/.

Druckschwankungen in den Primärkreisen von Kernkraftwerken mit WWER-440 Druckwasserreaktoren enthalten also gewöhnlich eine niederfrequente Komponente um 0,6 Hz, die von den thermodynamischen Eigenschaften der Gasvorlage im Druckhalter abhängig ist. Da die Resonanzfrequenz auch von Gasvolumen im oberen Teil des RDB beeinflusst wird, kann sie als Diagnoseparameter für das Aufspüren von unerwünschten Betriebszuständen, speziell das Auftreten von zusätzlichen Gasvolumina im Primärkreis, verwendet werden /42, 43/.

Die Druckschwankungen bei 6,6 Hz und 20 Hz sind mit den Pendelbewegungen des RDB korreliert, die bereits unter 3.2.1 beschrieben wurden. Die Korrelationen mit Relativwegsignalen an Dampferzeugern sind jedoch deutlich höher als die mit den Signalen der Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel. Dies deutet auf eine Schwingungsanregung der Dampferzeuger und des RDB durch die stehenden Druckwellen als Ursache.

3.2.3 Schwingungen der Primärkreisleitungen und Dampferzeuger

Die Primärkreisleitungen wie auch die Dampferzeuger müssen, wegen der thermischen Ausdehnungen und Kontraktionen bei An- und Abfahrvorgängen, verschiebbar gelagert sein. Aufgrund der Massenverhältnisse (RDB etwa 600 t, Primärkreisschleife etwa 290 t) bietet weder der RDB für die Primärkreisleitungen eine feste Einspannung, noch ist dies umgekehrt der Fall. Es muß also von gekoppelten Schwingungen von RDB und Primärkreisleitungen ausgegangen werden. In einer Finite-Elemente basierten Schwingungsanalyse wird für WWER-440 Reaktoren bei 3,4 Hz ein gekoppelter gleichphasiger- und bei 4,7 Hz ein gekoppelter gegenphasiger Schwingungsmodus des Primärkreises errechnet /37/.

Die Schwingungen der Primärkreisleitungen und Dampferzeuger sind in den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer und Relativwege an den Dampferzeugern, sowie in den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer an den Hauptkühlmittelpumpen feststellbar.

Von der ersten Primärkreisschleife der Blöcke 1, und 4 sind die autospektralen Leistungsdichten von zwei Relativwegsignalen am Dampferzeuger, in radialer und in tangentialer Richtung zum Reaktor gemessen, und einem Beschleunigungssignal von der Hauptkühlmittelpumpe sind zusammen mit den Kohärenzen der Relativwegsignale mit dem Beschleunigungssignal in Bild 3.13 dargestellt.

In den Relativwegsignalen, tangential zum Reaktor gemessen, ist die Magnitude einer Eigenschwingung mit einer Frequenz um 1 Hz im Frequenzbereich bis 10 Hz höher als alle anderen, in radialer Richtung überwiegt in Block 1 und Block 2 die Magnitude des Peaks bei Frequenzen um 2 Hz. Im Block 4 ist bei 2 Hz ebenfalls ein Peak vorhanden, jedoch nicht so stark ausgeprägt.

Beide vorgenannten Schwingungen sind nicht mit Beschleunigungssignalen an den Pumpengehäusen korreliert, deshalb sind Eigenschwingungen des Dampferzeugers mit einer Frequenz von 1 Hz in tangentialer Richtung zum Reaktor und 2 Hz in radialer Richtung zum Reaktor die Ursache.

Bei 2,9 Hz in Block 1, 3,0 Hz in Block 2 und 3,8 Hz in Block 4 ist ein schmaler Peak erkennbar, der in den Relativwegsignalen und in den Beschleunigungssignalen vorhanden und in beide Messrichtungen gut korreliert ist. Bei 6,9 Hz im Block eins und bei 7,2 Hz in den zwei anderen ist eine Schwingung mit 40 bis 70 Prozent Korrelation in radialer Richtung zum Reaktor erkennbar.

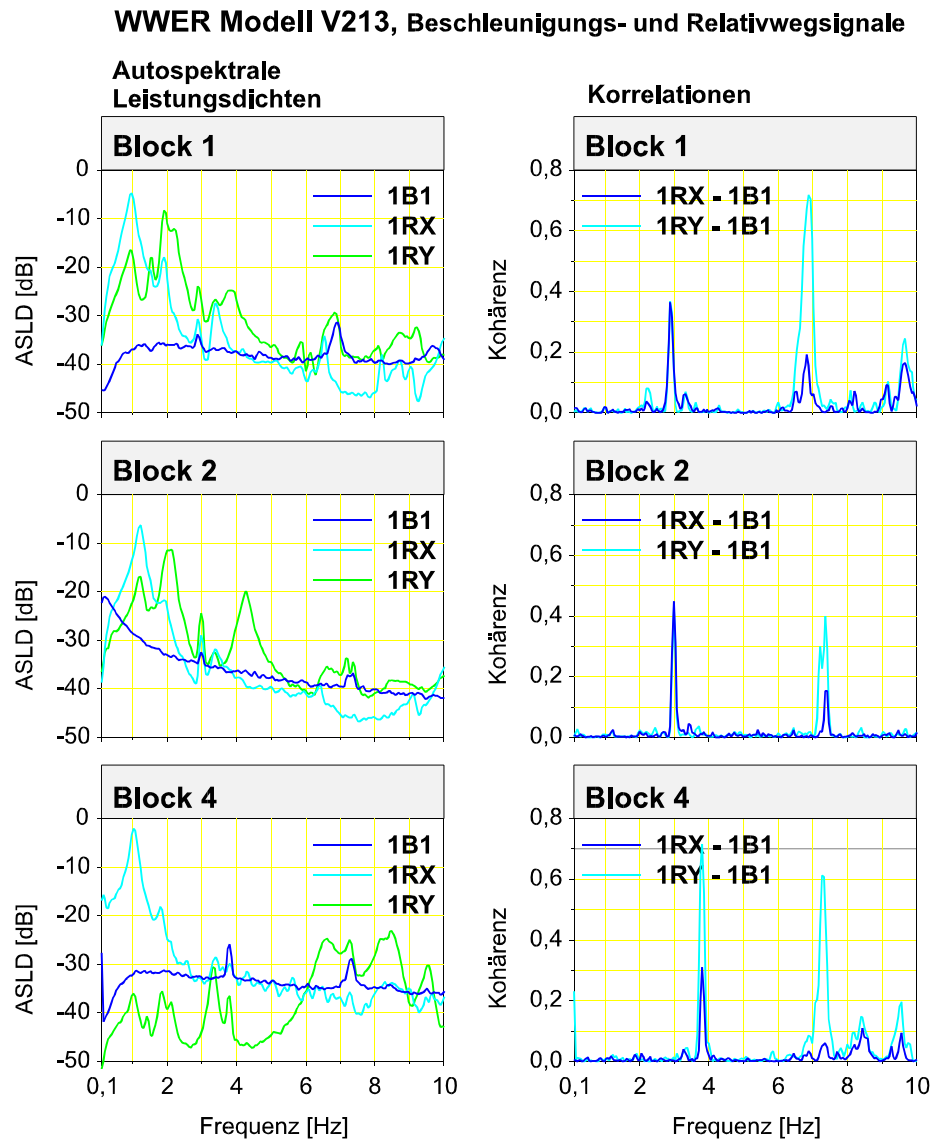


Bild 3.13: Korrelationsanalyse mit Beschleunigungs- und Relativwegsignalen aus der ersten Primärkreisschleife von drei unterschiedlichen WWER 440 Druckwasserreaktoren

Die Spektren der Beschleunigungssignale 5B1 an der Hauptkühlmittelpumpe und 5B2 am Dampferzeuger und ihre Kohärenzen mit den Relativwegsignalen 5RX und 5RY am Dampferzeuger und des Absolutwegsignals A4V am RDB-Deckel sowie Kohärenzen der Relativwegsignale mit dem Absolutwegsignal sind in Bild 3.14 abgebildet.

Aufgrund der guten Korrelation des Beschleunigungssignals 5B1 (Pumpe) von etwa 40 Prozent und der nicht vorhandenen Korrelation des Beschleunigungssignals 5B2 (DE) mit den Relativwegsignalen 5RX und 5RY bei 3 Hz wird auf die Hauptkühlmittelpumpe als Schwingungsursache geschlossen.

Für die Schwingung bei 8,6 Hz ist es genau umgekehrt. Dieselben Relativwegsignale sind hier nur mit den Signalen des Beschleunigungssignals 5B2 (DE) gut korreliert, jedoch nicht den Signalen des Beschleunigungssignals 5B1 (Pumpe). Außerdem sind beide Relativwegsignale und das Beschleunigungssignal 5B2 bei 8,6 Hz gut mit dem Absolutwegsignal A4V am RDB-Deckel korreliert.

Es handelt sich hier also um einen gekoppelten Schwingungsmodus von Dampferzeuger, RDB und der verbindenden Primärkreisleitung.

Bei Eigenschwingungsuntersuchungen mit durch eine hydraulische Schüttelvorrichtung erzwungener Schwingungsanregung an Dampferzeuger und Hauptkühlmittelpumpengehäuse, wurden im Kernkraftwerk Paks jeweils fünf Eigenfrequenzen für Dampferzeuger und Hauptkühlmittelpumpe im Frequenzbereich bis 12,5 Hz vorgefunden /44/.

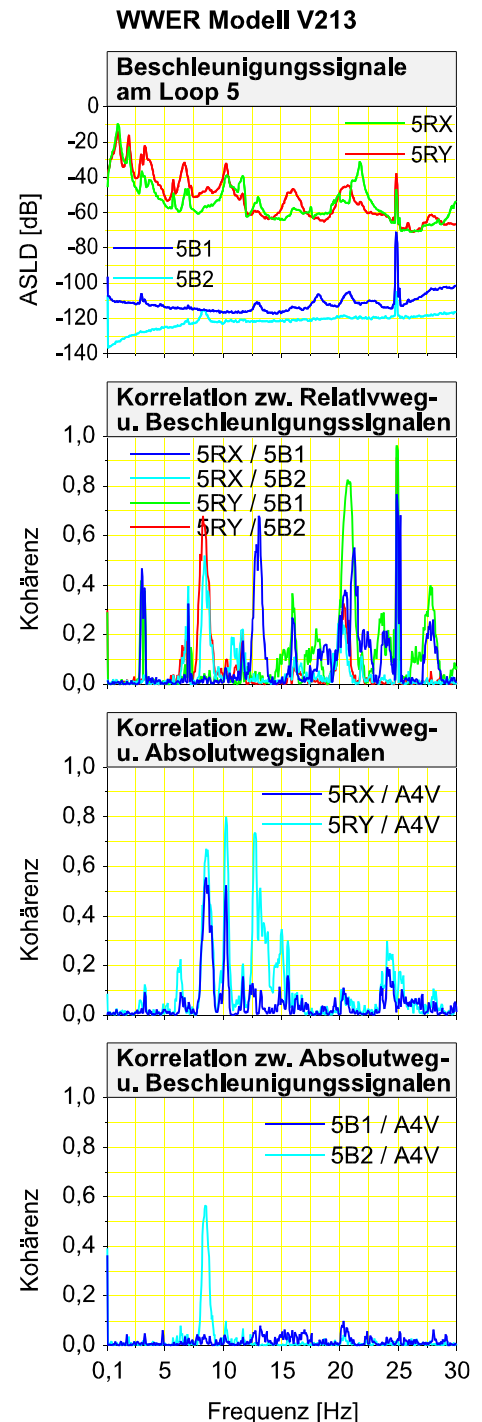


Bild 3.14: Korrelation von Beschleunigung und Wegsignalen

3.2.4 Frequenzlage der Eigenschwingungen im Vergleich

Im Kernkraftwerk Dukovany ist in allen drei Blöcken des Typs WWER-440 Modell V213 ein charakteristisches Schwingungsverhalten der Primärkreiskomponenten festgestellt worden.

Kleine Unterschiede in der Frequenzlage sind auf Temperaturunterschiede zurückzuführen, die durch unterschiedliche Abbrände und Kernreisezeiten entstehen. In den Kernkraftwerken Greifswald, Kola und Paks (alle vom Type WWER-440) sind Schwingungsanalysen durchgeführt worden, welche die im Kernkraftwerk Dukovany erzielten Ergebnisse in Bezug auf Schwingungsfrequenzen und Interpretation der Ursachen der Eigenschwingungen bestätigen /45/. Das ist eine Konsequenz der weitgehenden Baugleichheit. Die sehr gute Übereinstimmung der vorgefundenen Schwingungen der Primärkreiskomponenten mit zum Teil unterschiedlicher Instrumentierung ermöglicht die Übertragung und Nutzung der Ergebnisse auf baugleichen Anlagen an unterschiedlichen Standorten.

KKW Dukovany		KKW Greifswald 1)		KKW Paks 2)		KKW Kola 3)	
f [Hz]	Bauteil / Schwingungsursache	f [Hz]	Bauteil / Schwingungsursache	f [Hz]	Bauteil / Schwingungsursache	f [Hz]	Bauteil / Schwingungsursache
1,0	DE / horizontale Verlagerung	1,1	DE / horizontale Verlagerung	1,1-1,14	HKMP / DE Verlagerung	0,9- 1,5	ges. Loop / horizontale Verlagerung
1,9	DE / horizontale Verlagerung	2,1	DE / Verlagerung	2,39	DE / vertikale Verlagerung	1,9- 2,4	DE / horizontale Verlagerung
3,0	HKMP / Verlagerung	3,4	gesamter Loop / Schwingung	3,11 3,35	DE / Verlagerung HKMP / Verlagerung	3,0- 3,1	HKMP / horizontale Verlagerung
8,6	RDB / vertikale Schwingung			8,30	HKMP / Verlagerung	8,8- 8,9	HKMP / Pendelbewegung
11,0- 11,25 13,0- 13,5 16,5	RDB / Pendelbewegung in unterschiedliche Richtungen 4)	10,3 13,7 17,6 22,8	RDB / Pendelbewegung in unterschiedliche Richtungen 4)		RDB / Pendelbewegung in unterschiedliche Richtungen 5)	11,4 12,1 13,1 14,5 15,0	RDB / Pendelbewegung in unterschiedliche Richtungen
20,25	HKMP / DE Fluidresonanz					23,0	vertikale Schwingung des RDB
24,8	HKMP / Restunwuchten	24,8	HKMP / Restunwuchten		HKMP / Restunwuchten	24,8	HKMP / Restunwuchten

1) Numerische Schwingungsanalyse, zum Teil abgeglichen mit Messungen aus Greifswald und Dukovany /37/.

2) /41, 44, 46/

3) Schwingungsanalyse im KKW Kola bei Inbetriebnahme des Schwingungsüberwachungssystems /47/.

4) Detaillierte Untersuchungen über die Schwingungsrichtungen von WWER- 440 Reaktoren sind veröffentlicht /48/.

5) Aufgrund starken Bedämpfung durch Tiefpaßfilter der Betriebsinstrumentierung bisher nicht gemessen.

Tabelle 3.2: Vergleich der Schwingungen von Primärkreiskomponenten in unterschiedlichen Kernkraftwerken mit WWER-440 Reaktoren

In den vorangegangenen Abschnitten wurde wiederholt die Tatsache genutzt, daß sich einige Bauteilschwingungen mit Hilfe von physikalisch unterschiedlichen Meßsystemen feststellen lassen, obwohl diese ursprünglich nicht für diesen Zweck vorgesehen waren.

Tabelle 3.3 enthält eine Übersicht der Möglichkeiten zur Diversifizierung der Schwingungsüberwachung von Primärkreiskomponenten in WWER-440 Reaktoren.

Der unmittelbare Nutzen dieser Ergebnisse besteht in der Möglichkeit der Konsistenzprüfung im Falle einer vermeintlich festgestellten abnormalen Schwingung sowie in der ersatzweisen Bereitstellung der Information im Falle eines ausgefallenen Meßsystems.

Besonders im Fall der WWER 440 Reaktoren erscheint die Übertragung von diesen Ergebnissen auf WWER 440 Reaktoren an anderen Kraftwerksstandorten sinnvoll, da nur wenige WWER 440 Primärkreisläufe mit einer so umfangreichen Instrumentierung wie in Dukovany ausgestattet sind.

Bauteilschwingung	Frequenz	Überwachung simultan möglich mit
Schwingung von Hauptkühlmittelpumpen und Primärleitungen	2,9-3,0 Hz	Relativwegaufnehmer an den Dampferzeugern Beschleunigungsaufnehmer an den Gehäusen der Hauptkühlmittelpumpen
RDB-Schwingung 45/225 Grad	6,6 Hz	Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel Relativwegaufnehmer und Drucksensoren
Vertikalbewegung des RDB, eventuell in Verbindung mit einer Hohlraumresonanz	8,6 Hz	Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel, Relativwegaufnehmer Neutronenflußaußenkammern
RDB-Schwingung 45/225 Grad	11,0-11,25 Hz	Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel Neutronenflußaußenkammern
Schwingung aller Primärkreiskomponenten durch Unwuchtanregung der Hauptkühlmittelpumpen	24,8 Hz	Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel Druckaufnehmer an Primärkreisleitung Relativwegaufnehmer Neutronenflußaußenkammern

Tabelle 3.3: Möglichkeiten zur Diversifizierung der Schwingungsüberwachung von Primärkreiskomponenten in WWER-440 Reaktoren

3.3 DWR amerikanisch-koreanischer Bauart

Eine der neuesten bisher gebauten Varianten des Druckwasserreaktors bilden die von Asea Brown Boveri-Combustion Engineering (ABB-CE) gefertigten Anlagen. In der Republik Südkorea wurden am Kraftwerkstandort Yonggwang auf Basis des ABB-CE 80 Reaktordesigns (Referenzanlagen sind die drei Reaktoren in Palo Verde, USA) zunächst die Kraftwerksblöcke Yonggwang Block eins (YGN1) und Block zwei (YGN2) errichtet. Anschließend entstanden unter starker Beteiligung koreanischer Unternehmen die Blöcke drei (YGN3) und vier (YGN4). Diese beiden Blöcke bilden die Vorläufer zu den sogenannten KSNP- Anlagen (Korean Standard Nuclear Power), von denen vier Reaktoren zur Zeit im Bau und weitere acht bis zum Jahr 2015 in Planung sind.

Die Blöcke Yonggwang drei (YGN3) und vier (YGN4) sind mit Druckwasserreaktoren der ABB-CE Bauweise mit je zwei Dampferzeugern ausgestattet und verfügen über eine elektrische Leistung von 1000 MW_{el} . Es sind die ersten Reaktoren koreanischer Bauart. Sie sind zugleich mit einem internen Schwingungsüberwachungssystem, einem Körperschallüberwachungssystem sowie einem Leckageüberwachungssystem ausgestattet.

Im Rahmen der technisch-wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Südkorea wurden in den Blöcken drei (YGN3) und Block vier (Y G N 4) Messungen an der Außenkernneutronenflußinstrumentierung und an Beschleunigungssensoren des Körperschallüberwachungssystems durch den Verfasser vorgenommen. Dabei wurden die Signale der Primärkreisinstrumentierung betriebsbegleitend bei uneingeschränktem Betrieb aufgezeichnet und analysiert.

An den untersuchten Reaktoren koreanischer Bauart sind zwölf Neutronenflußaußenkammern, jeweils vier auf drei horizontalen Ebenen übereinander bei 35, 145, 215 und 325 Grad radial um den Reaktordruckbehälter herum angeordnet. Ein zusätzlich zu den Neutronenflußsignalen aufgezeichnete Beschleunigungssignal stammt von einem Sensor, der außen an der Reaktordruckbehälterbodenkalotte montiert ist.

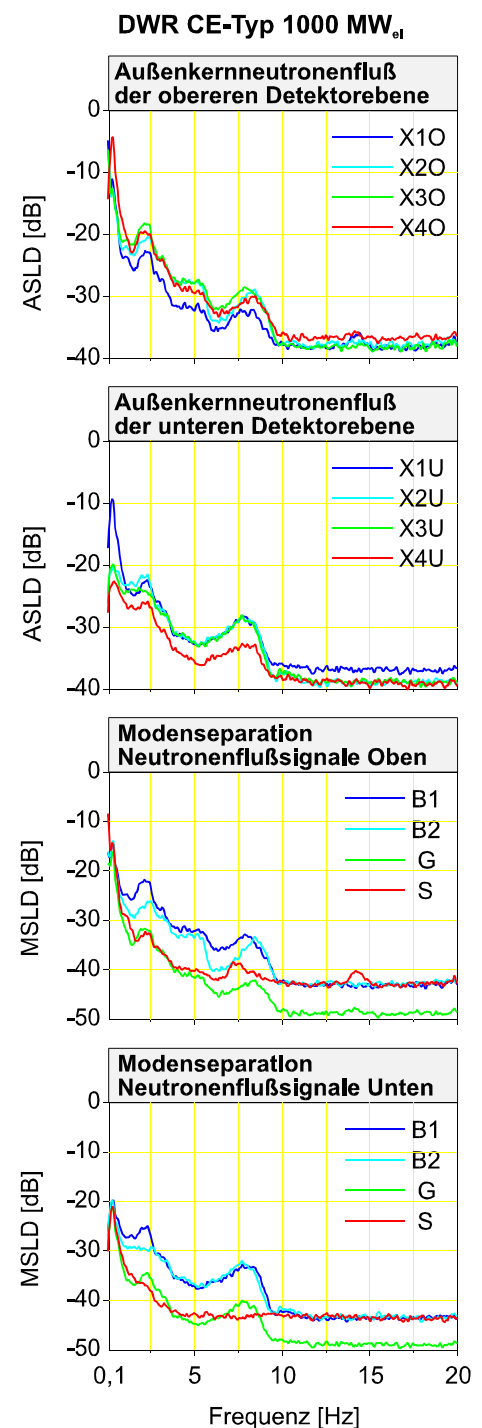


Bild 3.15: Spektrale Leistungsdichteverteilungen der Neutronenflußsignale aus YGN 3

Die autospektralen Leistungsdichten der Signale der Neutronenflußaußenkammern aus der oberen und unteren Meßebe im Block YGN 3 (Bild 3.15 oben) zeigen Peaks bei 2,5 Hz, 5,0 Hz, 7,9 Hz und 14,5 Hz. Im Block YGN 4 sind die Signaturen ähnlich, jedoch mit leicht verschobenen Frequenzlagen bei 2,5 Hz bis 3,0 Hz, 5,0 Hz, 6,3 Hz, 8,5 Hz und 15,0 Hz (Bild 3.16).

In beiden Blöcken separieren die Eigenschwingungen in der oberen und unteren Meßebe bei 2,5 Hz bzw. 3,0 Hz in den Balkenschwingungsmodus B1. Bei 5,0 Hz im Block YGN 3 bzw. 6,3 Hz im Block YGN 4 ist das in der oberen Meßebe genauso. Im Vergleich mit Tabelle 3.1 können klar die Schwingungen der Brennelemente in den ersten Modus bei 2,5 Hz bis 3,0 Hz und einem zweiten Modus bei 5,0 Hz bis 6,3 Hz identifiziert werden. Die Bandbreite der Schwingungen ist eine Eigenschaft des Abbrandes und der Kühlmitteltemperatur.

Bereits vor der Inbetriebnahme der beiden Blöcke wurden die sich für typische Reaktorbetriebsbedingungen ausbildenden Eigenfrequenzen und Schwingungsformen mit Hilfe einer FEM Berechnung, basierend auf einem Modell aus zwei wassergefüllten konzentrischen Zylindern, berechnet. Die Ergebnisse sagen den ersten Modus einer Balkenschwingung bei 6,9 Hz und den einer Schalenschwingung bei 21,6 Hz voraus. Erste Schwingungsmessungen vor der Inbetriebnahme, ergaben den ersten Modus einer Balkenschwingung von RDB und Kernbehälter mit einer Frequenz von 7,1 Hz /49/.

Mit Anwendung des Modenseparationsalgorithmus können die Schwingungsformen wie folgt unterschieden und klassifiziert werden:

Für den Block YGN 3 ergibt sich aus der Dominanz der beiden Balkenschwingungsmodi B1 und B2 eine Pendel- bzw. Taumelbewegung des Kernbehälters relativ zum RDB bei 7,9 Hz ohne Vorzugsschwingrichtung.

Eine Schalenschwingung ist im oberen Bereich des Kernbehälters relativ zum RDB am deutlich hervortretenden Peak im Schalenschwingungsmodus S bei 14,5 Hz erkennbar (Bild 3.15).

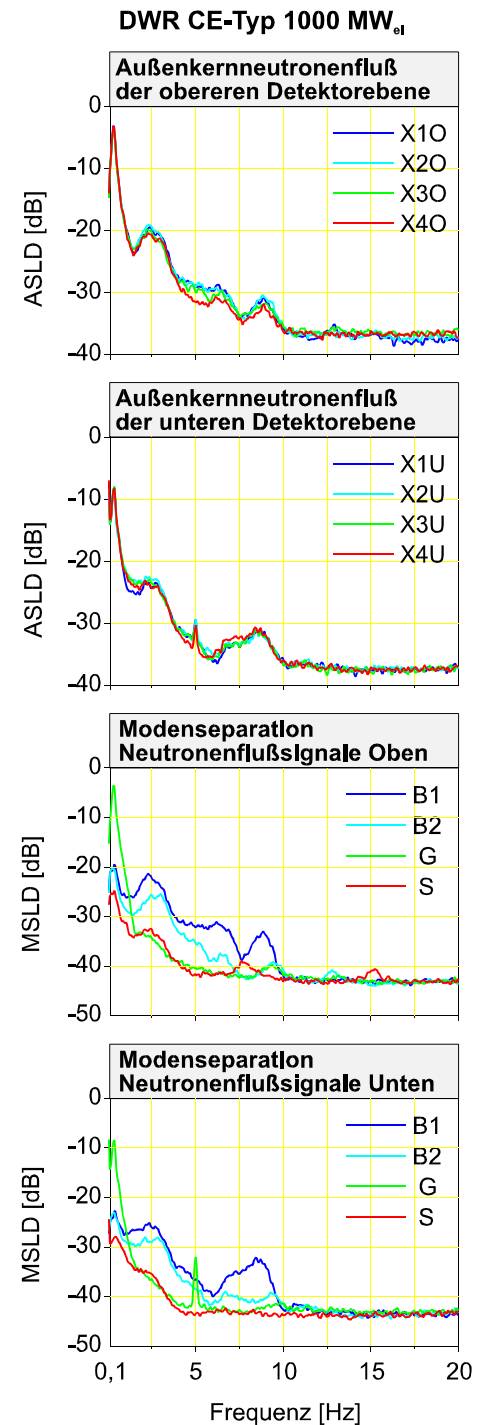


Bild 3.16: Spektrale Leistungsdichteverteilungen der Neutronenflußsignale aus YGN 4

Die Pendel- bzw. Balkenschwingung ist im Block YGN 4 bei einer Frequenz von 8,5 Hz hauptsächlich im Balkenschwingungsmodus B1 feststellbar. Im Gegensatz zur in beiden Richtungen gleichstarken Pendel- bzw. Balkenschwingung des Kernbehälters im Block YGN 3 ist also im Block YGN 4 eine deutliche Vorzugsschwingrichtung feststellbar.

Die Schalenschwingung des Kernbehälters relativ zum RDB ist auch hier nur in der oberen Meßebebene der Neutronenflußaußenkammern am wiederum deutlich hervortretenden Peak des Schalenschwingungsmodus S bei 15,0 Hz detektierbar (Bild 3.16).

In beiden Fällen wird die relative Schalen- oder Ovalisierungsschwingung von Kernbehälter und RDB erst durch das Modenseparationsverfahren sichtbar. Die hier vorgefundenen Eigenfrequenzen und Schwingungsformen sind in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der FEM Berechnung.

Eine weitere Möglichkeit zur Verifikation der mit dem Modenseparationsverfahren festgestellten relativen Pendel- bzw. Balkenschwingung ergibt sich anhand der Kohärenz zwischen simultan aufgezeichneten Neutronenfluß- und Beschleunigungssignalen. Obwohl in den Spektren der Beschleunigungssignale von Sensoren des Körperschallüberwachungssystems (V1 in Bild 3.17 und 3.18), die an der Außenwand der jeweiligen Reaktordruckbehälterbodenkalotten montiert sind, kein Peak bei der Eigenfrequenz der Relativbewegung von RDB und Kernbehälter zu erkennen ist, ist in der Kohärenzfunktion ein deutlicher Peak feststellbar (Bild 3.17 und 3.18).

Mit der Kohärenzfunktion läßt sich die relative Pendel- oder Taumelbewegung von RDB und Kernbehälter bei 7,9 Hz im Block YGN 3 und bei 8,5 Hz im Block YGN 4 identifizieren (Bild 3.17, 3.18).

Erwartungsgemäß ist die Kohärenz zwischen dem Beschleunigungssignal und der unteren Neutronenflußaußenkammer (X1U) im Block YGN 3 am höchsten, da

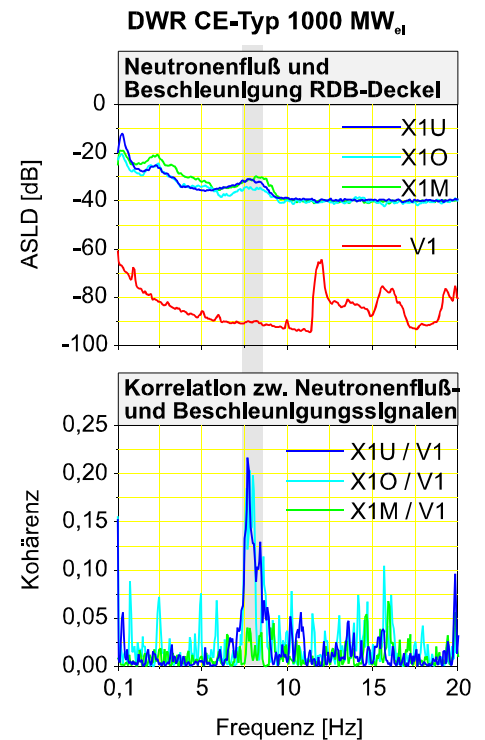


Bild 3.17: Korrelationsanalyse mit Beschleunigungs- und Neutronenflußsignal YGN 3

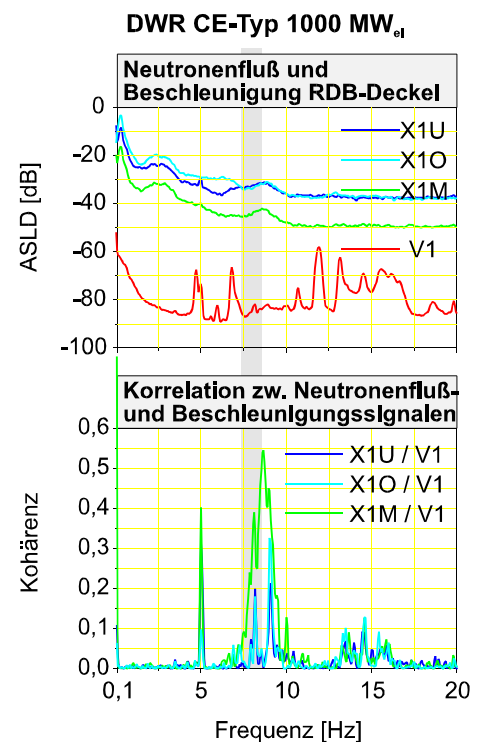


Bild 3.18: Korrelationsanalyse mit Beschleunigungs- und Neutronenflußsignal YGN 4

der Kernbehälter im oberen Bereich durch RDB-Deckel und Niederhaltefedern konstruktiv fixiert ist und so im unteren Bereich die größten Pendelamplituden ausführen kann. Im Block YGN 4 ist offensichtlich der Bewegungsspielraum im unteren Bereich des Kernbehälters eingeschränkt, so daß hier im mittleren Meßbereich der Neutronenflußaußenkammern (X1M) die höchste Kohärenz festzustellen ist. Die Bewegungseinschränkung im unteren Bereich entsteht bei bestimmten Temperaturbedingungen durch ein spielfreies Anliegen des Kernbehälters an Führungselemente (engl. „Guide Lug“ oder „Snubber Assembly“).

Ein weiteres voneinander abweichendes Schwingungsverhalten in beiden Blöcken läßt sich im Frequenzbereich um 0,5 Hz mit dem gleichphasigen Modus G feststellen (Bild 3.17 und 3.18). Im Block YGN 3 liegen bei dieser Frequenz die Amplituden aller Moden übereinander. Im Block YGN 4 ist die Amplitude des gleichphasigen Modus G um mehr als 12 dB größer als die der anderen Moden. Im Vergleich mit den Erfahrungen aus anderen Druckwasserreaktoren kann bei dieser Frequenz im Block YGN 4 auf eine Hohlraumresonanz zwischen dem Gasvolumen des Druckhalters und unter Umständen kleinen Gasvolumina im RDB, z.B. verursacht durch unterkühltes Sieden, geschlossen werden.

Zum Zeitpunkt der Messung war der Abbrandzustand der Kernbeladung in den beiden Blöcke stark unterschiedlich, was erfahrungsgemäß einen Unterschied in den Kerneintrittstemperaturen des Kühlmittels von etwa 10 bis 20 Kelvin bedeutet. Deswegen ist das unterschiedliche Schwingungsverhalten beider Blöcke hier plausibel.

3.4 DWR Framatome Bauart

Im zweiten Abschnitt der technisch-wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Südkorea wurden in den Koreanischen Kernkraftwerken Ulchin Block eins (UL1) und Block zwei (UL2) vom Autor Messungen zur Identifizierung von Bauteilschwingungen durchgeführt. Wenngleich in Ulchin schon zuvor entsprechende Messungen an der Außenkerninstrumentierung vorgenommen wurden, werden hier erstmals Signale von Primärkreisdruck und Inkernneutronenfluß zur Analyse von Bauteilschwingungen in den Ulchin Reaktoren herangezogen /50/.

Beide Kernkraftwerke sind mit leichtwassermoderierten und -gekühlten Druckwasserreaktoren der Framatome Bauweise und mit je drei Dampferzeugern ausgestattet und produzieren je eine elektrische Leistung von 900 MW_{el}. Von den insgesamt 58 Reaktoren welche die Electricité de France (EDF) allein in Frankreich betreibt, sind 34 Reaktoren in dieser 900 MW_{el} Framatome Standardbauweise ausgeführt. Es existieren zwei konstruktiv unterschiedliche Ausführungen, eine mit einem zylindrischen thermischen Schild (sogenannte „CPO“-Reaktoren) und eine bei der der thermische Schild aus mehreren Sektoren zusammengesetzt ist (sogenannte „CPY“-Reaktoren). In Frankreich sind 28 von den insgesamt 34 Reaktoren der 900 MW_{el} Klasse genau wie die beiden Blöcke UL1 und UL2 in der CPY-Bauweise mit sektoriertem thermischen Schild ausgeführt.

Seit 1980 sind in den Reaktoren der EDF zusammen über mehr als 300 Brennelementzyklen Schwingungsmessungen an Primärkreiskomponenten mit den Signalen von Neutronenflußaußenkammern und Beschleunigungsaufnehmern durchgeführt worden. Aus den gemessenen Signalen werden normierte autospektrale Leistungsdichten sowie Kohärenz- und Phasenfunktionen berechnet und in einer zentralen Datenbank gespeichert. Die Daten werden mit den Betriebsparametern zum Zeitpunkt der Messung abgeglichen und auf Anzeichen für Veränderungen der mechanischen Integrität der Reaktoreinbauten untersucht. Die meisten Daten und Analysen liegen für die 900 MW_{el} CPY-Reaktoren vor /51/.

In Ulchin wurden in beiden Blocken UL1 und UL2 die Signale von jeweils acht Neutronenflußaußenkammern, sechs Beschleunigungsaufnehmern am Reaktordruckbehälter, ein Primärkreisdrucksensors und verschiebbare Neutronenflußfahrkammern auf verschiedenen Positionen innerhalb des Reaktorkerns, in Kombinationen zu je acht Kanälen parallel rückwirkungsfrei mit Isolationsverstärkern ausgekoppelt, Bandpassgefiltert und sofort vor Ort mittels A/D-Wandlerkarte und tragbarem Personal Computer digitalisiert und gespeichert. Die Signale wurden, wie üblich, betriebsbegleitend bei uneingeschränktem Anlagenbetrieb aufgezeichnet und analysiert.

3.4.1 Fahrkammermessungen im Reaktorkern

Die Neutronenflußschwankungen innerhalb des Reaktorkerns wurden hier mit Hilfe von Fahrkammern gemessen, die gewöhnlich zur temporären Messung des statischen Neutronenflußprofils und zur Abbrandbestimmung der festinstallierten SPN-Detektoren eingesetzt werden.

Fahrkammern sind verschiebbare Miniaturspaltkammern, die mit Hilfe eines Fahrkammerantriebes durch ein Rohrsystem bis ins Innere des Reaktorkerns zwischen die Brennelemente transportiert werden können.

Die Neutronenflußmessungen innerhalb des Reaktorkerns erfolgten mit vier (UL1) bzw. fünf (UL2) betrieblichen Fahrkammern innerhalb von Brennelementen auf den in Bild 3.19 skizzierten Kernpositionen, jeweils in der unteren Kernhälfte auf Höhe der unteren Meßebe der Neutronenflußaußenkammern, etwa 1,6 Meter über dem unteren Kerngitter und in der oberen Kernhälfte auf Höhe der oberen Meßebe der Neutronenflußaußenkammern etwa 2,8 Meter über dem unteren Kerngitter.

Die Fahrkammerkanäle 15 und 29 bzw. 35 und 48 sind innerhalb der nebeneinander stehenden Brennelementen in unterschiedlichen Kernhälften nahe der Kernmitte angeordnet. Die Fahrkammerkanäle 6, 7, 22 und 43 sind auf randnahen Kernpositionen gegenüber einer Neutronenflußaußenkammer liegend (Bild 3.19).

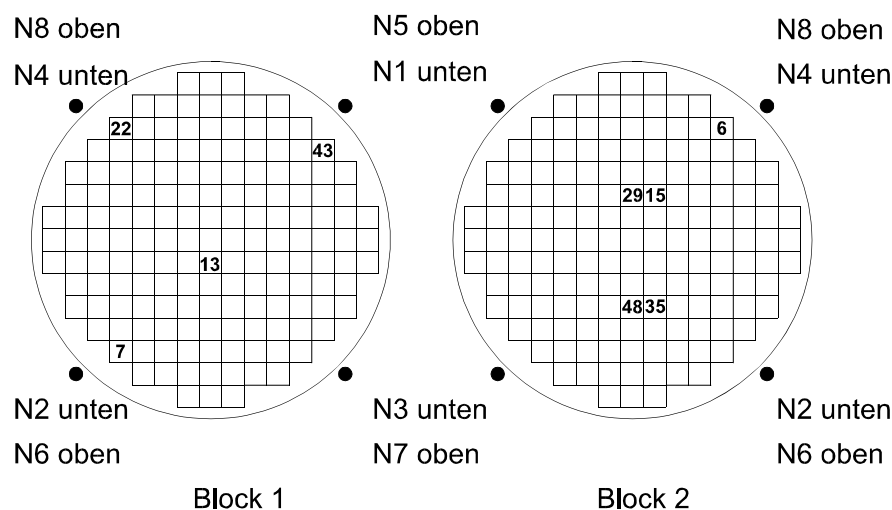


Bild 3.19: Position der Neutronenflußmeßstellen in den Ulchin Reaktoren

Die autospektralen Leistungsdichten der Neutronenflußsignale von den Fahrkammerpositionen aus der Kernmitte (I15, I29, I35 und I48) weisen Peaks in den Frequenzbereichen von 3,0 Hz bis 5,0 Hz, 5,0 Hz bis 6,5 Hz, 7 Hz bis 8 Hz, um 15 Hz und zwischen 15 Hz bis 20 Hz auf.

In der Messung 1,6 Meter über dem unteren Kerngitter ist in dem Signal I35 ein auffälliger Peak bei etwa 3 Hz und in dem Signal I48 bei etwa 7 Hz. Der Peak bei 3 Hz ist in der Messung 2,8 Meter über dem unteren Kerngitter ebenfalls vorhanden, der Peak bei 7 Hz jedoch fast verschwunden (Bild 3.20).

Die Ursache dieser Peaks sind mechanische Schwingungen der Brennelemente und Instrumentierungslanzen,

die sich über den ortsabhängigen Neutronenflußgradienten in die Neutronenflußsignale abbilden. Bei der 3 Hz Schwingung handelt es sich um den ersten Modus einer Brennelementschwingung, bei der 7 Hz Schwingung um einen zweiten Modus der in der oberen Kernhälfte kaum noch nachweisbar ist. Die Eigenfrequenzen beider Brennelementmodi sind aus den 900 MW_{el} CPY-Reaktoren der EDF für den Fall der normalen mechanischen Integrität der Brennelemente zwischen 2 Hz und 5 Hz (erster feststellbarer Mode) und 5 Hz bis 7 Hz (zweiter feststellbarer Mode) bekannt /51/.

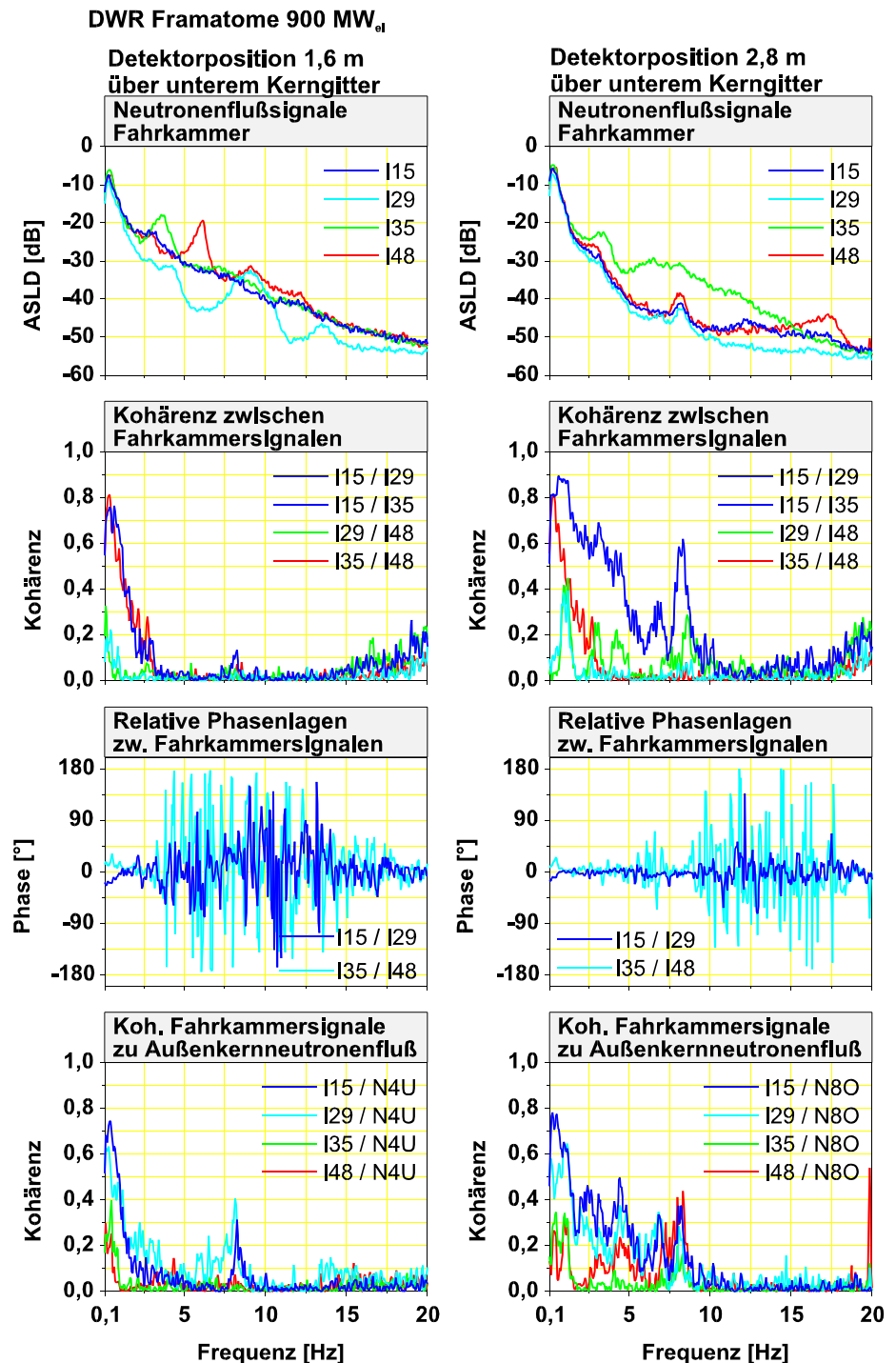


Bild 3.20: Korrelationsanalyse mit Neutronenflußsignalen, gemessen innerhalb von Fahrkammerrohren

Die Signale aus benachbarten Brennelementen (I29/I15 und I48/I35) sind in der unteren Kernhälfte im Frequenzbereich von 1 Hz bis 3 Hz von etwa 65 Prozent bis auf unter fünf Prozent steil abnehmend korreliert. Die relative Phasenlage der Signale ist in Phase, d.h. nicht zeitverschoben. Signale aus nicht benachbarten Brennelementen sind hier nicht korreliert, in /51/ kann jedoch eine Kohärenz von über 50 Prozent für die Signale eines Thermoelements am Brennelementaustritt und einer Fahrkammer im selben Brennelement entnommen werden. Als Ursache sind deswegen lokale thermohydraulische Effekte wie Dichte- bzw. Temperaturschwankungen des Moderators im Kühlkanal wahrscheinlich.

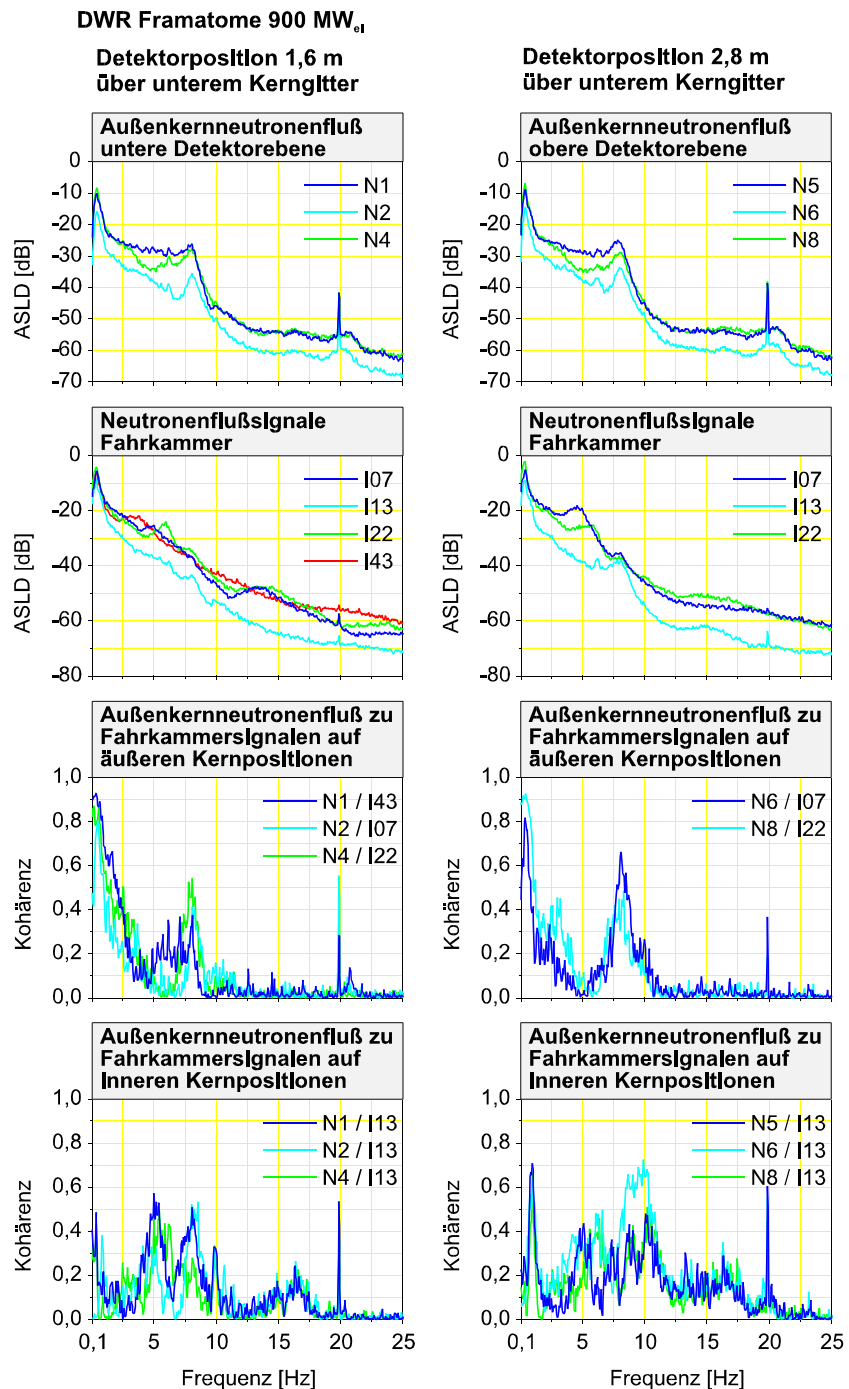


Bild 3.21: Korrelationsanalyse mit In-Kern und Außenkernneutronenflußsignalen

In der oberen Kernhälfte sind die Signale aus benachbarten Brennelementen (I29/I15 und I48/I35) im Frequenzbereich von 1 Hz bis 6 Hz von etwa 90 Prozent bis unter zehn Prozent korreliert. Für die Kombination I15/I29 ist zusätzlich eine Kohärenz von über 30 Prozent bei 6,5 Hz erkennbar, die auf einen Reaktivitätseffekt aufgrund einer Druckfluktuation zurückzuführen ist (Bild 3.23 und 3.24).

Die sich in horizontalen Kernhälften gegenüber liegenden Signalkombinationen (I29/I48 und I15/I35) sind in der oberen Meßebeine bei einer Frequenz von 2 Hz korreliert. Im Gegensatz zu den direkt benachbarten Brennelementen (I29/I15 und I48/I35) ist das Verhalten zu kleinen Frequenzen hin

diametral (Bild 3.20). Die Ursache ist hier eine Druckschwankung, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

Um die Frequenz der unter Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Relativbewegung von Kernbehälter und RDB von 8 Hz sind die Fahrkammersignale untereinander und mit den in Bild 3.24 dargestellten Neutronenflußaußenkammersignalen korreliert.

Die Kohärenzen von In-Kern Neutronenflußsignalen auf einer inneren Kernposition (I13) und auf äußeren Kernpositionen (I07 und I22) mit Außenkernneutronenflußsignalen der unteren Meßebe (N1, N2, N4) und der oberen Meßebe (N5, N6, N8) zeigt Bild 3.21.

Auf beiden Meßebenen haben die In-Kern Neutronenflußsignale auf den äußeren Kernpositionen mit den Außenkernneutronenflußsignalen im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 1,0 Hz Kohärenz von bis zu 90 Prozent und im Bereich der Relativbewegung von Kernbehälter und RDB um 8 Hz Kohärenz von etwa 50 Prozent. Die Kohärenzen der Außenkammersignale mit einem In-Kern Neutronenflußsignal auf einer Kernmittenposition (I13) sind davon abweichend im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 1,0 Hz auf beiden Meßebenen deutlich niedriger. Die Ursache sind thermohydraulische Schwankungen im einfließenden Kühlmittel, die z.B. durch kleine Unterschiede in den Dampferzeugern erzeugt werden. Auch kleine Leistungsschwankungen zwischen den einzelnen Primärkreisschleifen liegen in diesem Frequenzbereich und können so zu diesem Effekt beitragen (Bild 3.21).

Um 5 Hz sind Peaks auf beiden Meßebenen nur in Kombination mit dem In-Kern Neutronenflußsignal auf der Kernmittenposition mit Kohärenzen bis 50 Prozent. Der zugrunde liegende Effekt ist derzeit noch unklar. Eine Schwingung des Kernverbandes, bestehend aus Kernbehälter und Brennelementen wäre eine mögliche Ursache.

Nur in der oberen Meßebe ist zwischen 1 Hz und 2 Hz ein Peak mit etwa 70 Prozent Kohärenz. Er ist vermutlich auf die nur in der oberen Kernhälfte durch unterkühltes Sieden entstehenden Dampfblasen zurückzuführen.

3.4.2 Abbildung von Druckfluktuationen in Neutronenflußsignalen

Die autospektralen Leistungsdichten der Signale jeweils eines Druckaufnehmers (P01) am Primärkreis aus beiden Blöcken sind im Frequenzbereich von 1,0 Hz bis 25,0 Hz nahezu identisch. Signifikante Peaks sind bei 6,5 Hz, zwischen 9 Hz und 10 Hz, um 17 Hz und etwas weniger als 20 Hz zu erkennen (Bild 3.22).

Die Druckschwankungen bei 6,5 Hz sind mit Signalen der Neutronenflußaußenkammern sowie mit Signalen der Neutronenflußfahrkammer und Beschleunigungssignalen an der RDB Bodenkalotte korreliert. (Bild 3.22 und 3.23). Ursache ist eine Druckschwankung im Primärkreis, die einen Reaktivitätseffekt zur Folge hat.

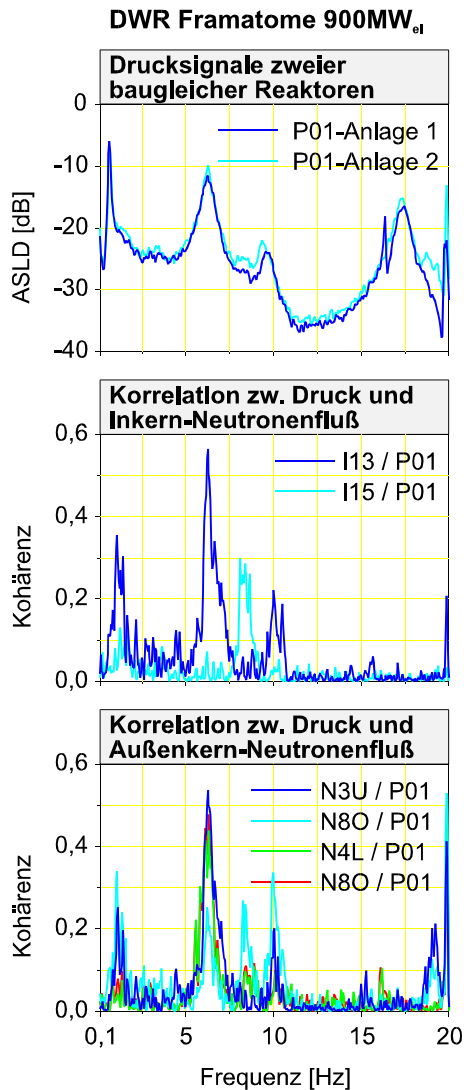


Bild 3.22: Vergleich von Fluidresonanzen und Korrelation mit Neutronenflußsignalen

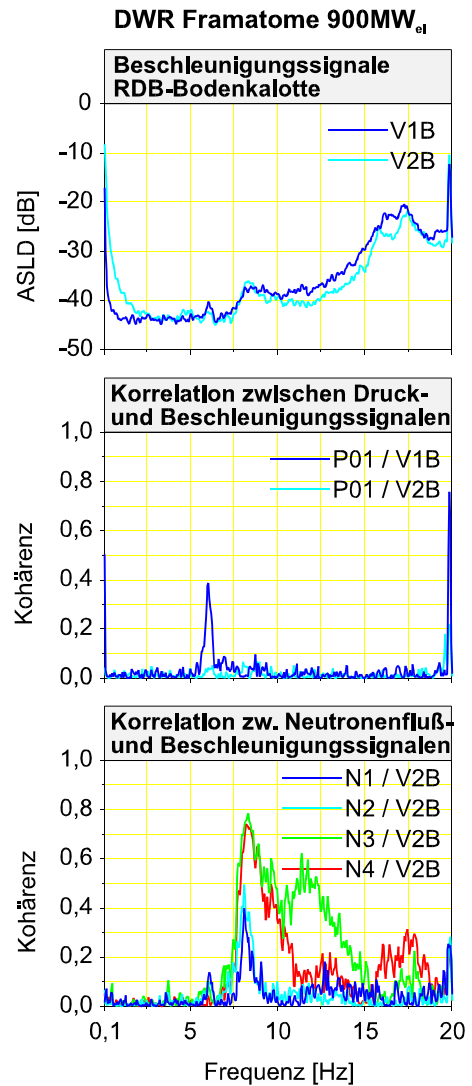


Bild 3.23: Korrelationsanalyse mit Druck- und Beschleunigungssignalen

Der breite Peak um 17 Hz in den autospektralen Leistungsdichten der Drucksignale ist weder mit den Neutronenfluß- noch mit den Beschleunigungssignalen an der Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters korreliert (Bild 3.23). Die Ursache ist hier wahrscheinlich die Vertikalbewegung des Reaktordruckbehälters /51/.

Der schmale, nadelförmige Peak bei 20 Hz ist auf den Drehton der Hauptkühlmittelpumpen zurückzuführen, deren Pumpenwellen mit 1190 Umdrehungen pro Minute drehen. Bei der entsprechenden Drehfrequenz von 19,8 Hz ist eine Kohärenz zwischen den Signalen von Neutronenfluß und Beschleunigung an der Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters erkennbar (Bild 3.22).

3.4.3 Relativbewegung von Reaktordruck- und Kernbehälter

Die autospektralen Leistungsdichten der jeweils vier Außenkammersignale (Positionen siehe Bild 3.19) pro Instrumentierungsebene und Block sind mit den korrespondierenden modenseparierten Leistungsdichten in Bild 3.24 dargestellt.

Im Gegensatz zu den anderen hier untersuchten Reaktoren sind die ASLD der Außenkammersignale in den beiden Blöcken UL1 und UL2 nicht deckungsgleich. Die Spektren der Außenkammern N2 unten und N6 oben im Block UL1 sowie N3 unten und N7 oben im Block UL2, weisen gegenüber allen anderen Positionen deutlich geringere Amplituden auf. An dieser radialen Position befinden sich in beiden Blöcken zusätzliche Einbauten im Wasserspalt zwischen RDB und Kernbehälter.

Anhand der Modenseparation lassen sich die Schwingungen bei 8 Hz in beiden Blöcken der Relativbewegung zwischen RDB und KB zuordnen. Die Zuordnung ist im Block UL2 eindeutig. Hier überwiegen beide Balkenschwingungsmodi deutlich. Das läßt für den Block UL2 im Gegensatz zum Block UL1 auf eine freie Pendelbewegung des KB relativ zum RDB schließen.

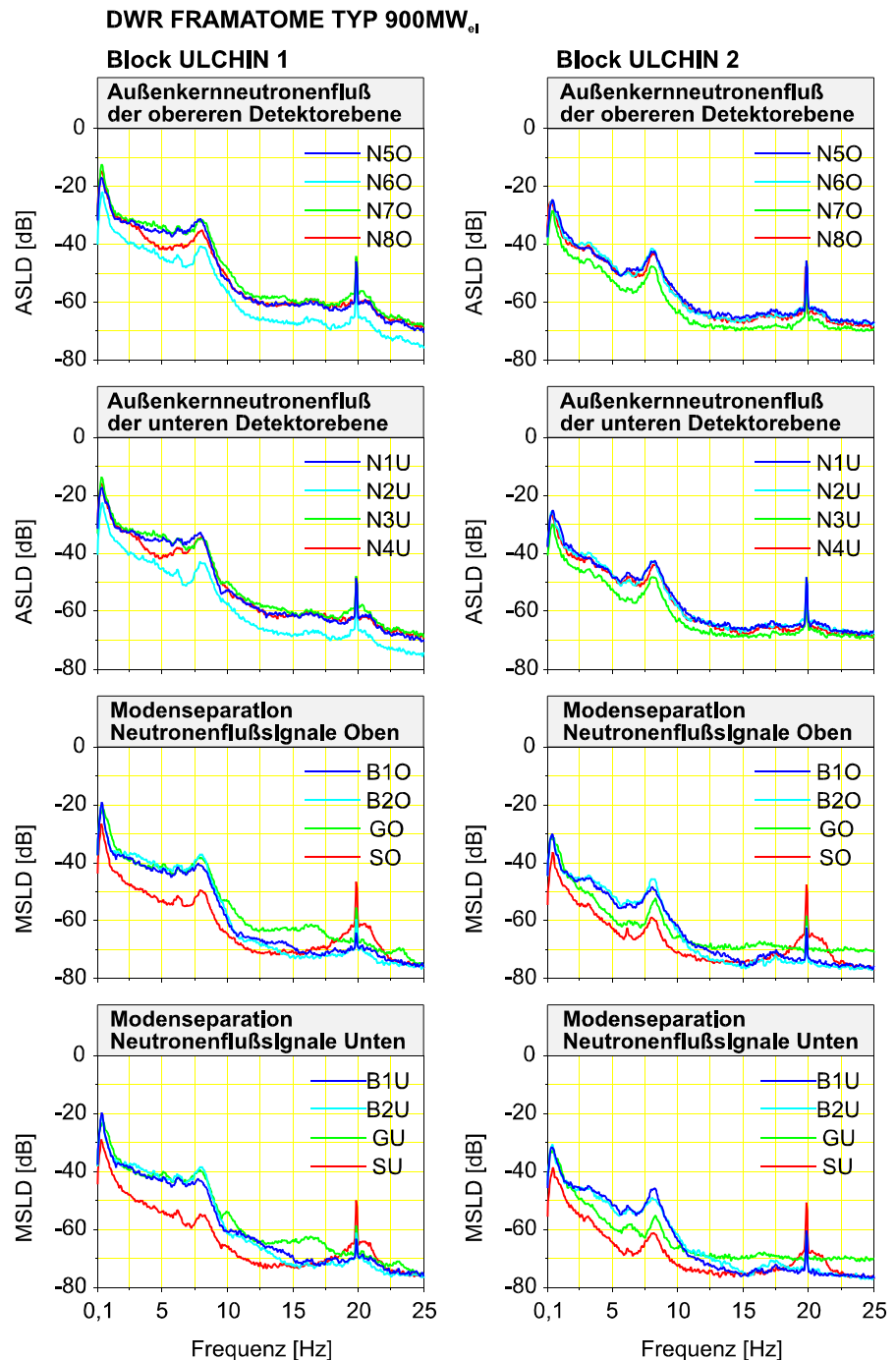


Bild 3.24: Autospektrale Leistungsdichten und Modenseparation von Neutronenflußsignalen aus zwei baugleichen Framatome DWR

Für den Block UL1 ist der gleichphasige Modus auf beiden Meßebenen bei 8 Hz nicht deutlich von den Balkenschwingungsmodi getrennt. Außerdem treten im gleichphasigen Modus zusätzliche Schwingungen bei 10 Hz und um 17 Hz auf. Das indiziert zumindest zeitweise einen Kontakt zwischen KB und RDB der die freie Pendelbewegung behindert (vgl. /51/).

Die Schalenschwingungsmodi sind in beiden Blöcken sowohl in der oberen wie auch in der unteren Meßebene nur um 20 Hz deutlich höher als die anderen Modi. Es handelt sich eindeutig um eine Ovalisierungsschwingung des KB relativ zum RDB. Es ist auffällig, daß die erste Harmonische des Drehtons der Hauptkühlmittelpumpen im Zentrum der Schalenschwingungsfrequenz liegt. Das ist in den 900 MW_{e1} CPY-Reaktoren der EDF anders (vgl. /51/). Dort ist der Drehton der Hauptkühlmittelpumpen bei 25 Hz und kann nicht mit der dort ebenfalls mit einer Frequenz um 20 Hz vorhandenen Ovalisierungsschwingung des KB relativ zum RDB in Resonanz kommen.

4. Bauteilschwingungen in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktor

In Siedewasserreaktoren wird der Dampf im Reaktordruckbehälter erzeugt und getrocknet. Der Druck im RDB eines Siedewasserreaktors ist nur etwa halb- und die Behältergröße ungefähr doppelt so groß wie bei den im vorangegangenen Kapitel behandelten Druckwasserreaktoren. Die Moderator- und Kühlmitteldichte ist dadurch im Wesentlichen eine Funktion des Dampfgehaltes. Der Dampfgehalt ist deshalb ein wichtiger Parameter für die Reaktivität. Die mit einer Änderung des Dampfgehaltes verbundene Rückwirkung auf den Neutronenfluß und damit auf die Leistungserzeugung im Reaktor ist wiederum entscheidend für die Dampferzeugung. Veränderungen des Reaktordruckes bewirken Veränderungen des volumetrischen Dampfgehaltes und damit der thermischen Leistungserzeugung. In Abhängigkeit von den Zeitkonstanten im Reaktor, ist bei ungünstiger Phasenlage eine Resonanz möglich, die zu instabilem Verhalten führen kann. Es wurden bereits zahlreiche Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten der Siedewasserreaktoren /52, 53, 54, 55, 56/ und zu den Eigenschaften des zweiphasigen Wasser-Dampf Gemisches innerhalb der Kühlkanäle anhand von Analysen der Neutronenflußfluktuationen /57, 58, 59, / durchgeführt.

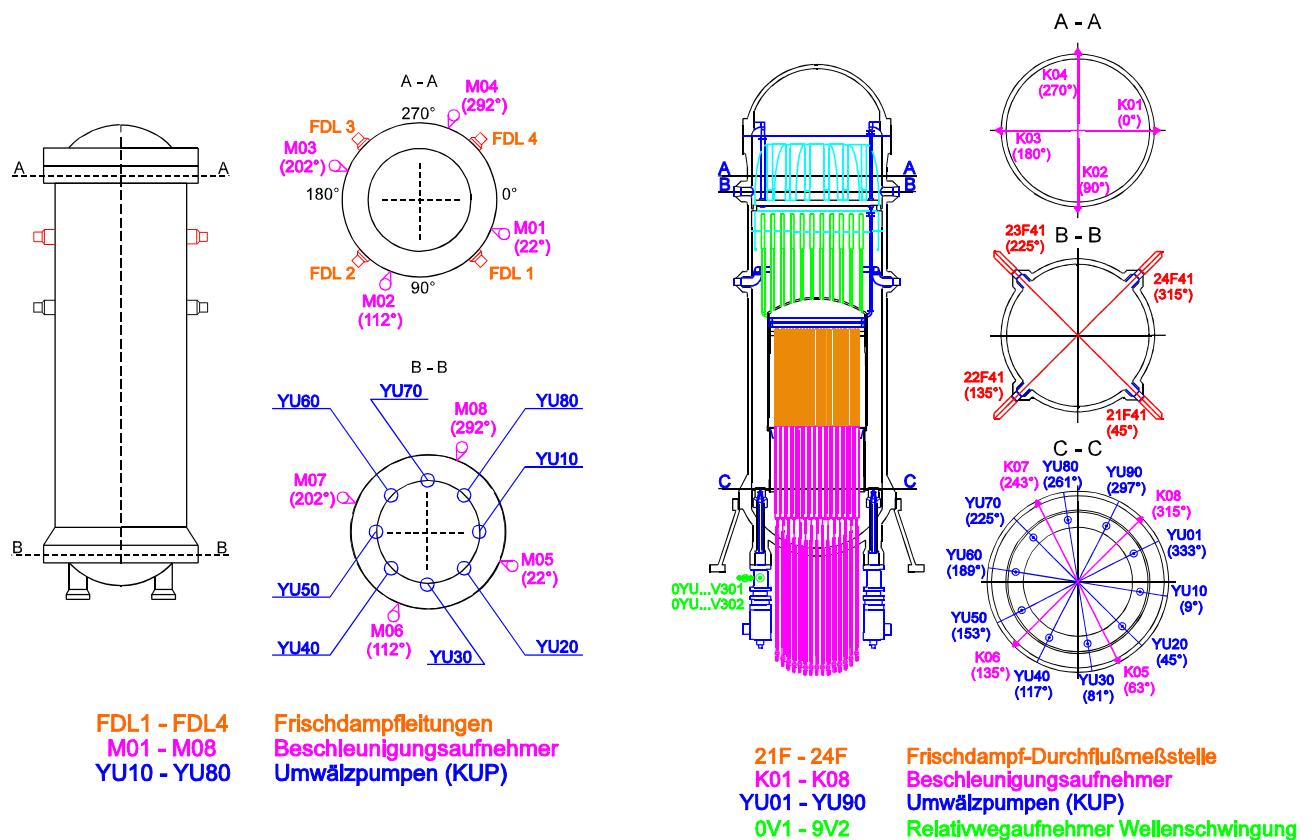


Bild 4.1: Instrumentierung des 800 MW_{el} und des 1300 MW_{el}-Reaktors

Weitere Arbeiten sind zu schwingenden beziehungsweise anschlagenden Brennelementen, Brennelementkästen und Instrumentierungslanzen veröffentlicht worden /60, 61, 62, 63/.

In dieser Arbeit werden die Signale der KÜS-Instrumentierung und der Leistungsverteilungsdichte- (LVD) Instrumentierung aus vier verschiedenen Siedewasserreaktoranlagen mit dem Modenseparationsverfahren untersucht. Die SWR-Anlagen gehören zu verschiedenen Leistungsklassen, 800 MW_{el} und 1300 MW_{el}. Zwei Anlagen sind baugleich (SWR Baulinie 72, Block 1 und Block 2) mit je etwa 1300 MW_{el}.

4.1 Schwingungen des Reaktordruckbehälters

Die Reaktordruckbehälter haben jeweils vier piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer im oberen Bereich des RDB auf Höhe der Frischdampfauslässe und an der RDB-Bodenkalotte in der Nähe der Zwangsumwälzpumpen. An den Reaktoren der SWR Baulinie 72 sind darüber hinaus noch vier weitere Beschleunigungsaufnehmer im Bereich der Frischdampfaustritte montiert (Bild 4.1 und 4.2).

Die Detektoren der KÜS-Instrumentierung werden herstellerabhängig mit dem Buchstaben M und K sowie der jeweiligen Detektornummer (Bild 4.1 und 4.2) angegeben. Die Überwachungssysteme sind von zwei verschiedenen Herstellern.

Zum Erkennen abgelöster oder lockerer Teile werden in die Amplitudenwerte der Körperschallsignale in einem festgelegten Frequenzbereich überwacht. Lose Gegenstände können durch die Strömung im Behälter an dessen Innenwand stoßen und dadurch Schallwellen auslösen, die vom Körperschallüberwachungssystem registriert werden. In Ergänzung zu der automatischen Überwachung wird in der Regel auch eine subjektive Überwachung durch Abhören der Geräusche in regel-mäßigen Abständen vorgenommen. Die Signale der Körperschallmessketten sind unterhalb und oberhalb des in der DIN 25475 Teil 1 festgelegten Frequenzbereichs (1000 Hz - 10000 Hz) oft durch

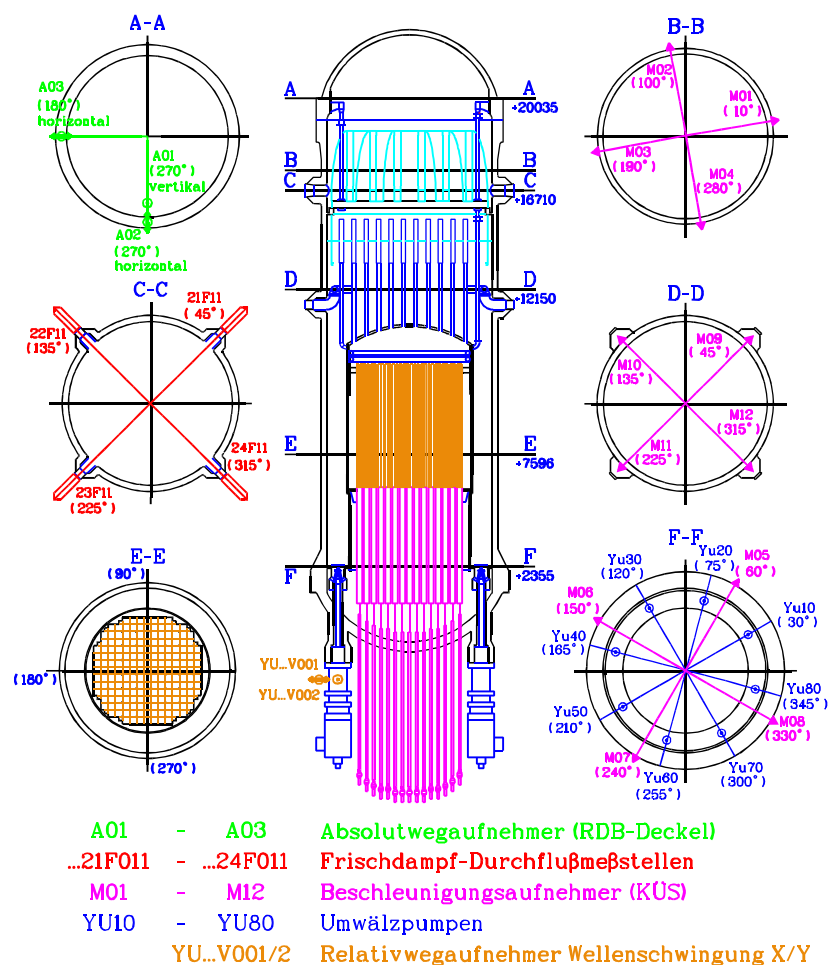


Bild 4.2: Instrumentierung in den Blöcken der SWR Baulinie 72

regel-mäßigen Abständen vorgenommen. Die Signale der Körperschallmessketten sind unterhalb und oberhalb des in der DIN 25475 Teil 1 festgelegten Frequenzbereichs (1000 Hz - 10000 Hz) oft durch

Hoch- und Tiefpaßfilter bedämpft. Dennoch lassen sich durch geeignete Signalkonditionierung auch in diesen Frequenzbereichen Schwingungen nachweisen. Es muß allerdings beachtet werden, daß die Sensorempfindlichkeit in diesen Frequenzbereichen teilweise außerhalb des Linearitätsbereiches ist und das Schwingungsamplituden deswegen nur relativ zueinander ausgewertet werden können, oder die Übertragungsfunktion der Sensoren vorher ermittelt werden muß.

Die piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer detektieren auch ohne das Vorhandensein loser Teile beim Betrieb der Reaktoranlage Hintergrundgeräusche, die sich aus monotonen Grundgeräuschen und betriebsbedingten Einzelschallereignissen zusammensetzen. Die monotonen Grundgeräusche setzen sich wiederum aus stochastischen (z. B. Kühlmittelströmungsgeräusch) und deterministischen Anteilen (z. B. drehzahlabhängiges Pumpengeräusch) zusammen. Ähnlich zu der aus Druckwasserreaktoren gut bekannten Schwingung von Reaktordruckbehälter und Kernbehälter (siehe Kapitel 3), lassen sich Schwingungen von Reaktordruckbehälter und Kernmantel in Siedewasserreaktoren in diesem Hintergrundgeräusch der piezoelektrischen Beschleunigungs-aufnehmer nachweisen. Hierfür werden Korrelationsanalysen mit den Signalen der Körperschall-sensoren zusammen mit den Signalen der Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel oder Neutronen-flußsignalen von LVD-Lanzen herangezogen, die am Rand des Reaktorkerns installiert sind / 63, 64/.

Die Schwingungen der Reaktordruckbehälter der vier verschiedenen SWR-Blöcke werden mit dem Modenseparationsverfahren untersucht und auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede verglichen. Hierzu werden die Signale der vier Beschleunigungsaufnehmer der obersten Meßebenen am RDB (Bild 4.1 und 4.2) verwendet.

In den Spektren aller vier oberen Beschleunigungsaufnehmer aus der

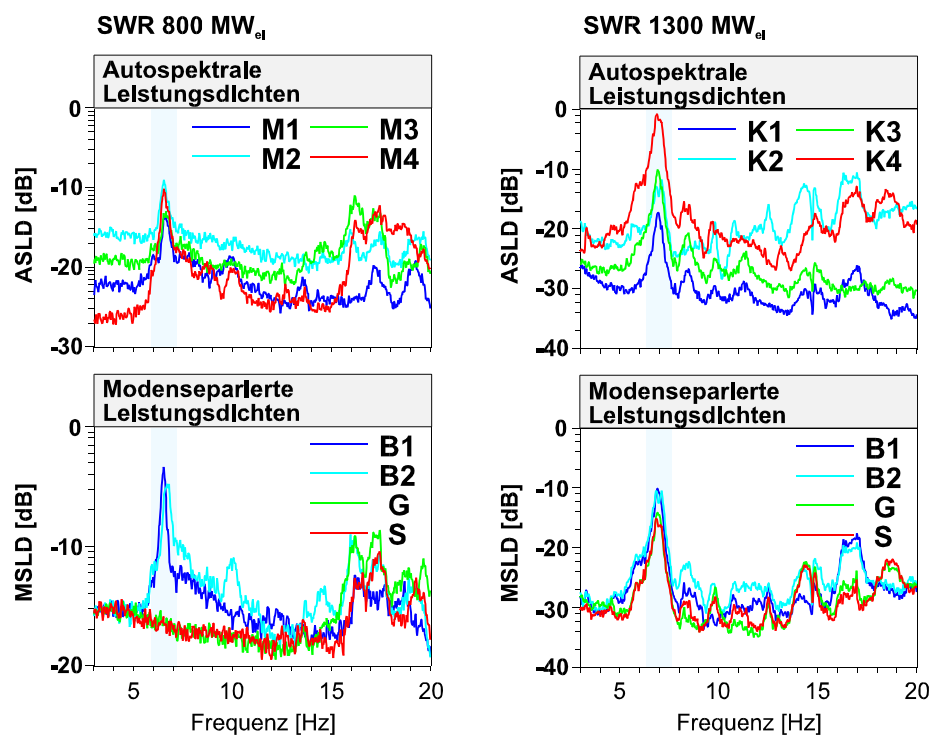


Bild 4.3: Spektrale Leistungsdichten der Beschleunigungssignale

800 MW_{el}- Anlage ist bei 6,5 Hz ein Peak zu erkennen, der auf die RDB-Pendelbewegung zurückzuführen ist. Weitere Peaks sind bei 10 Hz und zwischen 15 Hz und 20 Hz zu erkennen. Die Leistungsdichten der RDB-Pendelbewegung werden hier vollständig durch die beiden Balkenschwingungsmodi B1 und B2 repräsentiert.

Die anderen Modi haben in der 800 MW_{el}-Anlage bei 6,5 Hz keinen erkennbaren Peak (Bild 4.3, linke Hälfte). Damit ist das Modell, das bei der Berechnung des Modenseparationsverfahrens vorausgesetzt wurde, hier zutreffend. Die balkenschwingungsartigen Auslenkungen des Reaktordruckbehälters der 800 MW_{el}-Anlage verursachen die wesentlichen Signalanteile im dargestellten Frequenzbereich.

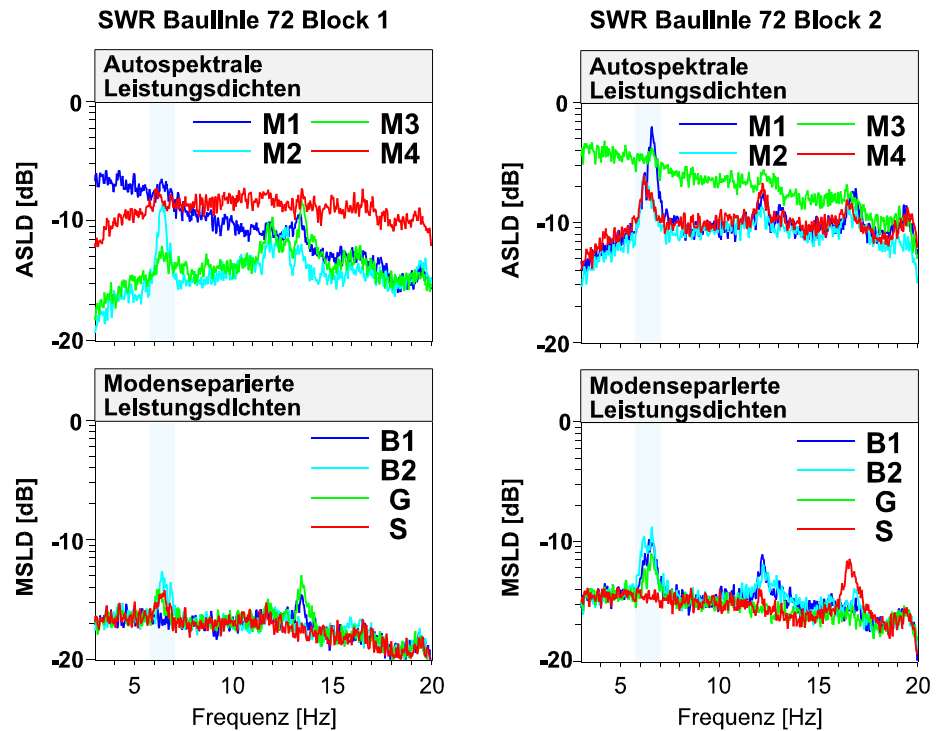


Bild 4.4: Leistungsdichten der Beschleunigungssignale aus zwei baugleichen Reaktoren

Die Modenseparation für die RDB-Bewegung der 1300 MW_{el}-Anlage ist bei 7 Hz nicht vollständig, d.h. nicht nur die Balkenschwingungsmodi B1 und B2, sondern auch der gleichphasige Modus G und der Schalenschwingungsmodus S bekommen Leistungsichteanteile zugeordnet (Bild 4.3, rechte Hälfte). Die gemessene 7 Hz RDB-Bewegung der 1300 MW_{el}-Anlage verhält sich also nicht wie im Modell vorausgesetzt wurde. Dafür ist hier zwischen 16 Hz und 17 Hz eine Schwingung erkennbar, die sehr gut durch die beiden Balkenschwingungsmodi B1 und B2 dargestellt wird. Es handelt sich hierbei ebenfalls um eine RDB-Pendelbewegung, jedoch mit unterschiedlicher Schwingrichtung als die 7 Hz Schwingung.

Die Frequenz der RDB-Pendelbewegung ist in den beiden Blöcken der SWR Baulinie 72 bereits bei der Inbetriebnahme bei 6,5 Hz bestimmt worden. Die hierzu verwendeten Absolutwegaufnehmer sind immer noch verfügbar. Dadurch konnten Korrelationsanalysen mit den Absolutweg-, Körperschall-, Neutronenfluß- und Drucksignalen durchgeführt werden, und die Übertragung der RDB-Pendelbewegung in diese Signale ermittelt werden [63, 64]. Die Frequenz der RDB-Pendelbewegung hat sich bei vergleichbarem Betriebszustand in beiden SWR Baulinie 72 Blöcken seit der Inbetriebnahme nicht verändert. Sie ist in den ASLD der vier oberen Beschleunigungssignale am jeweiligen RDB bei 6,5 Hz erkennbar (Bild 4.4). Der Hauptschwingungsmodus bei dieser Frequenz ist der Balkenschwingungsmodus B2. Es handelt sich hier also um eine dem Modell entsprechende RDB-Pendelbewegung. Weitere RDB-Schwingungen sind bei 13,5 Hz im Block 1 und bei 12,5 Hz im Block 2 erkennbar. Im Block 2 ist diese Schwingung eindeutig den Balkenschwingungsmodi zugeordnet. Eine weitere Schwingung ist nur im Block 2 bei 16,5 Hz erkennbar. Sie wird vollständig dem Schalenschwingungsmodus S zugeordnet (Bild 4.4). Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß

die RDB-Pendelbewegung in allen vier Siedewasserreaktoren in den Signalen der jeweiligen Körperschallsensoren am RDB-Deckel detektiert werden kann. Die Frequenzen liegen bei allen vier Anlagen zwischen 6 Hz und 7 Hz und können mit dem Modenseparationsverfahren gut überwacht werden.

4.2 Zustandsüberwachung durch Analyse der In-Kern Neutronenflußsignale

In Siedewasserreaktoren wird die Verteilungsdichte der im Reaktor erzeugten thermischen Leistung mit der Neutronenflußinstrumentierung überwacht. Hierzu sind im Reaktorkern zwischen den Brennelementen und Steuerstabpositionen Instrumentierungslanzen installiert, die im Bereich der aktiven Kernhöhe vier Miniaturspaltkammern enthalten. Die Signalmittelwerte der Miniaturspaltkammern sind der thermischen Leistung an ihrem Ort proportional.

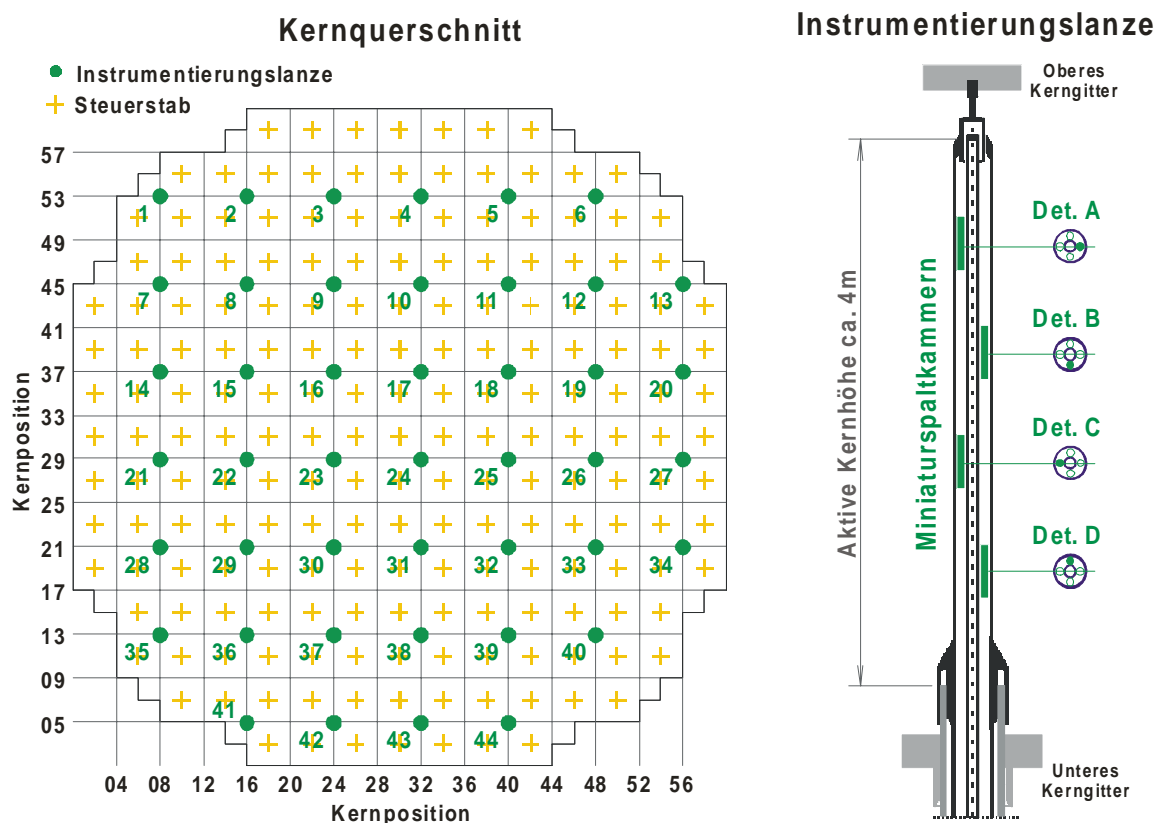


Bild 4.5 Neutronenflußinstrumentierung in einem Siedewasserreaktor /63/

Die Anzahl der installierten Instrumentierungslanzen ist in den Reaktoren verschieden, gemeinsam ist die im Vergleich zu den Druckwasserreaktoren hohe Instrumentierungsdichte. Die grundsätzliche Anordnung ist in den hier untersuchten Siedewasserreaktoren gleich (Bild 4.4.a). Dem Mittelwert der LVD-Signale sind fluktuierende Signalanteile überlagert, die durch thermohydraulische Effekte und mechanische Bauteilschwingungen verursacht werden.

Temperaturschwankungen in der Kühlmittelströmung und die Entstehung sowie der Transport der Dampfblasen („Dampfblasenrauschen“) verursachen kurzfristige lokale Schwankungen der Moderatorichte. Im Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 Hz dominieren die Temperaturschwankungen

aus der Kühlmiteleintrittsströmung. Im Frequenzbereich von 2 Hz bis ca. 100 Hz überwiegt das Dampfblasenrauschen das mit der Kernhöhe zunimmt. Die Siedelinie verschiebt sich mit zunehmender Kernreisezeit von der unteren zu oberen Kernhälfte. Bei Beginn eines Brennelementzyklus liegt sie etwa auf Höhe der Detektorebene C, gegen Ende etwa auf Höhe der Detektorebene A.

Die Überwachung dieser thermohydraulische Effekte ermöglicht das frühzeitige Erkennen von Veränderungen in der Kühlmittelströmung in einzelnen Kernregionen, die Beschädigungen der Brennelemente durch Überhitzung zur Folge haben könnten.

Die Analyse des Dampfblasenrauschens kann Informationen über die Höhe der Siedelinie, die Geschwindigkeit der Dampfblasen und die Anordnung der LVD-Detektoren ergeben. Mögliche Fehlanordnungen oder Zuordnungsfehler sind an einer Störung der linearen Phase des Transporteffektes, oder an einer Veränderung in der Modenseparation zu erkennen.

Auch in Siedewasserreaktoren werden Kerneinbauten durch die Strömung des Kühlmittels zu Schwingungen angeregt und bewegen sie sich meist periodisch im Bereich von Neutronenflußgradienten. Dabei sind sie entweder Neutronenflußquellen (z.B. Brennelemente) oder Neutronenflußsenken (z.B. LVD - Detektoren oder Steuerstäbe). Diese periodischen Schwingungen bilden sich als Fluktuation mit der Eigenfrequenz des schwingenden Bauteils im Neutronenfluß ab.

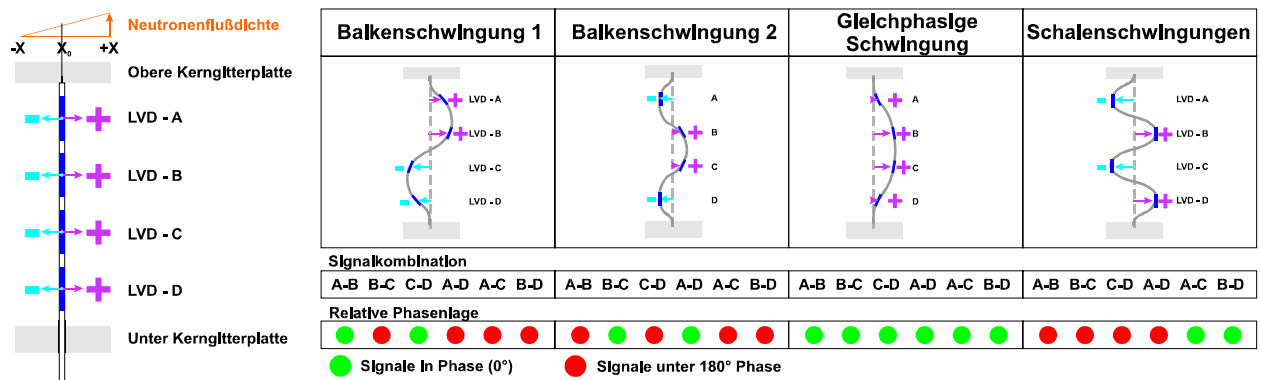
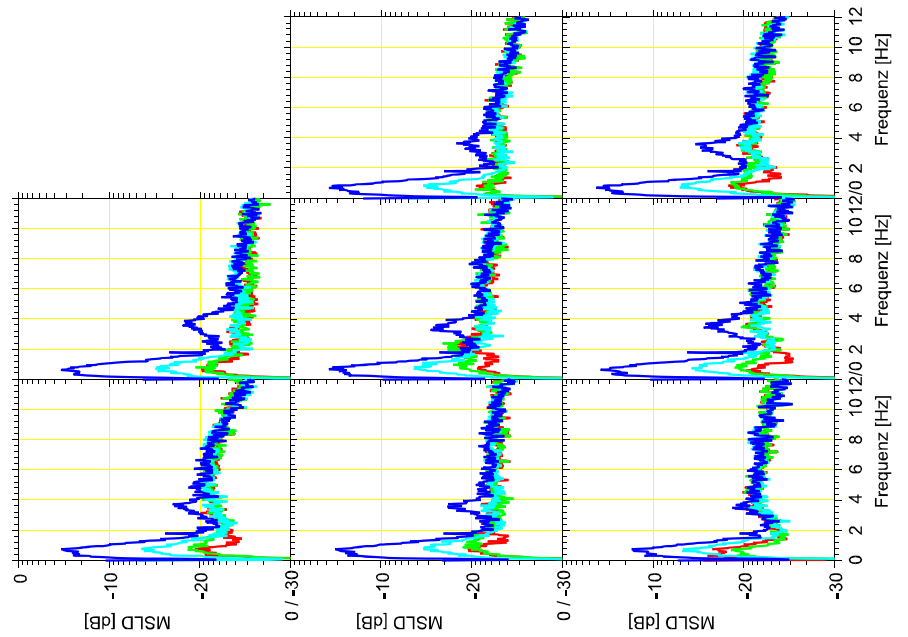
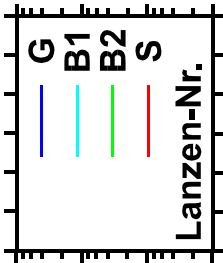
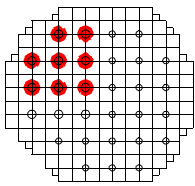


Bild 4.6: Anordnung der Detektoren und Schwingungsmoden für das Modenseparationsmodell

Die jeweils vier Neutronenflußsignale aus allen LVD-Lanzen der vier verschiedenen SWR-Blöcke sind hier mit dem Modenseparationsverfahren untersucht worden. Die Interpretation der vier Moden veranschaulicht Bild 4.6. Der gleichphasige Modus G bekommt die spektralen Anteile zugeordnet, die alle LVD-Detektoren gleichzeitig detektieren. Für die Schwingung der LVD-Lanze in einer Ebene entspricht das der ersten Grundschwingung („ohne Knoten“) zwischen oberem und unterem Kerngitter. Die Balkenschwingungsmodi B1 und B2 repräsentieren die erste und zweite Oberschwingung der LVD-Lanze mit je einem bzw. zwei Knoten, der Schalenschwingungsmodus S die dritte Oberschwingung mit drei Knoten (Bild 4.6).

Zum Vergleich sind die separierten spektralen Leistungsdichten aus den LVD-Lanzen von jeweils einem Viertel der Kernquerschnitte der vier verschiedenen SWR-Blöcke dargestellt (Bild 4.7 und 4.8).

800 MW_{el}



1300 MW_{el}

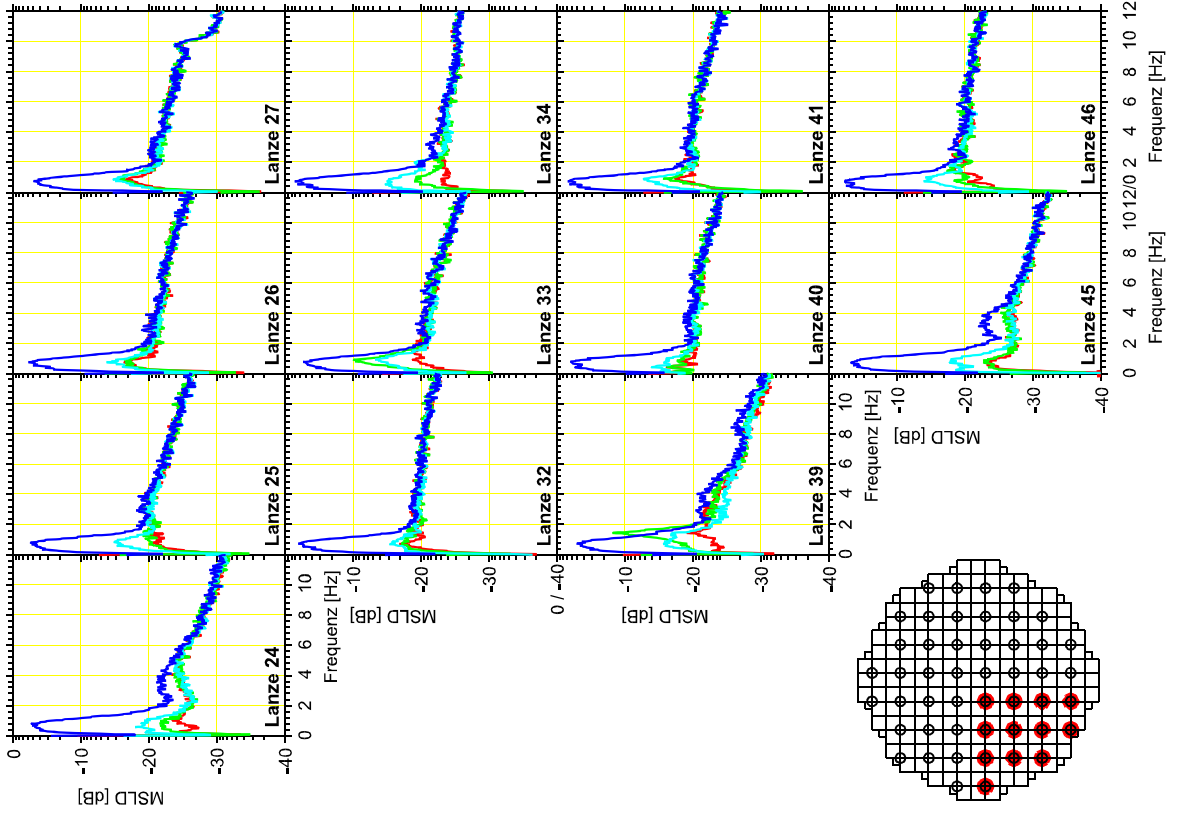


Bild 4.7: MSLD von Neutronenflußsignalen der 800 MW_{el} und 1300 MW_{el} Reaktoren

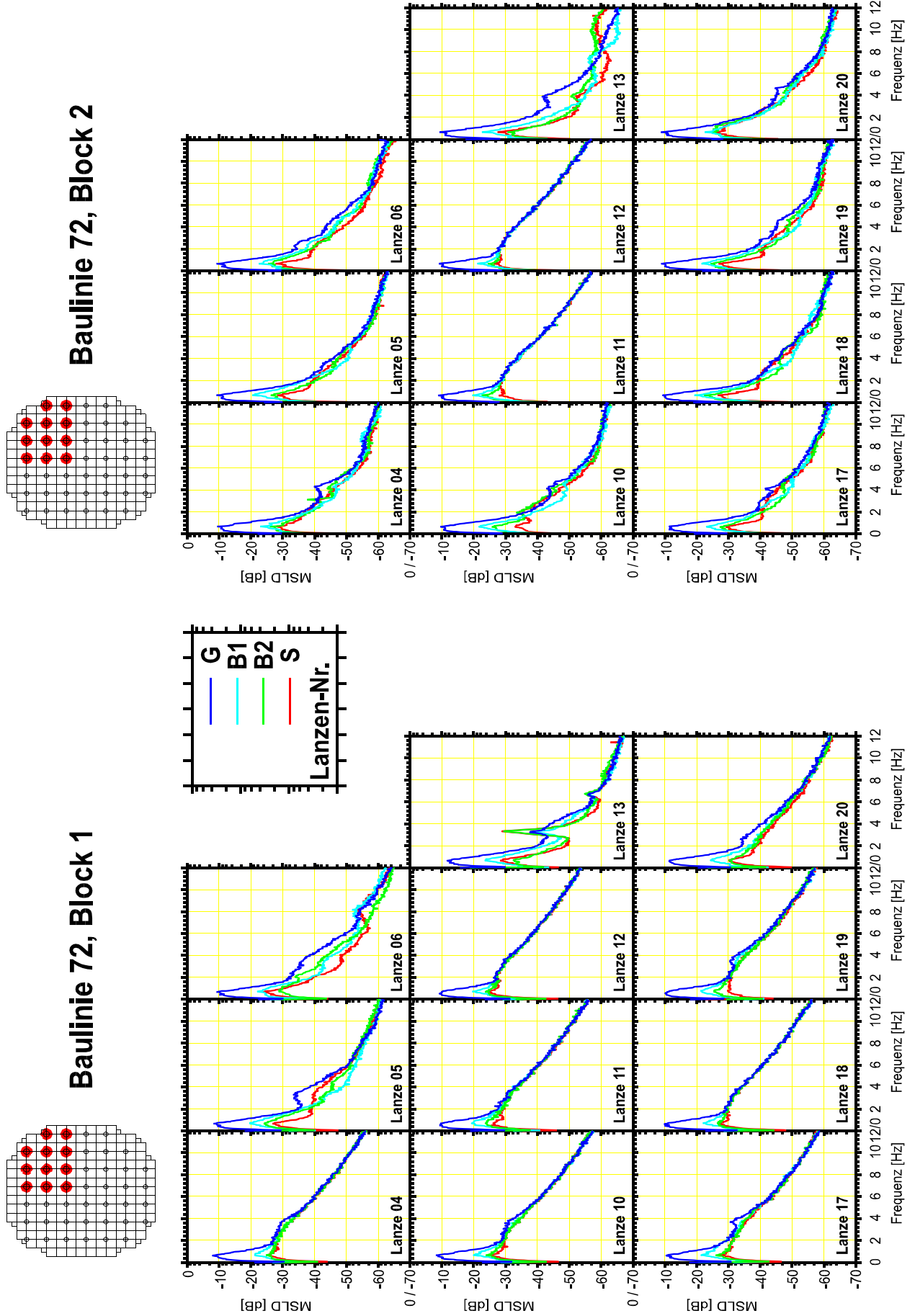


Bild 4.8: MSLD von Neutronenflußsignalen der Reaktoren aus der SWR 72 Baulinie

Auf fast allen dargestellten Kernpositionen in den 800 MW_{el} und 1300 MW_{el} Reaktoren überragt der gleichphasige Modus G im Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 Hz alle anderen. Im 800 MW_{el}-Reaktor hat der Balkenschwingungsmodus B1 in diesem Frequenzbereich auf allen Kernpositionen die zweitgrößte Magnitude. Oberhalb dieses Frequenzbereiches ist auf allen Kernpositionen ein breiter Peak zwischen 3 Hz und 4 Hz erkennbar. Hier handelt es sich um die Grundschiwingung der die LVD-Lanzen umgebenden Brennelemente. Die anderen Moden bekommen im 800 MW_{el}-Reaktor keine spektralen Leistungsdichteanteile zugeordnet.

Im 1300 MW_{el}-Reaktor ist die Grundschiwingung der Brennelemente als Peak zwischen 3 Hz und 4 Hz nur auf wenigen Positionen (Lanzen 24, 34, 39, und 45 in Bild 4.5) wiederzufinden. Die Magnitude des Balkenschwingungsmodus B2 überragt in zwei Fällen die Magnitude des Balkenschwingungsmodus B1, in einem Fall sogar die Magnitude des gleichphasigen Modus G im Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 Hz (Lanzen 33 und 39 in Bild 4.5). Die Ursache ist auf Grund der Frequenzlage von 1,0 Hz bzw. 1,5 Hz und der relativ schmalen Halbwertsbreite des Peaks in beiden Fällen eine harmonische Schwingung der Instrumentierungslanze selbst. Mit Ausnahme der LVD-Lanze 39 sind spätestens oberhalb von 4,5 Hz alle Moden deckungsgleich, das bedeutet, es gibt keine gemeinsamen Signalanteile mit festen Phasenbeziehungen in allen vier Miniaturspaltkammern der jeweiligen LVD-Lanze.

Für die beiden Reaktoren der SWR 72 Baulinie überragt der gleichphasige Modus G im Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 Hz alle anderen. Der Balkenschwingungsmodus B1 hat in diesem Frequenzbereich auf allen Kernpositionen die zweitgrößte Magnitude. Im Frequenzbereich zwischen 3 Hz und 4 Hz ist auf einigen Kernpositionen in beiden Blöcken die Grundschiwingung von Brennelementen als breiter Peak erkennbar. Es ist besonders auffällig, daß in beiden Blöcken die dem Rand am nächsten positionierten LVD-Lanzen (Lanzen 06 und 13 in Bild 4.6) die stärksten Unterschiede in den Magnituden der separierten Moden zeigen. Die Ursache ist in bauartbedingt verstärkter Kühlmittelströmung in den Kernrandbereichen zu suchen. Im Block 1 ist auf einer Position (Lanze 13 in Bild 4.8) ein klar hervortretender Peak zwischen 3 Hz und 4 Hz erkennbar, der sich jedoch deutlich von den zuvor beschriebenen breiten Peaks der Grundschiwingungen der Brennelemente unterscheidet. Zwischen 6 Hz und 7 Hz ist eine höhere Harmonische dieser Schwingung, jedoch ohne klare Zuordnung zu einer der Moden. Als Ursache der Schwingung muß deswegen eine kombinierte Schwingung von einem Brennelementen und einer an einem oder zwei Brennelementkästen anliegenden LVD-Lanze angenommen werden.

5. Überwachung von Bauteilschwingungen in Schwerwasserreaktoren

Im Vergleich mit gewöhnlichem leichtem Wasser (H_2O) hat schweres Wasser (D_2O) eine geringere parasitäre Neutronenabsorption. Das hat für schwerwassermoderierte Reaktoren eine im Vergleich zu leichtwassermoderierten Reaktoren günstigere Neutronenökonomie zur Folge, die den Einsatz von Natururan oder leicht angereichertem Uran als Kernbrennstoff ermöglicht. Auf der anderen Seite ist das Moderationsvermögen von D_2O wesentlich geringer als von H_2O . Daraus ergibt sich für schwerwassermoderierte Reaktoren notwendigerweise ein im Vergleich mit leichtwassermoderierten Reaktoren wesentlich größeres Moderator-Brennstoffverhältnis. Diese physikalischen Randbedingungen führten bei der praktischen Auslegung der schwerwassermoderierten Reaktoren zu relativ großen Moderatorbehältern und darin getrennt verlaufenden Druckröhren, in denen sich die Brennelemente und das Kühlmittel befinden /65/.

Schwerwassermoderierte Leistungsreaktoren werden heute in Kanada, Indien, Korea, Rumänien und Argentinien betrieben. In Argentinien sind die zwei unterschiedlichen Konstruktionen von schwerwassermoderierten Leistungsreaktoren vertreten: ein CANDU-600 Reaktor mit horizontalen Druckrohren im Kernkraftwerk Embalse (Hersteller AECL) und zwei Reaktoren mit vertikalen Druckrohren in den Kernkraftwerken Atucha I und Atucha II (Hersteller SIEMENS/KWU).

5.1 Schwerwasserreaktor mit vertikalen Druckrohren

Im argentinischen Kernkraftwerk Atucha I wird mit einem schwerwassermoderierten Druckwasserreaktor eine Leistung von etwa $370 MW_{el}$ erzeugt. Die Brennelemente haben eine aktive Länge von 5,25 Meter und stehen in 253 vertikal angeordneten Kühlkanälen in einem zylindrischen Moderatorbehälter. Der Moderatorbehälter (MB) befindet sich innerhalb eines Reaktordruckbehälters und wird von 29 Steuerstabführungsrohren diagonal durchdrungen /66, 67/.

Nach einem schwingungsbedingtem Schaden an einem Brennelement und einem Kühlkanal im Reaktorkern wurde das Kernkraftwerk Atucha I 1988 für eine Dauer von 16 Monaten außer Betrieb genommen. Im Vorfeld dieses Ereignisses wurden unter anderem folgende Anomalien bei der Reaktorkontrolle festgestellt: Anstieg der Moderatortemperatur, Reaktivitätsverlust, Anstieg der Aktivität im Primärkreis und ein starkes Oszillieren im Neutronenflußsignal einer Außenkammer. Die Signalanalyse ergab eine Hauptfrequenz im Autospektrum des Neutronenflußsignals von 1,0 Hz bis 2.5 Hz, woraus auf eine Brennelement und/oder eine Kühlkanalschwingung in der Nähe der Außenkammer als Ursache geschlossen wurde. Der Schaden konnte somit als Fluktuation im Neutronenflußsignal nachgewiesen werden. Eine anschließend durchgeführte visuelle Inspektion bestätigte diese Diagnose. Aufgrund dieses Vorfalls wurde in Atucha I die Neutronen-flußrauschanalyse als Technik zur Fehlerfrüherkennung eingeführt, um derartige Schäden in Zukunft zu vermeiden /67/.

In wissenschaftlich-technologischer Zusammenarbeit zwischen Argentinien und der Bundesrepublik Deutschland, koordiniert durch das Internationale Büro im Kernforschungszentrum Karlsruhe, wurden für Neutronenflußrauschmessungen optimierte Isolationsverstärker mit Hoch- und Tiefpaßfiltern im Kraftwerk Atucha I installiert und in Betrieb genommen. Die charakteristischen Schwingungs-

frequenzen der Kühlkanäle wurden vor der Inbetriebnahme des Reaktors durch Messungen mit Dehnungsmeßstreifen und Wegsensoren bestimmt /67/. Im Folgenden wird gezeigt, wie mit Hilfe dieser Isolationsverstärker in den Signalen der vorhandenen Neutronenflußinstrumentierung diese charakteristische Frequenzen zunächst identifiziert und dann betriebsbegleitend überwacht werden können.

Die Neutronenflußinstrumentierung für den Leistungsbetrieb besteht in diesem Reaktor aus vier Außenkammern die unter einem Winkel von jeweils 90 Grad um den RDB angeordnet sind (siehe Tabelle 3.2), sowie aus SPN-Detektoren mit Vanadiumemittern. Auf die grundsätzliche Eignung der Vanadium SPN-Detektoren für die Detektion von mechanischen Schwingungen anhand von Neutronenflußschwankungen wurde bereits in Kapitel 2 eingegangen. Die SPN-Detektoren sind in sieben vertikalen Meßblenden montiert. Zwei davon sind kurze Lanzen mit je drei SPN-Detektoren und fünf sind lange Lanzen mit je sieben SPN-Detektoren. Zusätzlich wird noch das Signal eines in Richtung 45 Grad auf dem RDB-Deckel montierten Schwingungsaufnehmer (S45) ausgewertet.

5.1.1 Bewegungen von Reaktordruckbehälter und Moderator tank

Die Grundschiwingung des RDB wurde mit Hilfe von Wegsensoren am RDB-Deckel bei 7 Hz bis 8 Hz und eine höher harmonische Schwingung mit etwa 33 Prozent kleinerer Amplitude bei 13,2 Hz festgestellt /67/.

Die Schwingungen von Reaktordruckbehälter und Moderatorbehälter lassen sich jedoch auch mit Hilfe der Neutronenfluß- Außenkerninstrumentierung ohne zusätzliche Sonderinstrumentierung betriebsbegleitend überwachen.

Hierzu kann das Modenseparationsverfahren auf die Außenkammersignale angewendet werden. Die autospektralen Leistungsdichten der Außenkammersignale und die

Modenseparierten spektralen Leistungsdichten zeigen deutliche Peaks und in fünf Frequenzbereichen eine gute Separation in verschiedenen Moden. Der gleichphasige Modus G dominiert unterhalb von 1 Hz und bei 17,3 Hz, der Balkenschwingungsmodus B1 bei 7,3 Hz und 10,5 Hz und der Schalenschwingungsmodus S zwischen 13 Hz und 14 Hz (Bild 5.1).

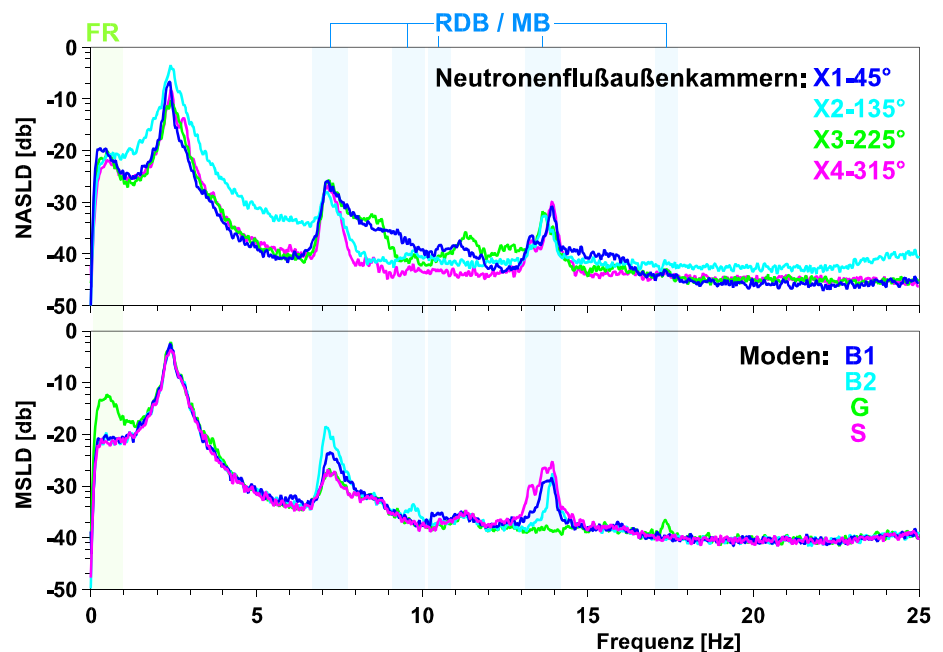


Bild 5.1: Spektrale Separation der Bewegungen von RDB und MB

Zum Vergleich ist in Bild 5.2 das Spektrum des mechanischen Schwingwegaufnehmers (S45) am RDB-Deckel und dessen Korrelationen mit den Signalen der Außenkammern gezeigt.

Die Relativbewegung des Systems RDB/MB kann bei 7,2 Hz klar anhand der bei dieser Frequenz dominierenden Balkenschwingungsmoden (B1 und B2) der

Außenkammersignale und ihrer hohen Korrelation mit dem mechanischen Schwingungsaufnehmer erkannt werden. Die Vorzugsrichtung der Taumelbewegung liegt, klar erkennbar an der höheren Amplitude des B2 Modus, entlang der Achse $0^\circ/180^\circ$. Bei 9,5 Hz und 10,5 Hz sind ebenfalls Schwingungen mit Vorzugsrichtung $0^\circ/180^\circ$ beziehungsweise $90^\circ/270^\circ$ erkennbar. Die hohen Magnituden im Signal des Schwingwegaufnehmers und die verhältnismäßig geringe Kohärenz mit den Außenkammersignalen läßt auf die Eigenschwingung des RDB mit dem MB ohne nennenswerte Relativbewegung beider Behälter schließen. Durch die gute Separation der Signale in dem B2 Modus bei 9,5 Hz und in dem B1 Modus bei 10,5 Hz können die Richtungen der Auslenkungen bestimmt werden.

Bei 12,5 Hz, 16 Hz und 18 Hz sind Peaks mit hohen Magnituden im Signal des Schwingwegaufnehmers feststellbar, jedoch ist bei diesen Frequenzen weder Kohärenz mit den Außenkammersignalen noch Modenseparationen erkennbar. Es handelt sich hier um Schwingungen, die keine Relativbewegung zwischen RDB und MB verursachen und die sich nicht in die Signale der Außenkammern übertragen können, wie z. B. vertikale RDB-Schwingungen,. Bei 17,3 Hz ist eine Schwingung im Wegspektrum und in der Kohärenz zwischen Schwingweg- und Außenkammersignal erkennbar, die sich in Bild 5.1 als gleichphasige Signalkomponente (G) erkennen läßt. Im Vergleich mit anderen Anlagen kann hier als wahrscheinliche Ursache auf eine Druckschwankung einhergehend mit einer vertikalen Bewegung des RDB geschlossen werden.

Die Dominanz des Schalenschwingungsmodus (S) im Frequenzbereich zwischen 13 Hz und 14 Hz ist der klare Nachweis einer Schalenschwingung des Moderatorbehälters relativ zum RDB bei dieser Frequenz. Im Vergleich mit den in unterschiedlichen Druckwasserreaktoren festgestellten Schalenschwingungen des KB relativ zum RDB um 15 Hz, 18 Hz und 22 Hz, je nach Anlagengröße

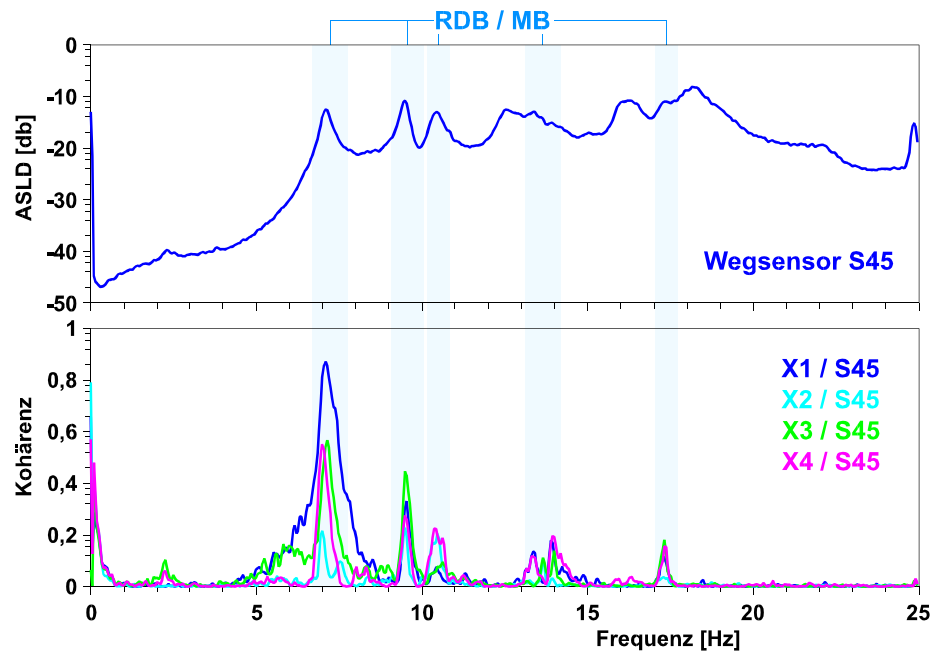


Bild 5.2: Relativbewegungen von RDB und MB, sichtbar als gemeinsamer Signalanteil in Weg- und Neutronenflußsignalen

(siehe Kapitel 3.1.2), erscheint die Frequenzlage für die hier vorliegende Anlagengröße plausibel.

Bei 2,5 Hz ist ein breiter Peak mit hohen Magnituden in den ASLD der Außenkammersignale zu sehen. Die geringen Kohärenz der Außenkammersignale untereinander (erkennbar an der nicht vorhandenen Separation der einzelnen Moden bei 2,5 Hz) und die im Verhältnis zu den anderen Peaks sehr breiten Verteilung, deutet auf eine von den Behälterschwingungen verschiedene Ursache. Es handelt sich hierbei wahrscheinlich um die Schwingungen der insgesamt 253 Brennelemente, ihrer Kühlkanäle und eventuell noch der 29 Steuerstabführungsrohre. Jede Außenkammer detektiert nur die Schwingungen der Brennelemente und Kühlkanäle in ihrer unmittelbaren Umgebung. Die Quelle dieser Signalschwankungen ist daher für jedes Außenkammersignal individuell und eben nicht gemeinsam, also auch nicht untereinander korrelierbar oder separierbar.

5.1.2 Brennelementschwingungen

Die Grundschwingung der Brennelemente für den Atucha I Reaktor wurde mit Hilfe von Dehnungsmessungen bei 2,7 Hz bis 3,0 Hz, die zweite Harmonische bei 7 Hz bis 8,4 Hz und eine dritte Schwingungsmoden bei 14 Hz bis 15 Hz festgestellt /67/.

Brennelementeigenfrequenzen verschieben sich gewöhnlich bedingt durch Alterungsprozesse von höheren Frequenzen zu Beginn ihres Einsatzes zu niedrigen Frequenzen nach längerer Einsatzdauer. Die individuellen Eigenfrequenzen der Brennelemente in Abhängigkeit von Einsatzdauer und Betriebszustand lassen sich betriebsbegleitend, ohne Einschränkung des Leistungsbetriebs, mit Hilfe der SPN-Detektorsignale überwachen. Bild 5.3 zeigt die Ergebnisse zweier im Abstand von fünf Monaten durchgeführten Messungen an den SPN-Detektoren SPN 1 und SPN 2, die in Instrumentierungslanzens auf unterschiedlichen Kernpositionen montiert waren. Im Signal SPN 1 ist bedingt durch die Einsatzdauer des BE eine Verschiebung der Brennelementeigenfrequenz von 3,8 Hz nach 3,5 Hz erkennbar. Im Signal SPN 2 ist ebenso eine vermeintliche Verschiebung von 3,5 Hz nach 3,9 Hz erkennbar. Hier wurde das Brennelement zwischen beiden Messungen gegen ein neues ausgetauscht, was durch die Besonderheit dieser Reaktorbauweise während des Leistungsbetriebs möglich ist. Es finden im Durchschnitt etwa 1,3 Brennelementwechsel pro Tag statt.

Während eines Brennelementwechsels in der Nähe einer Neutronenflußaußenkammer konnte die Frequenzverschiebung auch im Spektrum des Außenkammersignals festgestellt werden /67/.

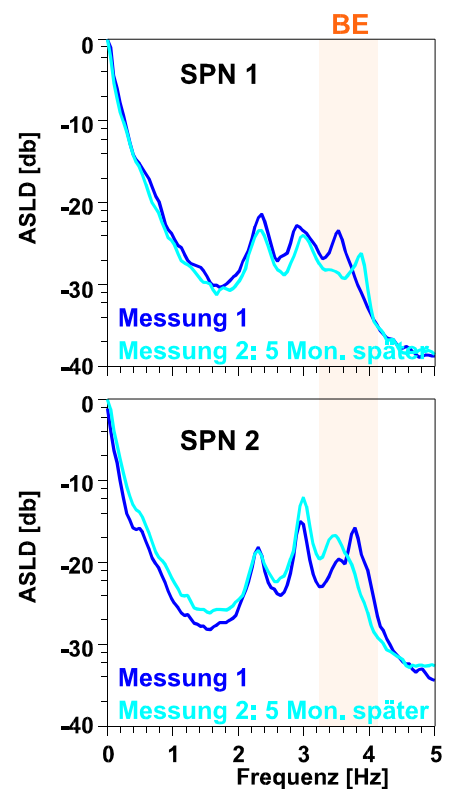


Bild 5.3: Verschiebung der Eigenfrequenz von BE-Schwingungen

Die Möglichkeit ungewöhnliche Schwingungen von Brennelementen durch Neutronenflußauschanalyse betriebsbegleitend praktisch jederzeit festzustellen und die Geschwindigkeit dieser Veränderungen verfolgen zu können, ist vor allem für die schwerwassermoderierten Reaktoren von besonderem Vorteil, da hier Brennelemente täglich getauscht werden können ohne den Leistungsbetrieb einzuschränken. Somit können hier auffällige Brennelemente gewechselt und gegebenenfalls visuell untersucht und repariert werden, bevor sie selbst Schäden entwickeln oder Folgeschäden an Reaktoreinbauten verursachen.

5.1.3 Schwingungen von Instrumentierungsanzlenzen

Wie in allen leichtwassermoderierten Leistungsreaktoren, gibt es auch im schwerwassermoderierten und schwer-wassergekühlten Reaktor Atucha I starke lokale Neutronen-flußgradienten. Instrumentierungsanzlenzen mit SPN-Detektoren, die sich in diesem Gradientenfeld bewegen, prägen dem Signal der SPN-Detektoren die Lanzenschwingung als Signalfluktuatation auf. Die Frequenz der mechanischen Instrumentierungsanzlenzenschwingung hängt von ihrer Länge, ihrem Material, ihrer Geometrie und den Einspannbedingungen ab.

In den Neutronenflußsignalen können die Schwingungen der Instrumentierungsanzlenzen mit Hilfe von Kohärenzfunktion und Phase der Signale verschiedener SPN-Detektoren, die innerhalb der selben Lanzene positioniert sind, analysiert werden. Um die Lanzenschwingungen von den Schwingungen der benachbarten Brennelemente zu trennen, kann die Kohärenz zwischen einem Neutronenflußaußenkammersignal und einem SPN-Signal aus einer Instrumentierungsanzlene dienen: Die SPN-Signale sind bei der Frequenz der Lanzenschwingung nicht mit den Außenkernsignalen korreliert. Bei der Frequenz der Brennelementschwingung hingegen ist eine Korrelation erkennbar.

Bild 5.4 zeigt auf ihren Mittelwert normierte autospektrale Leistungsdichten der Signale von mit SPN-Detektoren mit Vanadiumemitter aus den Instrumentierungsanzlenen Nr. 6 bei Kernposition O-10 (Signale L6SPN5 und L6SPN6) und Nr. 5 bei Kernposition J-08 (Signal L5SPN5), sowie die autospektrale Leistungsdichte des Signals der Außenkammer X2, die der Kernposition R-06 gegenüber liegt.

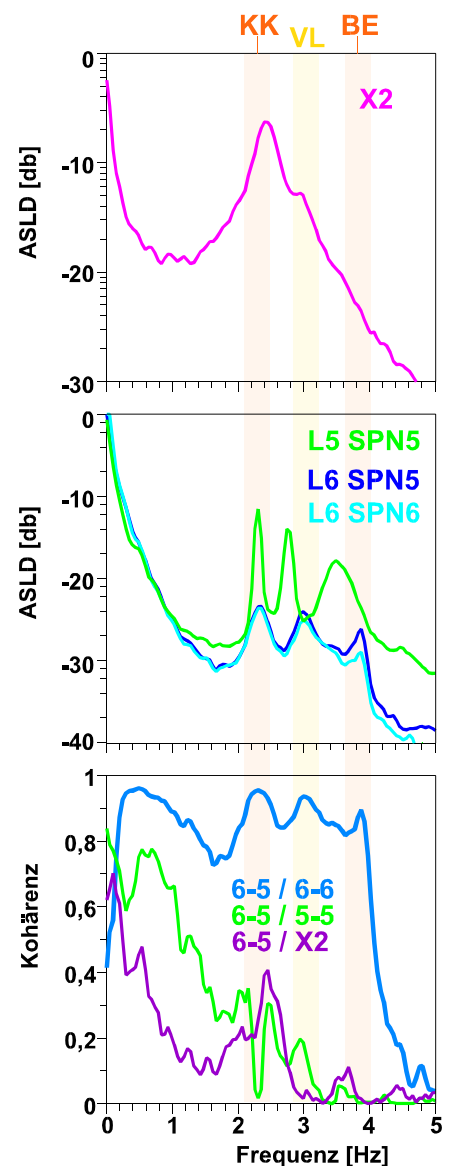


Bild 5.4: Abbildung von Kühlkanal-, BE- und Lanzenschwingungen in Neutronenflußsignalen

Im Frequenzbereich von 2,0 Hz bis 4,0 Hz sind für jedes SPN-Detektorsignal drei Peaks erkennbar, die

für die Signalkombination innerhalb der Instrumentierungslanze 6 (6-5/6-6) mit Kohärenzwerten von bis zu 0,95 eine hohe Korrelation haben. Die höchsten Korrelationen sind im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 5 Hz bei 0,5 Hz, 2,3 Hz, um 3 Hz und bei 3,8 Hz.

Die Korrelation im Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 1,5 Hz, die in allen drei Signalkombinationen umso niedriger wird, je weiter die Entfernung zwischen den beteiligten Sensoren ist, kann auf thermohydraulische Ursachen zurückgeführt werden und ist daher für die Analyse von Bauteilschwingungen ohne Bedeutung.

Für die Kombinationen mit den Signalen der Außenkammer X2 und der Instrumentierungslanze Nummer 6 (L6-5/X2) existieren Peaks bei 2,5 Hz und bei 3,7 Hz. Das ist ein klares Indiz für Kühlkanal- und Brennelementeigenschwingungen bei diesen Frequenzen. Bei 3 Hz muß aufgrund der hohen Korrelation in der Signalkombination aus derselben Lanze (6-5/6-6) und der geringen Korrelation in der Kombination mit der Außenkammer (6-5/X2) auf die Eigenfrequenz der Instrumentierungslanze geschlossen werden.

Die Übertragung des Modenseparationsverfahrens, analog zu den in Kapitel 4 durchgeführten Berechnungen mit den Signalen von jeweils vier Miniaturspaltkammern pro LVD-Lanze in Siedewasserreaktoren, ist hier mit den Signalen von zwei SPND von der oberen und zwei SPND von der unteren Lanzenhälfte einer langen LVD-Lanze mit insgesamt sieben SPND, durchgeführt worden (Bild 5.5). Die ASLD der SPND haben Peaks um 0,5 Hz, 2,4 Hz, 3,0 Hz, 3,5 Hz, 7 Hz und 8 Hz. Vom Beginn des Spektrums bis etwa 6 Hz überragt der gleichphasige Modus G alle anderen. An den Stellen, an denen die oben genannten Peaks in den ASLD erkennbar sind, ist die Magnitude um etwa eine Dekade höher. Das ist gleichbedeutend mit einer hohen Korrelation der Signale und damit einer gemeinsamen Ursache für die Peaks in den ASLD. Die Tatsache, das es der gleichphasige Modus G ist, der alle anderen überragt, deutet auf ausgeprägte, gleichphasige Schwingungen, also einen Grundschwingungsmodus als Ursache.

Im Abschnitt 5.1.2 sind die beiden Peaks bei 2,4 Hz und 3,5 Hz bereits als Eigenschwingungen des gekoppelten Systems aus Brennelement und Kühlkanal identifiziert worden. Der Peak bei 3 Hz verbleibt als Frequenz der Schwingung der Instrumentierungslanzen. Der Balkenschwingungsmodus B1 überragt alle anderen Moden bei 8 Hz. Das ist gleichbedeutend mit guter Korrelation und einem gegenphasigen Signalverlauf der SPND der oberen Lanzenhälfte im Vergleich zu den SPND der unteren Lanzenhälfte

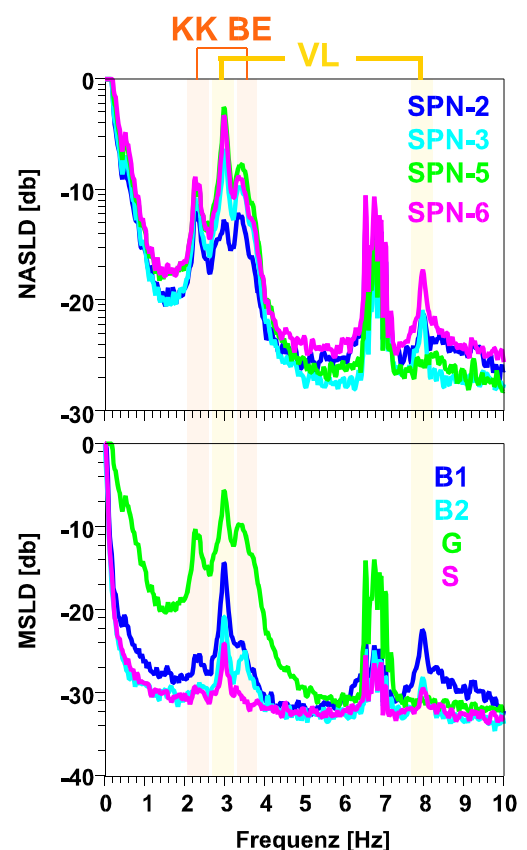


Bild 5.5: Spektrale Separation von Bauteilschwingungen bei SPN-Signalen

bei dieser Frequenz. Als Ursache kommen ein höherer Lanzenschwingungsmodus mit Schwingungsknoten in der Lanzenmitte oder ein korrespondierender Schwingungsmodus eines oder mehrerer Brennelemente in der Umgebung der LVD-Lanze in Frage. Aufgrund der einerseits sehr guten Korrelation der SPN-Detektorsignale der LVD-Lanze untereinander, erkennbar an der guten Separation von einem bestimmten Modus, und der Tatsache das es eben der B1 Modus ist, liegt hier der Schluß nahe, daß es sich bei der 8 Hz Schwingung um die nächsthöhere Harmonische der Lanzenschwingung handelt.

Die den Moden B2 und S zugrunde liegenden Schwingungsformen treten bei dieser Instrumentierungslanze nicht auf.

5.2 Schwerwasserreaktor mit horizontalen Druckrohren

Die häufigsten Kernkraftwerke mit Schwerwassermoderation und getrenntem Schwerwasserkühlkreislauf sind die kanadischen Reaktoren der CANDU Bauweise. Im Gegensatz zum Atucha Reaktor sind hier die Druckrohre und Brennelemente horizontal gelagert. Neutronenflußauschanalyse wird in diesen Reaktoren seit Jahren erfolgreich eingesetzt, um thermohydraulische Effekte und Eigenschaften von SPN-Detektoren zu bestimmen /68, 69/ und vereinzelt auch, um Frequenzen von Reaktoreinbauten zu bestimmen /70, 71/. Im Rahmen der wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit zwischen Argentinien und der Bundesrepublik Deutschland sind in zwei Kampagnen umfassende Messungen in dem argentinischen CANDU Kernkraftwerk Embalse durchgeführt worden. Die Messungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Bauteilschwingungen von Primärkreiskomponenten zu identifizieren und die Anwendbarkeit von Analysemethoden zu untersuchen, um so einen Beitrag zu höherer Sicherheit und Verfügbarkeit zu leisten /72/.

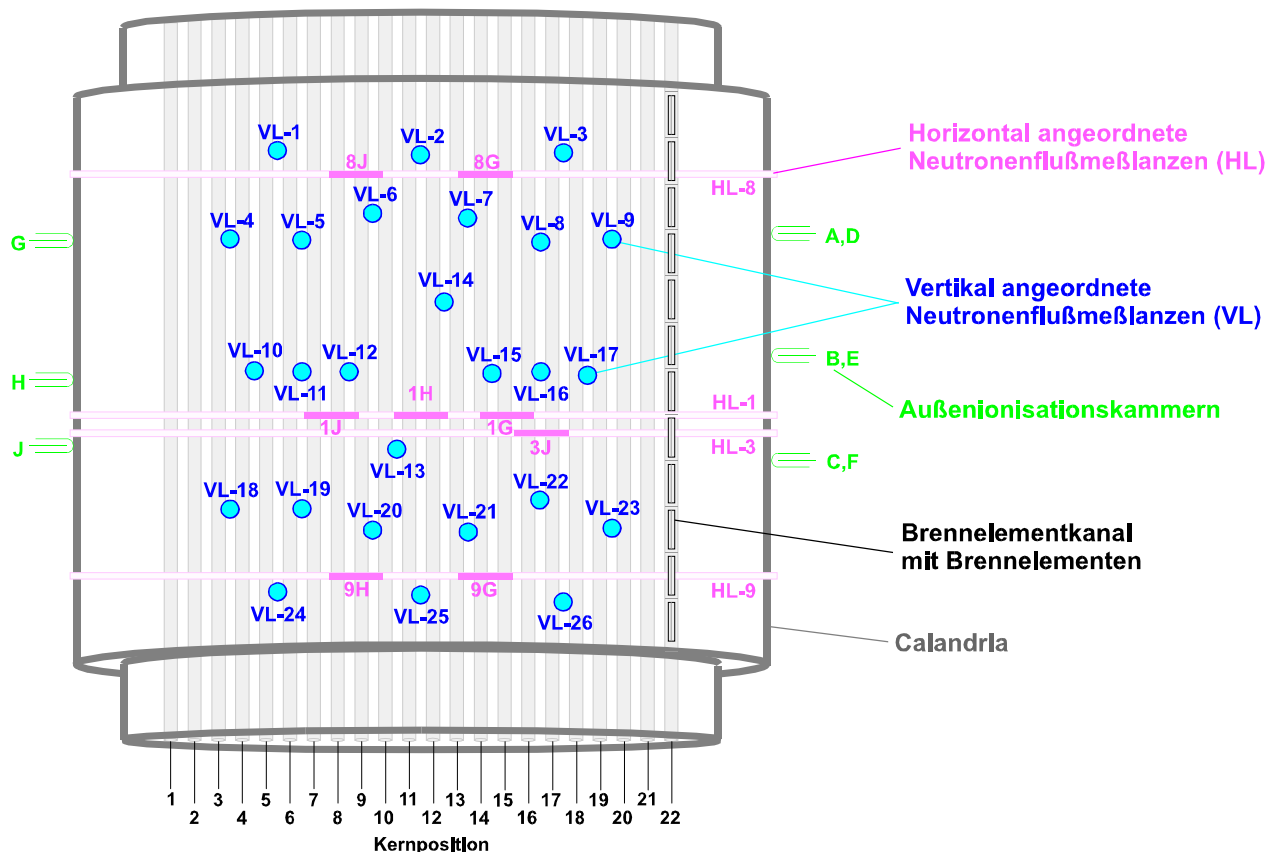


Bild 5.6: Anordnung der Neutronenflußinstrumentierung eines CANDU-600 Reaktors

Ein CANDU-600 Reaktor besteht aus einem horizontalen zylindrischen Moderatorbehälter, der sogenannten "Calandria". Durch diese Calandria laufen 380 horizontale Kühlkanäle mit je einem Druckrohr, das 12 Brennelemente enthält. Der Moderatorbehälter ist mit etwa 70°C warmem schwerem Wasser gefüllt, während in den Druckrohren das etwa 300°C warme Kühlwasser die Brennelemente umspült.

Calandria- und Druckrohre werden durch Abstandshalter voneinander getrennt und werden in dem Ringraum zwischen Calandria- und Druckrohren durch Gas gekühlt. Eine genauere Beschreibung mit technischen Details kann der Referenz /66/ entnommen werden.

Bild 5.6 zeigt schematisch eine Aufsicht auf die Calandria und die Anordnung der Neutronenflußinstrumentierung. Die Neutronenflußinstrumentierung für den Leistungsbetrieb besteht aus neun Außenkammern (A bis J) auf sechs verschiedenen Positionen an beiden Längsseiten, sowie aus 26 vertikalen Meßlanzen (VFD) verschiedener Länge mit insgesamt 102 Vanadium Emitter SPN-Detektoren und 28 Platinemitter SPN-Detektoren in vertikalen und horizontalen Meßlanzen (HFD).

5.2.1 Schwingungen von vertikalen Instrumentierungslanzen

Änderungen in der Amplitude und Verschiebungen der Eigenfrequenz von vertikalen Instrumentierungslanzen können auf Veränderungen der Steifigkeit der Lanze selbst oder ihrer mechanischen Einbaubedingungen hinweisen. So findet man beispielsweise an Instrumentierungslanzen, die an umliegende Bauteile anschlagen, eine zunehmende Dämpfung der Eigenschwingung /73/.

Theoretische Untersuchungen zu Eigenfrequenzen von vertikalen Instrumentierungslanzen, die beidseitig eingespannt sind, sagen abhängig von der Länge der Lanze einen ersten Schwingungsmodus zwischen 3 Hz und 4 Hz und einen zweiten Schwingungsmodus zwischen 6 Hz und 7 Hz voraus /74/.

Aus den auf ihren Mittelwert normierten autospektralen Leistungsdichten der Neutronenflußrauschsignale (Bild 5.7) treten drei Peaks bei den Frequenzen von ca. 3,6 Hz, 5,7 Hz und 7,8 Hz deutlich heraus. Insgesamt sind die Spektren einander aber so ähnlich, daß sie fast deckungsgleich übereinanderliegen.

Die Korrelationsanalyse ermöglicht eine Aufteilung in zwei unterschiedliche Signalanteile:

- Auf der einen Seite sieht man für Signalkombinationen von SPN-Detektoren innerhalb der selben Instrumentierungslanze einen Anteil mit hoher Kohärenz und phasengleichem Verhalten im Frequenzbereich bis 4 Hz sowie hoher Kohärenz und diametralem Phasenverhalten um die Frequenz bei 7,8 Hz.

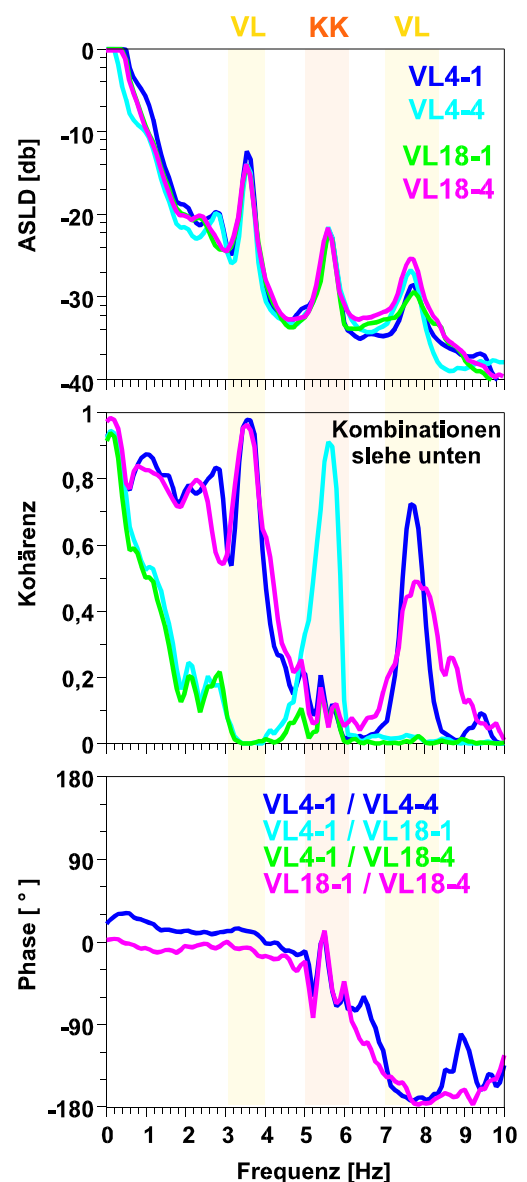


Bild 5.7: Korrelationsanalyse von VL und KK Schwingungen

- Auf der anderen Seite sieht man dagegen für Signalkombinationen von SPN-Detektoren entlang der selben Kühlkanäle einen Anteil ohne Kohärenz im Frequenzbereich von 0 Hz bis 4 Hz und um die Frequenz von 7,8 Hz, aber eine hohe Kohärenz um den Peak bei 5,7 Hz.

Folgende Merkmale identifizieren einen ersten gleichphasigen und einen zweiten gegenphasigen Lanzenschwingungsmodus:

- Hohe Übereinstimmung der Frequenzlage in den Signalkombinationen von SPN-Detektoren innerhalb der selben Instrumentierungslanze mit den Frequenzen der Eigenschwingungen von vertikalen Instrumentierungslanzen, die in /74/ vorausgesagt worden sind.
- Frequenzen und Kohärenzwerte nahe eins bei einer Phasenverschiebung von null für den ersten Lanzenschwingungsmodus bei 3 Hz bis 4 Hz.
- Phasenverschiebung von 180 Grad und hohe Kohärenz von etwa 0,4 bis 0,6 für den Peak um die Frequenz bei 7,8 Hz.

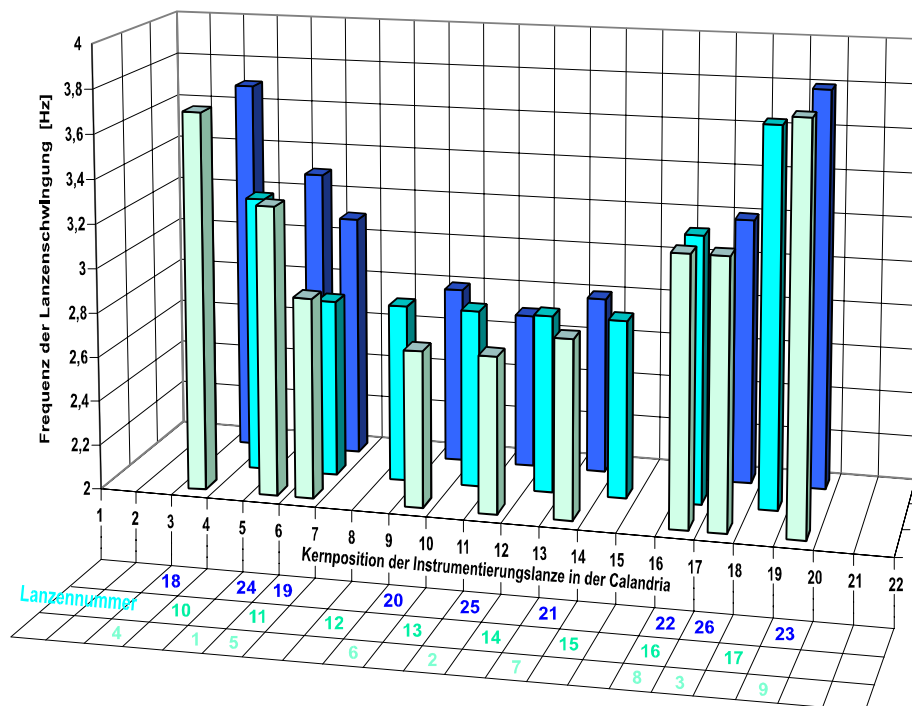


Bild 5.8: Vergleich der Eigenfrequenzen von allen vertikalen Instrumentierungslanzen eines CANDU Reaktors in Abhängigkeit der Einbauposition in der Calandria

Die Neutronenflußsignale aus allen 26 vertikalen Instrumentierungslanzen sind detailliere untersucht worden, um die in Abhängigkeit von Länge, mechanischer Steifigkeit und lokalen Lagerungsbedingungen unterschiedlichen Eigenfrequenzen individuell zu bestimmen.

In Bild 5.8 sind die Eigenfrequenzen der 26 vertikalen Instrumentierungslanzen über ihrer Position innerhalb der Calandria aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen Position bzw. Lanzenlänge, und korrespondierender Frequenz der Bauteilschwingung ist daraus klar ersichtlich.

Die längsten vertikalen Instrumentierungslanzen in der Mitte der Calandria haben die niedrigsten Eigenfrequenzen, während die kürzeren am Rand mit höheren Eigenfrequenzen schwingen. Für die langen Lanzen in der Mitte der Calandria wurden Frequenzen um 2,7 Hz und für die kürzeren Lanzen am Rand der Calandria Frequenzen um 3,8 Hz gemessen. Anhand dieser Darstellung läßt sich nach einer Neu- oder Wiederinbetriebnahme nach einer Revision der mechanische Einbauzustand der Instrumentierungslanzen während des Reaktorbetriebes kontrollieren. Darüber hinaus kann die Schwingungsanalyse betriebsbegleitend ohne Einschränkung des Reaktorbetriebes weitergeführt werden, um so im laufenden Betrieb Veränderungen im Schwingungszustand zu überwachen.

5.2.2 Schwingungen von horizontalen Instrumentierungslanzen

Die vier horizontalen Instrumentierungslanzen HFD1, HFD3, HFD8 und HFD9 verlaufen orthogonal zu den Kühlkanälen und zu den vertikalen Instrumentierungslanzen (siehe Bild 5.6). Aus den auf ihren Mittelwert normierten autospektralen Leistungsdichten der Neutronenflußrauschsignale aus den horizontalen Instrumentierungslanzen (Bild 5.9) treten drei Peaks um 4 Hz, bei 5,7 Hz und bei 8,5 Hz deutlich heraus. Die Peaks bei 4 Hz und bei 8,5 Hz können analog zu Abschnitt 5.2.2 den ersten und zweiten Schwingungsmodi der horizontalen Instrumentierungslanzen zugeordnet werden. Ähnliche Ergebnisse wurden bei Analysen im CANDU Kernkraftwerk Pickering-B, Block 5 erzielt /75/.

Durch die wiederkehrende Bestimmung der individuellen Eigenfrequenzen von Instrumentierungslanzen wird eine betriebsbegleitende Überwachung ihrer mechanischen Integrität ermöglicht. Eine spontan oder auch schleichend auftretende Veränderung in der Frequenz der Bauteilschwingung an einer Position kann anhand von drei Kriterien eingeordnet werden, wenn diese nicht durch eine vorausgegangene betriebliche Maßnahme erklärbar ist /76/:

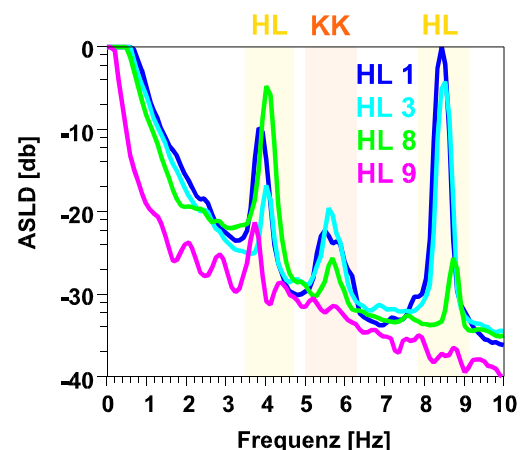


Bild 5.9: Schwingungen von horizontalen Instrumentierungslanzen

- Ein Anstieg der Magnitude bei der Frequenz der Bauteilschwingung zeigt eine Zunahme der Schwingungsamplitude an.
- Eine Verschiebung der Frequenz ist ein Hinweis auf eine Veränderung der mechanischen Steifigkeit und/oder Einspannbedingungen der Instrumentierungslanze.
- Das Aufweiten eines Peaks in der autospektralen Leistungsdichte bei der Eigenfrequenz eines bestimmten Bauteils indiziert eine zunehmend unharmonisch verlaufende Bewegung durch erhöhte Dämpfung, die z.B. durch Anschlagen an benachbarte Bauteile verursacht werden kann.

Die Kenntnis der Eigenschwingungen von vertikalen und horizontalen Instrumentierungsanzlen und die Möglichkeit, sie durch Analyse der Neutronenflußausmessungen praktisch jederzeit betriebsbegleitend überwachen zu können, ermöglicht das frühe Erkennen von Veränderungen der mechanischen Integrität und Veränderungen der Einbausituation. Beispiele hierfür sind nicht erwünschte Bauteilkontakte und an benachbarte Bauteile anschlagende Instrumentierungsanzlen. Das frühe Erkennen dieser Veränderungen kann benutzt werden um Schäden zu begrenzen und Folgeschäden zu verhüten.

5.2.3 Schwingungen von Brennelementen / Brennstäben

In einem CANDU-600 Reaktor können Brennelemente, im Gegensatz zu Druck- oder Siedewasserreaktoren, während des Leistungsbetriebs gewechselt werden. Hierzu wird von beiden Seiten einer Druckröhre eine Brennelementlademaschine angedockt. Dann werden sechs Brennelemente von der Belademaschine in die Druckröhre eingeschoben und durch die Entlademaschine sechs Brennelemente auf der anderen Seite entnommen. Die Be- und Entladestrategie richtet sich dabei gewöhnlich an der Brennstoffökonomie aus: Die niedrig belasteten Brennelemente aus der Randzone der Calandria, die durch Anreicherung mit etwas mehr spaltbarem Material aufgeladen worden sind, können so im nächsten Schritt in der Mitte der Calandria ausgebrannt werden.

An dem SPN-Detektor VL7-3 und sieben weiteren ist vor-, während- und nach einem Brennelementwechsel in einem naheliegenden Druckrohr (Calandria Position M15 in Bild 5.20) die Neutronenflußfluktuationen gemessen worden (Bild 5.10). Es war aus einer zuvor durchgeführten Isotopenmessung bekannt, daß in dieser Druckröhre mindestens ein defektes Brennelement enthalten sein mußte.

Die dominanten Frequenzen der Brennstäbe, aus denen die Brennelemente zusammengesetzt sind, wurden in einer Versuchsanordnung für die zweite und dritte Brennelementeposition im Druckrohr zwischen 12 Hz und 45 Hz mit dem häufigsten Wert bei 33 Hz festgestellt [77].

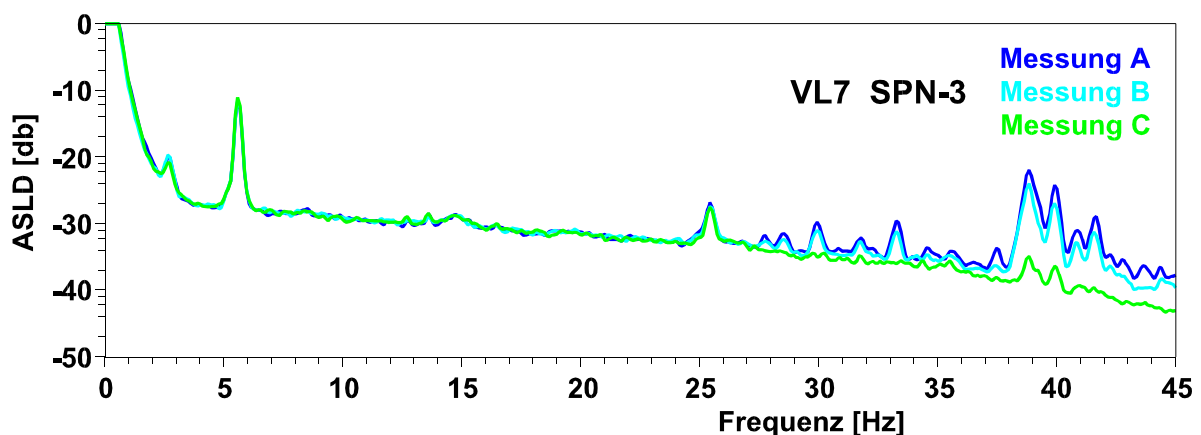


Bild 5.10: ASLD vor-, während- und nach einem Brennelementwechsel

Die autospektralen Leistungsdichten der Neutronenflußschwankungen zeigen vor-, während- und nach dem Brennelementwechsel im Frequenzbereich von 0 Hz bis 27 Hz keine erkennbaren Unterschiede. Im Frequenzbereich von 27 Hz bis 45 Hz sind jedoch deutliche Peaks erkennbar, deren Magnituden vor dem Brennelementwechsel am höchsten sind (Messung A, blaue Kurve) und während des Brennelementwechsels abnehmen (Messung B, hellblaue Kurve). Nach dem Brennelementwechsel sind die Peaks dann praktisch verschwunden (Messung C, grüne Kurve).

Ein Meßfehler, z.B. durch elektrische Störungen oder mechanische Kabelbewegungen, kann weitgehend ausgeschlossen werden, da die Signale der sieben anderen SPN-Detektoren, die simultan aufgezeichnet wurden dieses Verhalten nicht zeigen.

5.2.4 Eigenschwingungen der Kühlkanäle

Eine schematische Darstellung der Einbausituation von vier SPN-Detektoren, je zwei der vertikalen Instrumentierungslanzen VFD 4 und VFD 18 in Detektorebene 1 und 4, sowie einige benachbarte Kühlkanäle zeigt Bild 5.11.

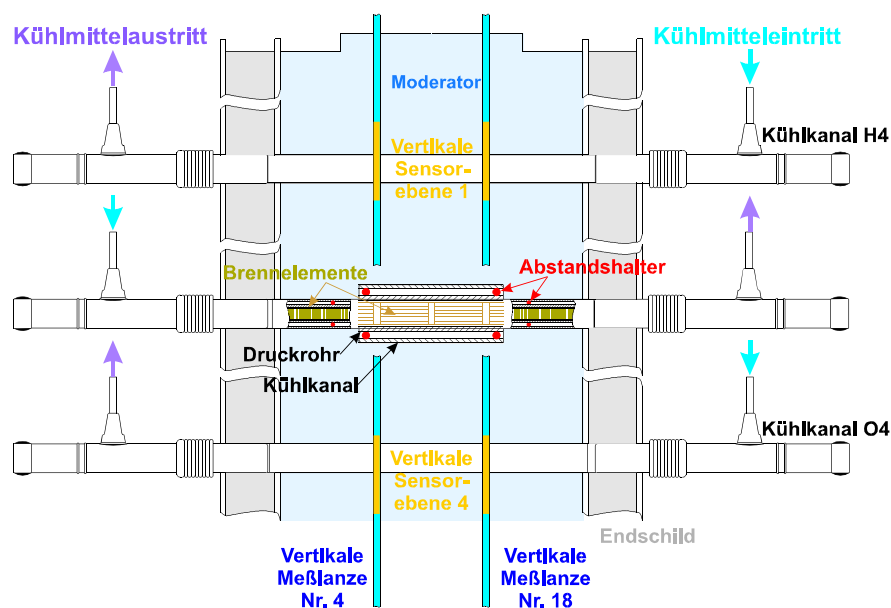


Bild 5.11: Einbausituation von Kühlkanälen und vertikalen Instrumentierungslanzen

Es wird deutlich, daß es Kombinationen von SPN-Detektoren aus unterschiedlichen vertikalen Instrumentierungslanzen gibt, die entlang des selben Kühlkanals angeordnet sind. Für solche Kombinationen wurde bereits in Abschnitt 5.2.2 ein Peak mit hoher Kohärenz bei 5,7 Hz beschrieben, der für Signalkombinationen innerhalb der selben vertikalen Instrumentierungslanzen keine Kohärenz aufweist. Diese Schwingung ist sowohl in den Signalen aus den vertikalen (Bild 5.7) als auch in den Signalen aus den horizontalen Instrumentierungslanzen (Bild 5.9) und den Außenkammern erkennbar.

Die Phasenverschiebung zwischen zwei Neutronenflußsignalen ist in diesem Fall davon abhängig, ob sich die beiden SPN-Detektoren auf der selben Seite des Kühlkanal befinden oder ob dieser zwischen ihnen ist.

Im ersten Fall sind die Signale in Phase, in zweiten Fall sind sie diametral (siehe Bild 5.12). Das bedeutet, daß das schwingende Bauteil zwischen den Detektoren ist. Somit ist die Schwingung bei 5,7 Hz die Bauteilschwingung der Kühlkanäle.

Ein höherer Modus der Kühlkanalschwingung ist in vielen Signalkombinationen jeweils entlang eines gemeinsamen Kühlkanals um 15 Hz bei gegenphasigem Verhalten festgestellt worden /75/.

5.2.5 Druckfluktuationen und Vibrationen des Moderatorbehälters

Der Moderator wird durch mehrere Einlässe an den Längsseiten der Calandria eingeleitet und in der Nähe der tiefsten Stelle in der Mitte der Calandria abgesaugt. Eine Berechnung der Moderatorzirkulation zeigt die stärksten Ablenkungen der Strömung mit Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,5m/s² bis 1m/s² im Bereich oberhalb der Einlässe, in der räumlichen Nähe zu den Außenkammern, und in der Mitte der Calandria um die Auslässe herum /76/.

Autospektrale Leistungsdichten und Kohärenzen des Signals eines Drucksensors im Moderator Kühlkreislauf, der Signale der Neutronenflußaußenkammern D, E und F sowie die Kohärenzen mit Signalen einiger SPN-Detektoren (Position siehe Bild 5.6) zeigt Bild 5.13. Im Spektrum des Drucksensors ist die höchste Magnitude bei etwa 5,2 Hz erkennbar. Es treten weiterhin deutlich Peaks bei 16,5 Hz und 33 Hz aus dem Untergrundrauschen heraus. Sie sind als Drehfrequenz der mit 990 Umdrehungen pro Minute laufenden Moderatorpumpe, und deren erster Harmonischen identifiziert worden. In den Spektren der Außenkammersignale treten Peaks bei etwa 5,6 Hz sowie bei 7,5 Hz 11,5 Hz, 13,5 Hz und ein Frequenzbereich von 18 Hz bis 31 Hz auf.

In den Kohärenzen des Drucksignals mit den Außenkammersignalen ist ein Peak bei 5,2 Hz erkennbar, jedoch nicht bei 5,4 Hz bis 5,7 Hz, der Eigenfrequenz der Kühlkanäle.

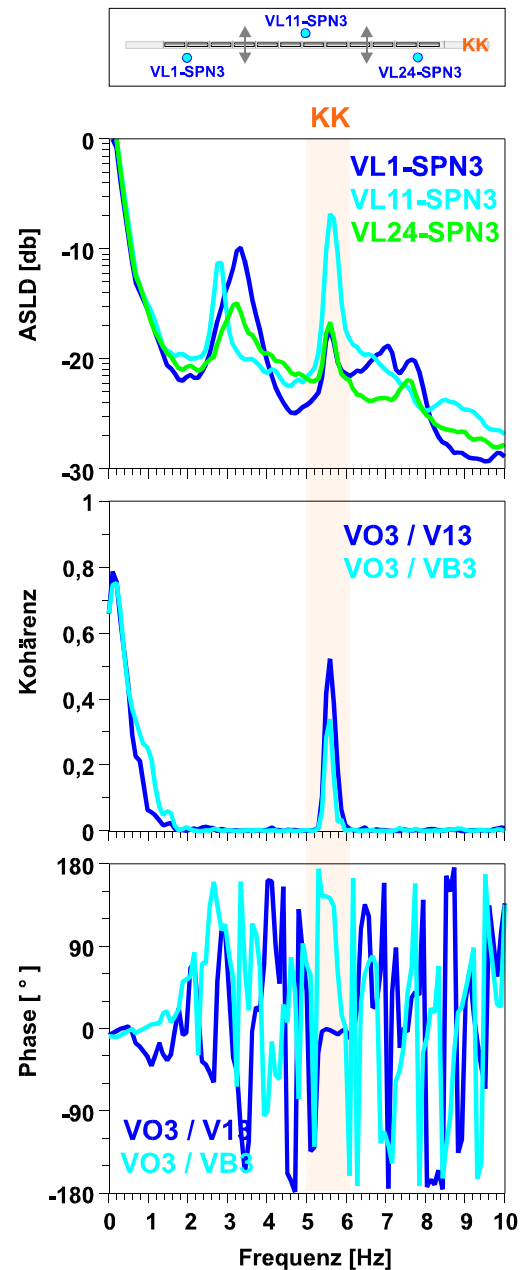


Bild 5.12: Phasenlage der KK-Schwingung in Abhängigkeit der Detektorposition

Hohe Kohärenzen des Drucksignals mit den Neutronenflußsignalen der Außenkammern und der SPN-Detektoren, die sich an Positionen nahe von Moderatorein- und auslaß befinden (VFD 9 am Einlaß, VFD 14 am Auslaß), werden im Frequenzbereich von 17 Hz bis 30 Hz festgestellt. Dagegen sind die Signale der SPN-Detektoren, die sich außerhalb des direkten Ein- und Auslaßgebietes befinden (VFD 1 und VFD 3), nicht mit dem Drucksignal korreliert.

Die Kohärenzen in Moderatordruck und Neutronenflußsignalen im Frequenzbereich von 17 Hz bis 30 Hz werden folglich durch Druckschwankungen im Moderator, zwischen Moderatorein- und auslaß verursacht.

Wie jedoch an dem unterschiedlichen Verlauf der Korrelationen der Außenkammersignale mit dem Moderatordrucksignal (P/XD, P/XE / P/XF) und den Korrelationen der SPND-Signale mit dem Moderatordrucksignal (P/V9-3, P/V14-3) abzulesen ist, wird die Außenhülle der Calandria durch diese Druckschwankungen im Moderator selbst zu Schwingungen angeregt, die sich in den Außenkammersignalen abbilden.

Es ist keine Kohärenz der Neutronenflußsignale mit dem Moderatordrucksignal im Frequenzbereich unter 1 Hz erkennbar. Das bedeutet, daß es keine thermohydraulischen Schwankungen des Moderators gibt, die sich auf Leistungsschwankungen des Reaktors übertragen (Bild 5.13).

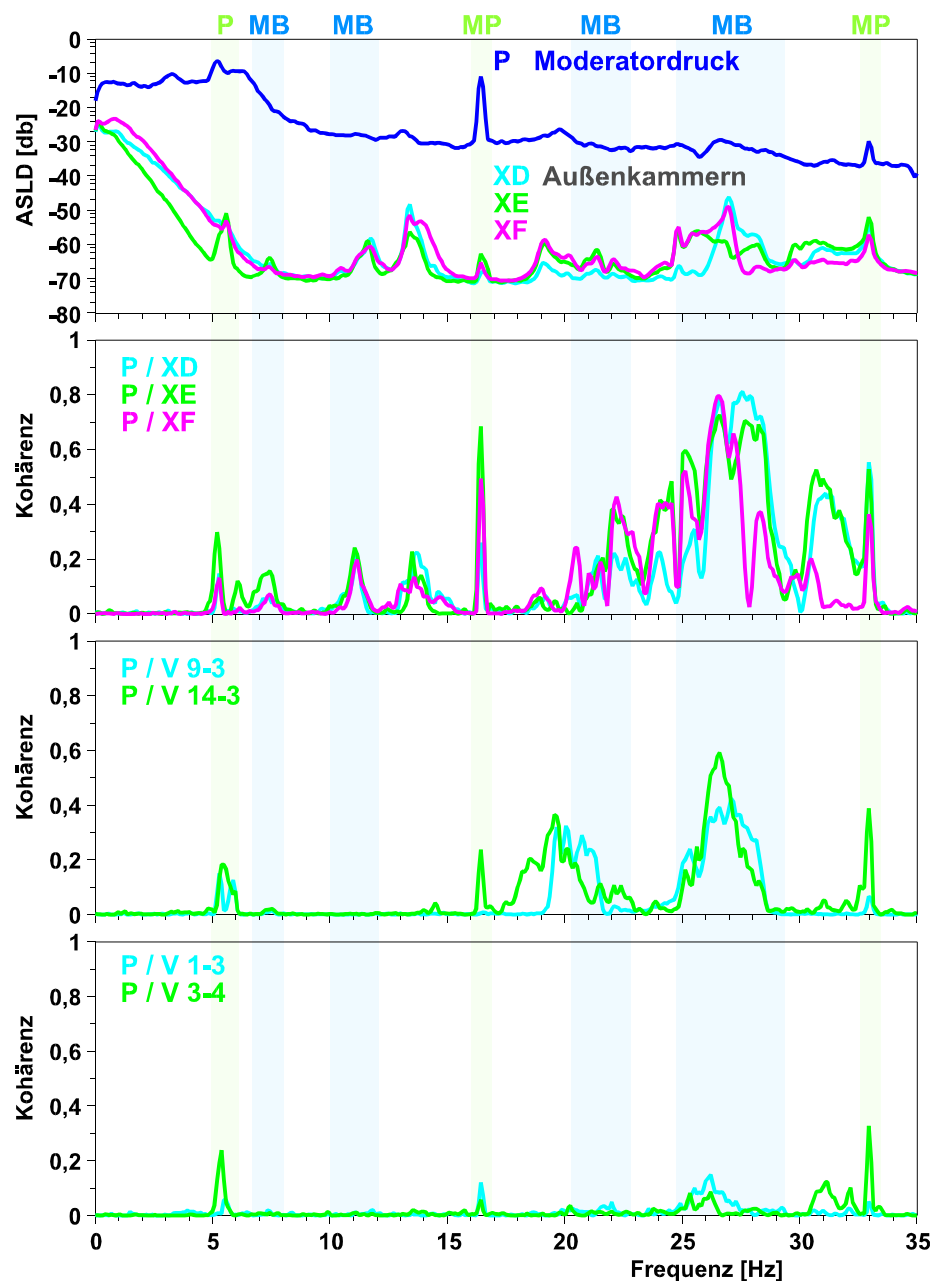


Bild 5.13: Gemeinsame Spektralanteile in Moderatordruck und Neutronenflußsignalen

Erst in Neutronenflußsignalen mit den selben Kühlkanälen im gemeinsamen Sichtbereich ist im Frequenzbereich unter 1 Hz Kohärenz feststellbar (Bild 5.14). Das ist ein Hinweis auf thermohydraulischen Schwankungen und Transporteffekte im Kühlmittel.

Bild 5.14 zeigt normierte autospektrale Leistungsdichten und Kohärenzen der Signale von vier SPN-Detektoren in der Instrumentierungs-lanze VFD 14 auf einer Mittenposition (siehe Bild 5.6). Neben den bereits durch den ersten und zweiten Schwingungsmodus der vertikalen Instrumentierungs-lanze bei 2,7 Hz und 7,9 Hz und durch den ersten und zweiten Schwingungsmodus der Kühlkanäle bei 5,4 Hz und zwischen 13 Hz bis 15 Hz identifizierten Peaks, fallen zwei breite Peaks im Frequenzbereich um 20 Hz und um 26 Hz auf. Die

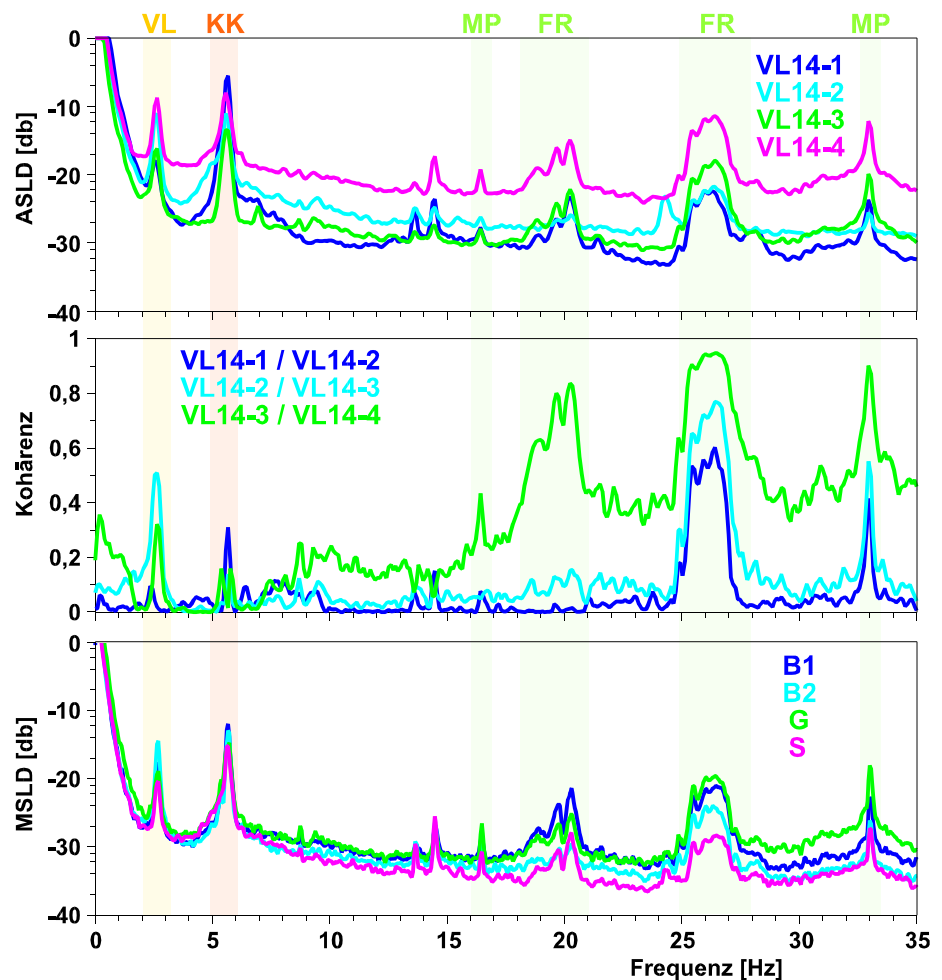


Bild 5.14: Autospektrale Leistungsdichten und Modenseparation von SPN-Detektoren einer zentralen vertikalen Instrumentierungs-lanze

Kohärenzwerte von jeweils zwei SPN-Detektorsignalen in diesen beiden Bereichen sind um so höher, je näher die Detektoren dem Behälterboden und damit dem Moderatorabfluß sind. Damit kann auch hier eine Neutronenflußfluktuation durch eine globale Moderatorabflußfluktuation bei 5,2 Hz und lokale Moderatorabflußfluktuationen zwischen 17 Hz und 30 Hz in der Nähe des Moderatorein- und Auslasses festgestellt werden.

Die im Spektrum deutlich erkennbaren schmalen Peaks bei 16,5 Hz und 33,0 Hz sind durch Dichteschwankungen verursacht worden, die durch die erste und zweite Harmonische der periodischen Unwuchtanregung der Moderatorpumpe eingepreßt werden. Schmale Peaks mit hohem Signal-zu-Hintergrund Abstand sind charakteristisch für periodische erzwungene Schwingungen mit hoher Frequenzstabilität und geringer Dämpfung.

5.3 Betriebsbegleitende Überwachung der mechanischen Integrität von Kühlkanälen in einem CANDU-600 Schwerwasserreaktor

Mit knapp zehn Prozent ist der größte Anteil an unplanmäßigen Anlagenstillständen in CANDU Reaktoren auf notwendige Arbeiten an den Kühlkanälen zurückzuführen, gefolgt von Arbeiten an den Dampferzeugern mit etwa dreieinhalb Prozent und Hauptkühlmittelpumpen mit drei Prozent /74/. Die Kühlkanäle bestehen aus je einem Druckrohr, das 12 Brennelemente beinhaltet und einem Calandriarohr. Die vereinfachte Illustration eines Kühlkanals und der Einbausituation zeigt Bild 5.15. Die Kühlkanäle in einem CANDU-600 Reaktor sind etwa 6,1 m lang, haben eine Wandstärke von 4,2 mm und einen Innendurchmesser von 104 mm. Beide Rohre werden durch vier Abstandshalter, die einen direkten Kontakt beider Rohre verhindern sollen, voneinander getrennt. Aus mehreren Anlagen wird berichtet, daß sich diese Abstandshalter während des Betriebes verschoben hatten /79/.

Im Extremfall kann das Druckrohr bei verschobenen Abstandshaltern bis auf das Calandriarohr durchsacken. Das ist einerseits wegen des mechanischen Verschleißeintrags, andererseits wegen der hohen Druck- und Temperaturdifferenz zwischen beiden Rohren problematisch. Die Außenfläche des Calandriarohres ist auf Moderatordruck und -temperatur (ca. 70 °C, 0,15 MPa), die innere Oberfläche des Druckrohres jedoch auf Kühlmitteldruck und -temperatur (ca. 300 °C, 10 MPa). In einer Anlage ist es bereits durch einen so verursachten direkten Kontakt zwischen beiden Rohren zum Bruch eines Kühlkanals gekommen, als dessen Folge in dieser und einer baugleichen Anlage die Kühlkanäle komplett gewechselt wurden. Der Stillstand der Anlagen dauerte etwa drei Jahre und verursachte Kosten von etwa 400 Millionen kanadischen Dollars /80/.

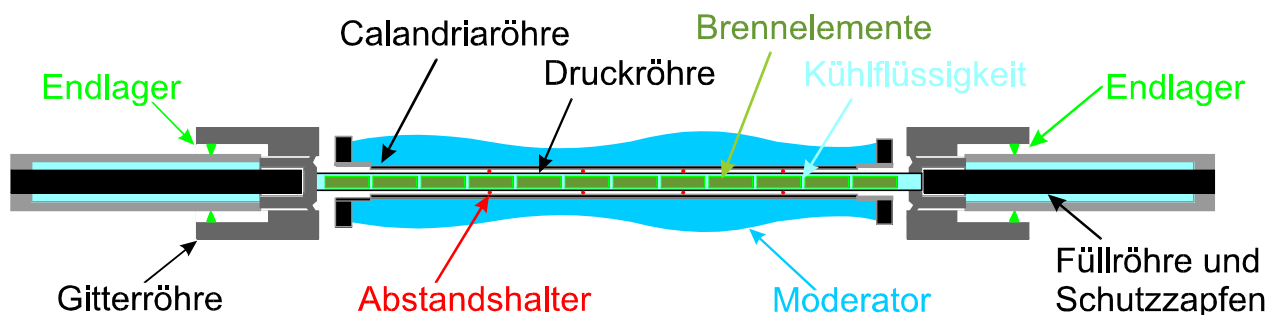


Bild 5.15: Aufbau eines horizontalen Kühlkanals in einem CANDU-600 Reaktor

In Kapitel 5.2 ist exemplarisch gezeigt worden, daß die Eigenfrequenzen von Kühlkanälen mit Hilfe der Neutronenflußrauschenanalyse identifiziert werden können. Für den Einsatz als betriebsbegleitende Überwachungsmethode sind drei wichtige Fragen offen geblieben:

- Wie hängt eine Veränderung der Kühlkanalschwingung mit einer Veränderung der mechanischen Einbausituation zusammen?
- Wie viele der insgesamt 380 Kühlkanäle sind mit dieser Methode zuverlässig überwachbar?
- Läßt sich der Einfluß der Kühlkanalschwingung in den Neutronenflußsignalen von den Einflüssen anderer, aus dieser Sicht parasitärer Effekte, getrennt darstellen?

5.3.1 Beurteilung von Veränderung der Kühlkanalschwingungen

Um Peaks von Kühlkanalschwingungen in den Korrelationsanalysen der Neutronenflußsignale besser interpretieren zu können, ist ein Modell auf Basis eines linearen finite Elemente Codes verwendet worden /81/. Vier Fälle vertikaler Bewegung des Druckrohres wurden untersucht:

Fall 1: Kontakt aller Abstandshalter und feste Einspannung in beiden Endlagern

Dies ist die normale fehlerfreie Einbausituation. Die Einspannung trägt in beiden Endlagern und alle Abstandshalter haben Kontakt (Bild 5.16 oben).

Das berechnete Spektrum enthält Peaks bei 5,5 Hz, der Grundschwingung der Kühlkanäle, bei 14,8 Hz, ihrem zweiten Modus, und bei 27,5 Hz, dem dritten Modus.

In den meisten zeitgleich gemessenen Kombinationen der SPN-Detektorsignale entlang eines gemeinsamen Kühlkanals sind zumindest die Grundschwingung zwischen 5 und 6 Hz und ein höherer Mode um 15 Hz kohärent.

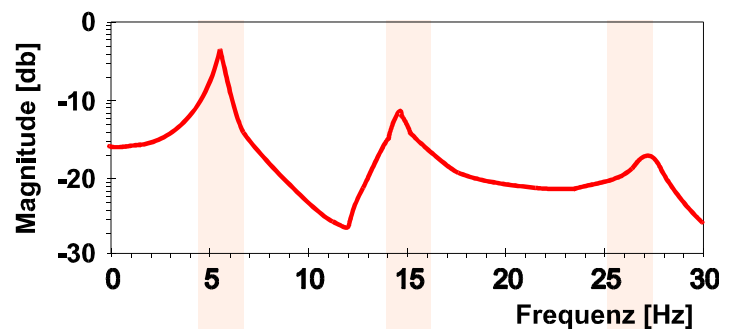
Für den ersten und zweiten Modus stimmt das Modell gut mit den Ergebnissen der hier exemplarisch ausgewählten Messungen an den vertikalen Instrumentierungsanlagen Nummer 2, 5 und 7, korreliert mit den Signalen der vertikalen Instrumentierungsanlagen Nummer 25, 19 und 21 auf den Sensorebenen 1 und 2 überein, während für den dritten Modus eine Übereinstimmung nicht erkennbar ist.

Der Normalzustand läßt sich aber dennoch über die Frequenzen der ersten beiden Moden eindeutig im Neutronenflußspektrum identifizieren.

Modellschema:



Berechnung:



Meßergebnis:

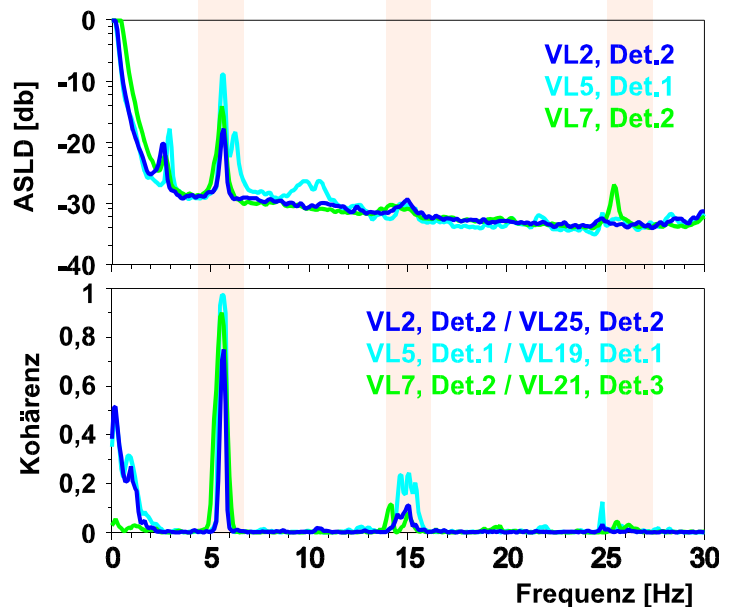


Bild 5.16: Schwingungssignaturen im Normalfall

Fall 2: Kontakt aller Abstandshalter ohne feste Einspannung in einem der Endlager

Der zweite Fall, der mit dem Modell untersucht worden ist, ist eine fehlerhafte Innenlagerung im Endschild der Calandria (Bild 5.17 oben).

Aufgrund der im Vergleich zum Normalfall (Fall 1) veränderten Einspannbedingungen, verschiebt sich die Frequenz der Grundschiwingung auf 4,0 Hz, die der zweiten Schwingungsmode auf 15,2 Hz und die der dritten Mode auf 26,4 Hz. Zusätzlich kommt eine im Normalfall nicht vorhandene Schwingung bei 7 Hz auf.

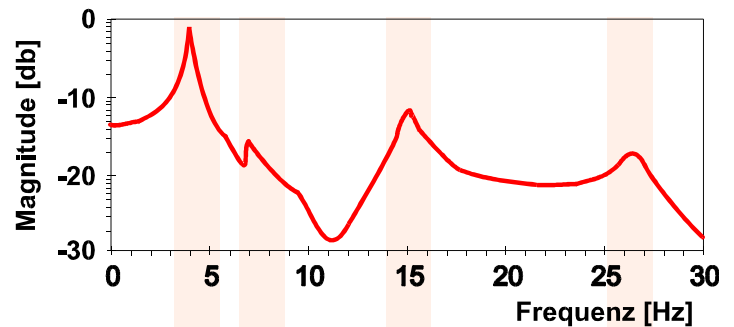
Eine mit diesem Fall vergleichbare Frequenzverteilung im Neutronenflußspektrum ist an den vertikalen Instrumentierungslanzen Nr. 14 und 21 auf der Sensorebene Nr. 6 gemessen worden. In den autospektralen Leistungsdichten beider Signale und ihrer Kohärenz sind Peaks zwischen 4 Hz und 5 Hz, etwas über 8 Hz, um 15 Hz und 20 Hz sowie um 27 Hz erkennbar.

Hier ist, auch wenn es geringe Abweichungen bei den ersten beiden Moden gibt, eine fehlerhafte Innenlagerung im Endschild der Calandria auf Kühlkanalposition Q13 oder R13 (siehe Bild 5.20) diagnostiziert worden.

Modellschema:



Berechnung:



Meßergebnis:

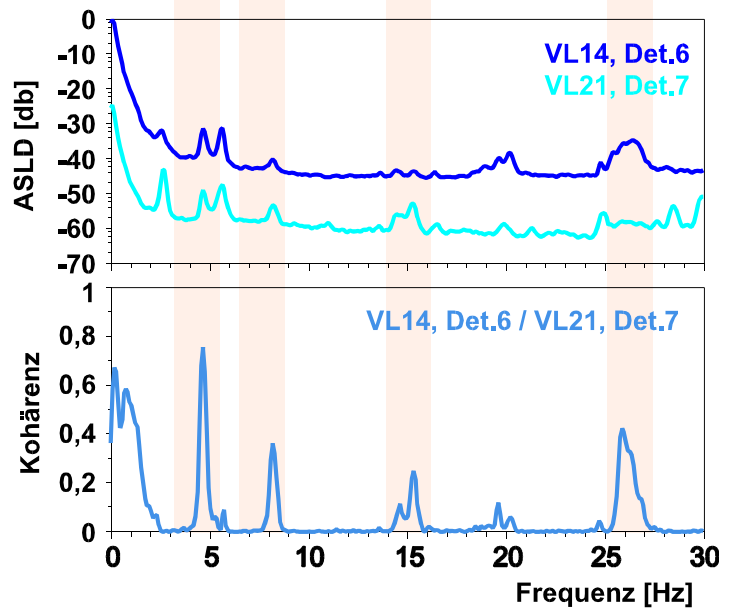


Bild 5.17: Schwingungssignaturen bei Veränderung in einem Endlager

(siehe Bild 5.20)

Fall 3: Kein Kontakt der Abstandshalter bei fester Einspannung in beiden Endlagern

In diesem Fall wird unterstellt, daß keiner der vier Abstandshalter Kontakt zu Calandriarohr und Druckrohr hat (Bild 5.18 oben).

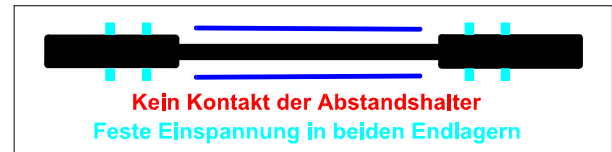
Das hierzu berechnete Spektrum enthält Peaks bei 4,7 Hz, 12,9 Hz und für einem dritten Modus bei 25,1 Hz.

Eine Messung an den vertikalen Instrumentierungslanzen Nr. 5 und Nr. 19 auf der Sensorebene Nr. 4 hat zwei übereinstimmende Peaks ergeben. In den autospektralen Leistungsdichten beider Signale und ihrer Kohärenz sind zwei Peaks bei 4,9 Hz und um 12,5 Hz mit guter Übereinstimmung erkennbar, der Peak bei 25,1 Hz kann in den Meßergebnissen nicht gefunden werden.

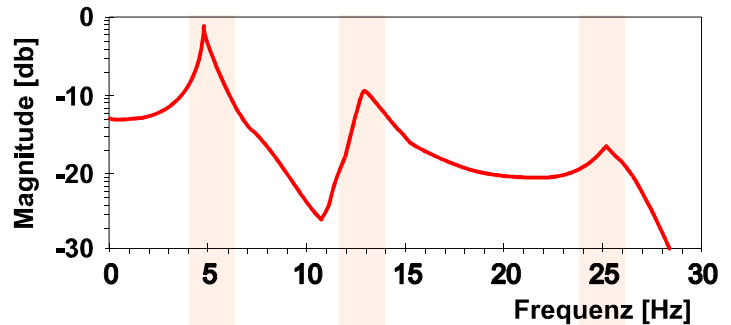
Das Ergebnis begründet den Verdacht auf ein Vorliegen des unterstellten Falles an einem der Kühlkanäle auf Kernposition P-6/P-7 oder O-6/O-7 entlang derer sich die SPN-Detektoren VL5-4 und VL19-4 befinden.

Der Verdacht ist jedoch schwer zu verifizieren, denn selbst eine visuelle Inspektion, die gewöhnlich wegen der hohen Dosisleistung die von den Kühlkanälen ausgeht mit einer fernsteuerbaren Kamera durchgeführt wird, muß nicht zwangsläufig zu einem eindeutigen Ergebnis führen. Die Tatsache, daß kein tragender Kontakt der vier Abstandshalter vorliegt, bedeutet nicht notwendig, daß sich die Abstandshalter auf andere Positionen verschoben hätten, sondern nur, daß keine Kräfte übertragen werden.

Modellschema:



Berechnung:



Meßergebnis:

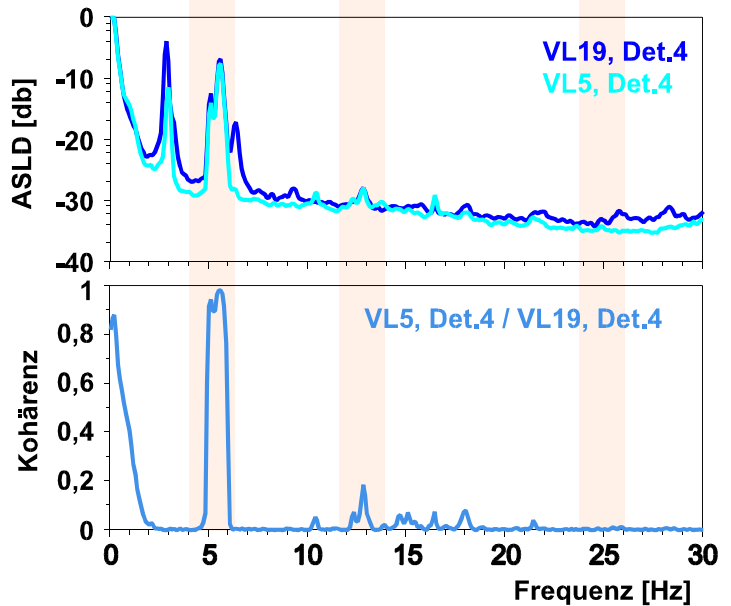


Bild 5.18: Schwingungssignaturen ohne Kontakt der Abstandshalter

Fall 4: Verschiedene Kombinationen von Abstandshalterkontakten

In diesem Fall sind Spektren in Abhängigkeit von verschiedenen Kombinationen der Abstandshalterkontakte bei fester Einspannung in beiden Endlagern berechnet worden (Bild 5.19 oben). Die Frequenz der Grundschwingung ist hierbei identisch zum Normalfall bei 5,5 Hz.

Die Frequenzen der zweiten Schwingungsformen liegen zwischen 12 Hz und 15 Hz und oberhalb von 17 Hz bis zu einer Frequenz von 28 Hz kommt es zur Ausbildung höher Modi.

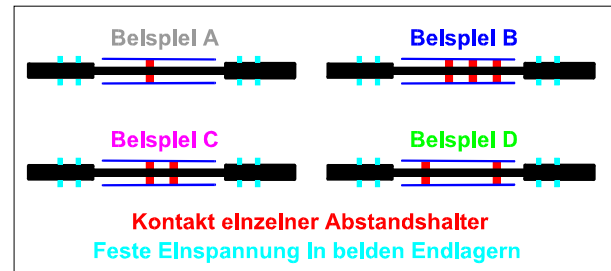
Ähnliche Verteilungen in den autospektralen Leistungsdichten und Kohärenzen sind bei Messungen an den Instrumentierungslanzen Nr. 7, 14, 15 und 21 auf den Sensorebenen Nr. 3 und 5 festgestellt worden. Anhand des Vergleiches mit den Ergebnissen der Modalanalyse muß hier auf eine mögliche Fehlanordnung der Abstandshalter geschlossen werden.

Die Position der Abstandshalter kann mit Hilfe eines Ultraschallverfahrens während eines Reaktorstillstandes, zerstörungsfrei geprüft und gegebenenfalls verändert werden. Da dieses Verfahren jedoch sehr Zeit- und Dosisintensiv ist, werden nur bei etwa zehn bis zwanzig Kühlkanälen pro Revision die Abstandshalter wieder richtig positioniert.

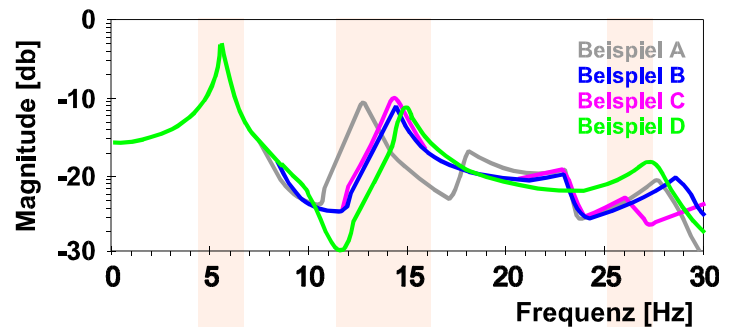
Das hier vorgestellte Verfahren ermöglicht die qualifizierte zustandsbezogene Auswahl von Kühlkanälen. So kann einerseits vermieden werden, das Kühlkanäle mit dem Ultraschallverfahren geprüft werden,

obwohl es nicht notwendig ist, andererseits können durch frühzeitiges Wiederherstellen der richtigen Abstandshalterpositionen in Kühlkanälen mit Fehlanordnungen entstehende Schäden verhindert werden.

Modellschemata:



Berechnung:



Meßergebnis:

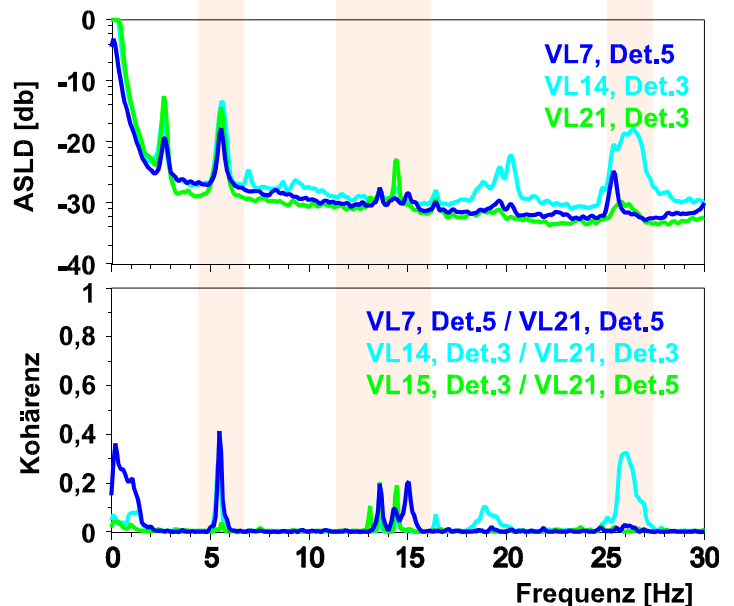


Bild 5.19: Schwingungssignaturen bei veränderten Abstandshalterkonfigurationen

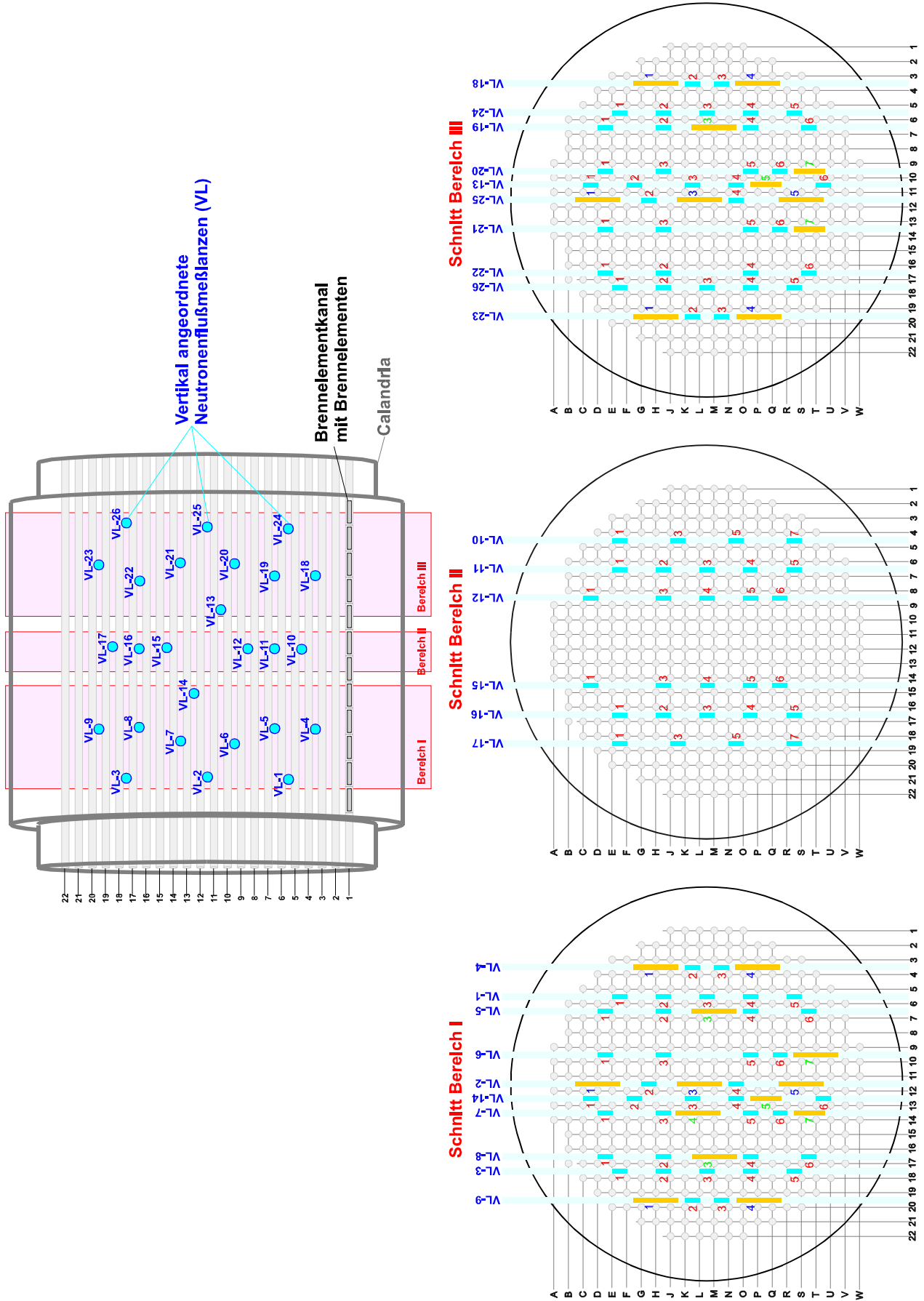


Bild 5.20: Einbausituation der Kühlkanäle und der vertikalen Instrumentierungslanzen im Moderatorbehälter eines CANDU-600 Reaktors

5.3.2 Abschätzung der Ortsauflösung

In Bild 5.20 sind die Positionen der SPN-Detektoren schematisch in drei Schnitten über den Positionen der Kühlkanäle aufgetragen. Die kurzen in blau eingezeichneten SPN-Detektoren haben einen Vanadiumemitter während die langen und in ocker eingezeichneten SPN-Detektoren Platinemitter haben. Diese sind etwa dreimal so lang wie die Detektoren mit Vanadiumemitter. Anhand der Schnittdarstellungen kann abgezählt werden, daß SPN-Detektoren mit Vanadiumemitter von vier Kühlkanälen umgeben sind, während SPN-Detektoren mit Platinemitter teilweise von bis zu zehn Kühlkanälen umgeben sind.

Im Bereich der identifizierten Bauteilschwingung der Kühlkanäle von 4 bis 6 Hz sind vier Peaks im Kohärenzspektrum (Bild 5.21) von zwei Detektoren (vertikale Lanze 6 und Lanze 20) entlang eines Kühlkanals auf Sensorebene 3 erkennbar.

Die Peaks bei 5,1 Hz und 5,7 Hz sind deutlich voneinander getrennt, während die beiden Peaks bei 5,3 Hz und 5,5 Hz sich überlagern. Verursacht werden diese vier Peaks durch Bauteilschwingungen der vier umliegenden Kühlkanäle. Wie hier bereits erkennbar ist, lassen Peaks sich nicht mehr eindeutig unterscheiden, falls ihr Frequenzabstand geringer ist als zwei Halbwertsbreiten.

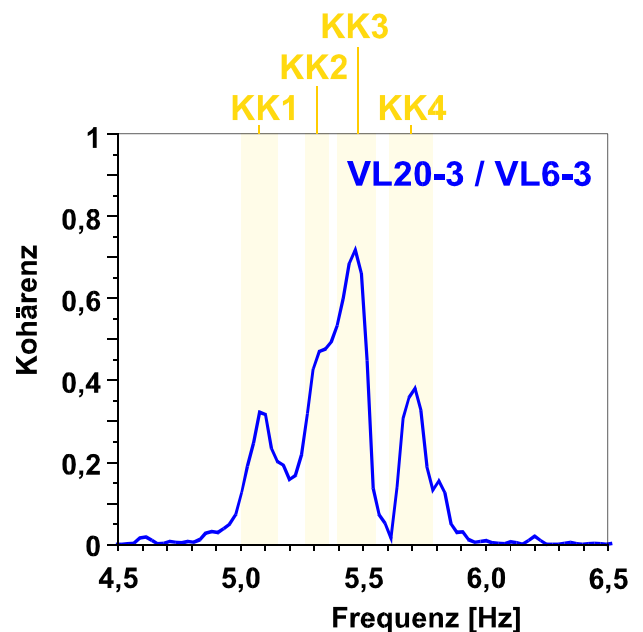


Bild 5.21: Auflösung einzelner KK-Schwingungen

Für die Kohärenzen von Signalkombinationen aus SPN-Detektoren mit Platinemitter erhält man sogar eine Überlagerung der Bauteilschwingungen von bis zu zehn umliegenden Kühlkanälen. Eine einzelne Kühlkanalschwingung ist hier nur dann noch unterscheidbar, wenn ihre Frequenz deutlich von denen der anderen abweicht, oder ihre Magnitude im Autospektrum der Detektorsignale deutlich ansteigt. Dies ist kein Nachteil für die Überwachung, da Abweichungen vom Normalzustand immer noch erkannt werden können. Anhand von Bild 5.3.7 wird deutlich, daß zumindest die Kühlkanäle, die in unmittelbarer Nähe zu einem der SPN-Detektoren sind, mit Hilfe der Neutronenflußrauschanalyse überwacht werden können. Anhand der Bilder 5.3.1 bis 5.3.3 kann abgezählt werden, daß dies 257 der 380 Kühlkanäle sind. Es ist jedoch anzunehmen, daß ein besonders stark schwingender Kühlkanal auch noch in einem Abstand von zwei Positionen zu einem SPN-Detektor nachweisbar ist. Dies träfe für 104 Kühlkanäle zu, kann hier jedoch mangels Vorkommens nicht gezeigt werden.

Zusammenfassend kann also davon ausgegangen werden, daß durch die vorhandene Instrumentierungsdichte der SPN-Detektoren eine ausreichende Abdeckung zur Überwachung der Kühlkanäle gegeben ist. Damit ist die Schwingungsüberwachung der Kühlkanäle durch Analyse der

Neutronenflußrauschsignale in CANDU-600 Reaktoren eine geeignete Methode, um während des laufenden Reaktorbetriebs Veränderungen im Schwingungszustand und damit einhergehend Veränderungen der mechanischen Integrität, erkennen zu können.

5.3.3 Überwachung von Kühlkanalschwingungen mit dem Modenseparationsverfahren

Für die Überwachung der mechanischen Integrität von Kühlkanälen (also die Steifigkeit der Koppelung zwischen den Baugruppen und die Lagerung des Bauteils) durch Analyse der Neutronenflußsignale erscheint es besonders wünschenswert, die Anteile im Neutronenflußsignal die durch die Bewegung der Kühlkanäle selbst verursacht werden, von allen anderen zu trennen.

Die Auswertung eines einfachen Frequenzbandes im Spektrum eines einzelnen Neutronenflußsignals ist wegen der Vielfalt von möglichen Ursachen für eine Veränderung im Neutronenfluß zu fehleranfällig. Auch wegen der verschiedenen möglichen Schwingungssignaturen der Kühlkanalbewegung (siehe Abschnitt 5.3.1) erscheint ein solches Verfahren nicht sinnvoll.

Mit dem Modenseparationsverfahren können die Abbildungen einer bestimmten Kühlkanalbewegung im Neutronenfluß, mit vier

SPN-Detektoren zeitgleich gemessen, ausgewertet werden. Hierzu werden jeweils zwei Detektoren in zwei vertikalen Instrumentierungslanzen verwendet, die entlang des zu beobachtenden Kühlkanals positioniert sind.

In jeder Instrumentierungslanze muß ein Detektor oberhalb und der andere Detektor unterhalb des zu beobachtenden Kühlkanals angeordnet sein. Die Anordnung der Detektoren Nummer 3 und 4 in den vertikalen Instrumentierungslanzen Nummer 1 und 24 (Bild 5.22 oben) entspricht etwa der Anordnung

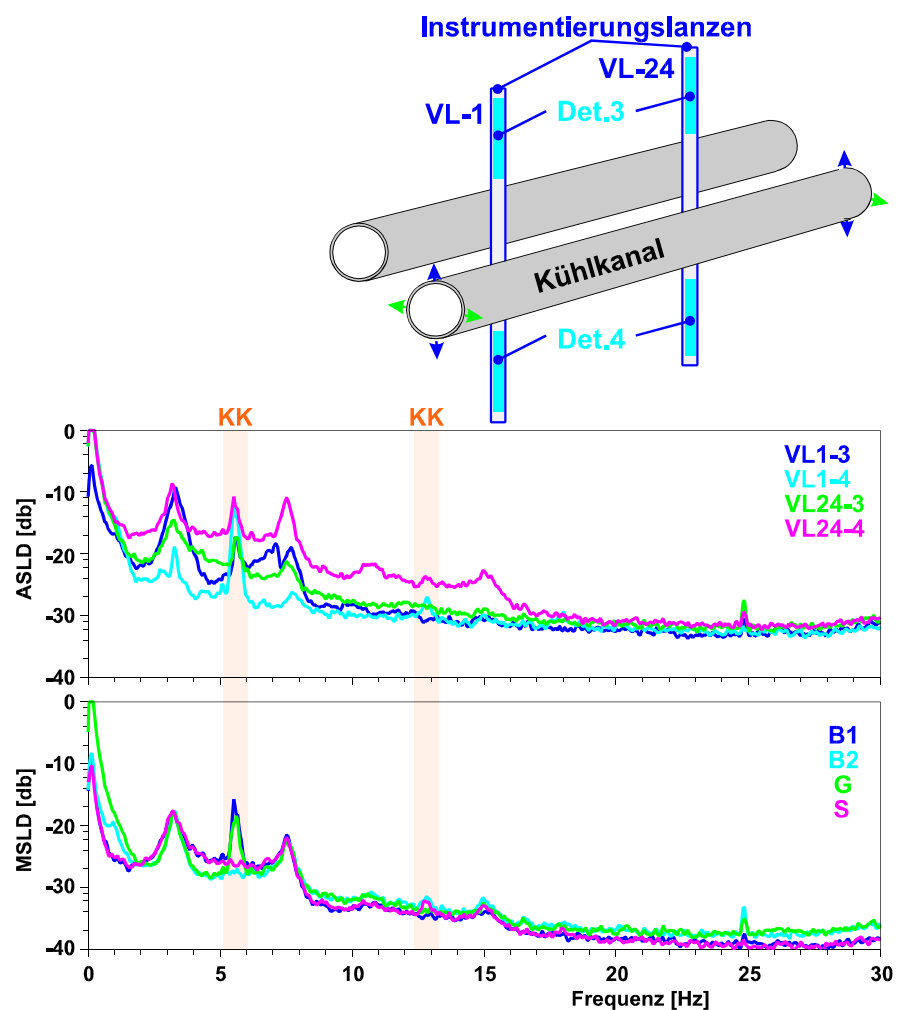


Bild 5.22: Separation der Kühlkanalschwingung aus Neutronenflußsignalen

der Neutronenflußaußenkammern bei gedrehter Meßebeine in dem Modenseparationsverfahren (Kapitel 2.5).

Die ASLD der Neutronenflußsignale aller vier Detektoren zeigen die aus den vorangegangenen Abschnitten bekannten Peaks, die auf thermohydraulische Einflüsse im Kühlkanal (unter 1 Hz), auf Schwingungen der Instrumentierungslanzen selbst (bei 3 Hz bis 4 Hz und zwischen 7 Hz und 8 Hz) und Bewegungen der Kühlkanäle (5,5 Hz, um 13 Hz) zurückzuführen sind.

Der gleichphasige Modus G separiert im Frequenzbereich bis 2 Hz die durch die thermohydraulischen Schwankungen des Kühlmittels verursachten Neutronenflußschwankungen.

Die Magnituden von Balkenschwingungsmodus B1 und gleichphasigem Modus G überwiegen bei der Eigenfrequenz der Kühlkanäle zwischen 5 Hz und 6 Hz die Magnituden der anderen Modi deutlich. Das ist ein klarer Hinweis auf kohärente Signalanteile bei dieser Frequenz in allen vier Meßstellen. Sie entstammen also aus gemeinsamen Signalquellen, hier den Kühlkanalschwingungen im gemeinsam sichtbaren Bereich aller vier Detektoren.

Der spektrale Leistungsanteil im gleichphasigen Modus G zwischen 5 Hz und 6 Hz, der oberhalb von B2 und S Modus sichtbar ist, entspricht dem kohärenten Signalanteil der von allen vier Detektoren gleichzeitig (in Phase) festgestellt wird. Als Ursache kommen die horizontalen Bewegungen der Kühlkanäle im gemeinsam sichtbaren Bereich in Frage. Durch die Kühlkanalschwingungen induzierte Druckschwankungen im Moderator würden ebenfalls gleichzeitig und in Phase detektiert werden. Es muß angenommen werden, daß beide Effekte zu diesem Peak beitragen.

Die Magnitude des Balkenschwingungsmodus B1 ist zwischen 5 Hz und 6 Hz deutlich größer als die der anderen Modi. In dem Balkenschwingungsmodus B2 und dem Schalenmodus S ist in diesem Frequenzbereich kein Peak zu erkennen. Das deutet auf eine gute Adaption des Modells an die wirkliche Phasenlage. In dem spektralen Leistungsanteil des Balkenschwingungsmodus B1, der die anderen deutlich überragt, werden die kohärenten Signalanteile zusammengefaßt, die in den SPN-Detektoren VL1-3 und VL24-4 sowie VL1-4 und VL24-3 jeweils unter 180 Grad Phasenversatz gemessen werden. Das sind die vertikalen Bewegungen der Kühlkanäle (Die Schwingungssignaturen wurden in Kapitel 5.3.1 interpretiert), im gemeinsam sichtbaren Bereich dieser SPN-Detektoren. Aufgrund der starken Neutronenflußgradienten kann davon ausgegangen werden, daß die räumlich unmittelbar benachbarten Kühlkanäle auf den Calandria-Positionen N05 und N06 (siehe Bild 5.20) die stärksten Signalanteile liefern.

Bei den Eigenfrequenzen der Instrumentierungslanzenschwingungen bei 3 Hz bis 4 Hz und zwischen 7 Hz und 8 Hz liegen alle Modi übereinander. Das ist der Fall, wenn die vier Neutronenflußsignale bei diesen Frequenzen nicht kohärent sind, und es sich bei der Ursache dieser Peaks um Schwingungen von zwei unterschiedlichen Bauteilen handelt.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst an einem Forschungsreaktor untersucht, wie sich mechanische Schwingungen in die Signale von Neutronenflußdetektoren mit unterschiedlichen Emittmaterialien abbilden und wie eine quantitative Bewertung der Schwingungsamplitude von Bauteilschwingungen anhand der Neutronenflußfluktuationen durchgeführt werden kann.

Die Schwingungen von Primärkreis Komponenten in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor der international hauptsächlich vertretenen Reaktortypen wurden mit Hilfe der Neutronenfluß-, Beschleunigungs- und Schwingwegsignalen untersucht. Dabei wurden ein Separationsverfahren angewandt, daß die spektralen Leistungsdichteanteile von vier Signalen nach ihrer Phasenlage in vier Moden neu ordnet. Der Vergleich von Ergebnissen aus baugleichen Anlagen einerseits, sowie zwischen Anlagen unterschiedlicher Leistungsgröße und unterschiedlicher Konstruktion andererseits, verdeutlicht die gute Übertragbarkeit auf verschiedene Reaktortypen und Reproduzierbarkeit der hier angewandten Analysetechnik. In dieser Arbeit werden erstmals Ergebnisse der Anwendung des Modenseparationsverfahrens auf Schwankungen der Reaktoreintrittsdrucksignale veröffentlicht. Besonders die gute Trennung der durch Hohlraumresonanzen verursachten Druckfluktuationen von den durch akustische stehende Wellen verursachten, in den einzelnen Primärkreisschleifen leicht unterschiedlichen Druckfluktuationen, ist bemerkenswert.

Körperschall- und Neutronenflußsignale aus vier Siedewasserreaktoranlagen, zwei Anlagen verschiedener Leistungsklassen und zwei baugleichen Anlagen, wurden mit dem Modenseparationsverfahren untersucht und miteinander verglichen. Die vorliegende Arbeit zeigt, daß durch die Anwendung der Modenseparation auf die In-Kern Neutronenflußsignale die Überwachung von Brennelementschwingungen und von Schwingungen der Instrumentierungslanzen auf übersichtliche Art möglich ist.

Die in Druck- und Siedewasserreaktoren erfolgreich eingesetzten Analysemethoden wurden in je einem schwerwassermoderierten Druckkesselreaktor und einem schwerwassermoderierten Druckröhrenreaktor auf ihre Anwendbarkeit zur Beobachtung von Bauteilschwingungen an Primärkreis Komponenten untersucht. Hierbei konnten mechanische Schwingungen der Reaktordruckbehälter, der Brennelemente und Instrumentierungslanzen in den Neutronenflußsignalen identifiziert werden. Für den schwerwassermoderierten Druckröhrenreaktor wird ein Verfahren vorgestellt, das die betriebsbegleitende Überwachung der mechanischen Integrität von Brennelementen, Kühlkanälen und Instrumentierungslanzen durch Analyse der Neutronenflußsignale ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit zeigt, daß die betriebsbegleitende Analyse der Schwingungen von Primärkreis Komponenten in den international hauptsächlich vertretenen Reaktortypen, unabhängig von den Bauarten und von den Leistungsklassen, geeignet ist, die mechanischen Bauteilschwingungen der Reaktordruckbehälter, Brennelemente und Instrumentierungslanzen voneinander zu separieren und gezielt zu überwachen.

Literaturverzeichnis

- /1/ J.A. Thie; Power Reactor Noise; American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, USA
- /2/ W. Seifritz, D. Stegemann; Reactor-Noise Analysis; At. Energy Rev., 9,1,129, (1971)
- /3/ P. Liewers; Rauschdiagnostik; Akademie-Verlag, Berlin 1985
- /4/ DIN 25475 Teil2; Schwingungsüberwachung zur frühzeitigen Erkennung von Änderungen im Schwingungsverhalten des Primärkreises; Deutsches Institut für Normung e.V. (Entw. 03/94)
- /5/ Kovacic, Jelislav, 1998 Nuclear Power Plants of the World, Nuke Database System, Milan Copic Nuclear Training Centre, Ljubljana, Slovenija, 1998,
- /6/ Informationskreis Kernenergie, Tulpenfeld 10, D-53113 Bonn,
- /7/ P. Gebureck; Untersuchung spezieller Neutronenflußdetektoren und ihre Anwendung im Siedewasserreaktor; Dissertation, Universität Hannover, 1979
- /8/ G.R. Keepin; Physics of Nuclear Kinetics; Massachusetts 1965
- /9/ B. Hellmich; Experimentelle Untersuchung zur energieabhängigen Kalibrierung von SPN-Detektoren; Diplomarbeit IKPH, 1998
- /10/ B. Hellmich, J. Fiedler, J. Runkel, D. Stegemann, G. Pór, D. Bódizs; The Influence of different SPN-Detector emitter materials to the results of neutron noise analysis; Proceedings of PHYSOR 2000, Pittsburg, USA, 2000
- /11/ J.C. Robinson, F. Shahrokhi and R.C. Kryter; Calculation of the Scale Factor for Inference of PWR Core Barrel Motion from Neutron Noise Spectral Density; Nuclear Technology,40,35-46,1978
- /12/ J.C. Robinson, F. Shahrokhi and R.C. Kryter; Quantification of Core Barrel Motion Using an Analitically Derived Scale Factor and Statistical Reactor Noise Descriptors; Nuclear Technology,40,47-51, 1978
- /13/ J. A. Thie; Core Motion Monitoring, Nuclear Technology Vol 45, 1979

- /14/ J.P. Thompson, G.R. Mc Coy and B.T. Lubin; Experimental Value of Percent Variation in Root-Mean-Square Ex-Core Detector Signal to the Core Barrel Amplitude Scale Factor; Nuclear Technology,48,122-127, 1980
- /15/ J. Runkel; Rauschanalyse in Druckwasserreaktoren; Dissertation, Universität Hannover, 1994
- /16/ Bienvenu & Kopp; Optimality of high resolution processing using the eigensystem approach; IEE Trans. On ASSP, No. 31
- /17/ L. Cai, G. D'Urso, C. Vincent, A. Trenty; Separation Between Vibratory Modes in Internal Structure Monitoring Domain; Proc. SMORN VII Vol. 1, OECD, 1996
- /18/ C.W. Mayo; Detailed Neutron Noise Analysis of PWR Internal Vibrations; Atomkernenergie, 29,9, 1977
- /19/ T.R. Kim, S.H. Jung, J.S. Joo, C.M. Sim; Korean Experience in Neutron Noise Monitoring of Nuclear Power Plant; Proceedings of SMORN VII, OECD, 1996
- /20/ H. Starke; Analyse des Schwingverhaltens von Kerneinbauten in Druckwasserreaktoren; Diplomarbeit, Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Hannover, 1994
- /21/ E. Laggiard, J. Fiedler, J. Runkel, H. Starke, D. Stegemann, B. Lukas and D. Sommer; Vibration measurements in PWR Obrigheim by Use of In-core Accelerometers; Progress in Nuclear Energy, Vol. 29, 1995
- /22/ Bendat, J.S., Piersol, A.G. : *Random Data* , 2nd Edition, Wiley Interscience, 1986
- /23/ D. Knödler, R. Ruf; Schwingungsuntersuchungen an den Kerneinbauten des KWO; Atomwirtschaft, November 1968
- /24/ M. Calcagno, F. Cioli; In-Service Monitoring of Core Structures and Reactor Internals by Neutron Noise Measurements; Euratom-ENEL Report C3.R1/09.70, Aug. 1970
- /25/ W. Bastl, D. Wach, W.H. Dio, W. Haas; Nachweis von Pendelbewegungen des Kernbehälters im Neutronenflußrauschen; Atomwirtschaft, Mai 1972
- /26/ V. Bauernfeind; Investigations on the Vibrative Excitation of PWR Pressure Vessel and Internals by Pressure Noise Analysis and Model Calculations; Progress in Nuclear Energy Vol. 1, Pergamon Press 1977

- /27/ KTA 3204; Reaktordruckbehälter-Einbauten, 1984
- /28/ E. Türkcan, J.B. Dragt; Borssele PWR noise: measurements, analysis and interpretation, Prog. Nucl. Energy, I, 293, 1977
- /29/ I. Pazit, J. Karlsson, N.S. Garis; Some Developments in Core-Barrel Vibration Diagnostics; Ann. Nucl. Energy, Vol. 25 No. 13, 1998
- /30/ D. Wach, R. Sunder; Improved PWR-Neutron Noise Interpretation Based on Detailed Vibration Analysis; Progress in Nuclear Energy, 1, 309-322, 1977
- /31/ J. Runkel, D. Stegemann; Vibration and Noise Analysis at the Primary Loop of Nuclear Power Plants; VGB Kraftwerkstechnik, 8, 655, 1989
- /32/ H. Stölben, H.-J. Wehling; Vibration Monitoring of Kraftwerk Union Pressurized Water Reactors; Nuclear Technology Vol. 80, 1988
- /33/ R. Sunder, M. Baleanu, K. Kieninger, A. Kolbasseff, W. Kuhn, H. Rösler; Experiences and Results with COMOS; Proceedings of SMORN VI, Gatlingburg, Tennessee, USA, 1991
- /34/ A. Husemann; Betriebsüberwachung von Leichtwasserreaktoren durch Rauschanalyse; Dissertation, Universität Hannover, 1994
- /35/ V. Bauernfeind; Vibration Monitoring of a Four-Loop PWR: Model-Investigations of the Sensitivity of the monitored Signals on Mechanical Failures; Progress in Nuclear Energy Vol. 21, Pergamon Press 1988
- /36/ V. Bauernfeind, B. Olma, R. Sunder, D. Wach; Bewertung und Untersuchungen von Schadenfrüherkennungsverfahren zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung am Primärkreis von Kernkraftwerken; GRS-A-1193, Feb. 1986
- /37/ E. Altstadt, F.-P. Weiss; Finite-element based vibration analysis of WWER-440 type reactors; Annals of Nuclear Energy 26, 1999
- /38/ P. Liewers, W. Schmitt, P. Schumann, F.-P. Weiss; Detection of Core Barrel Motion at WWER-440-Type Reactors; Progress in Nuclear Energy, 1988, Vol. 21
- /39/ I. Nagy and T. Katona; Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs; Progress in Nuclear Energy, 1985, Vol. 15

- /40/ G. Grunewald, K. Junghanss and P. Liewers; Investigation of Pressure Oscillations in a PWR Primary Circuit; Progress in Nuclear Energy, 1985, Vol. 15
- /41/ G. Por, E. Izsak and J Valko; Some Results of Noise Measurements in a PWR NPP; Progress in Nuclear Energy, 1985, Vol. 15
- /42/ U. Kunze, K. Meyer; Incore Reactor Noise Measurement at PWR's of VVER-Type and their Interpretation; Progress in Nuclear Energy, 1985, Vol. 15
- /43/ J.A. Muellens, J.A. Thie; Modeling and Diagnostic Techniques Applicable to the Analysis of Pressure Noise in Pressurized Water Reactors and Pressure-Sensing Systems; Progress in Nuclear Energy, 1985, Vol. 15
- /44/ E. Hollo, P. Siklossy, L. Turi, S. Ratkai; On-Line Diagnostic Method for Vibrational Surveillance of Paks NPP Primary Circuit Equipments; Proceedings of SMORN VI, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA
- /45/ A. Gutmann; Betriebsüberwachung von WWER-440 Druckwasserreaktoren mittels Rauschanalyse; Diplomarbeit am Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Hannover, 1995
- /46/ J. Valko, G. Por, T. Czibok, E. Tzsak, E. Hollo, P. Siklossy; Experiences with Noise Analysis at Paks Nuclear Power Plant; Progress in Nuclear Energy, 1985, Vol. 15
- /47/ R. Geilhausen, V. Reznik, S. Titov, H.-J. Wehling; PC-Based Vibration Monitoring in KOLA Nuclear Power Plant; System and Commissioning Results; 24th Informal Meeting on Reactor Noise, Oybin, June 23-25, 1993
- /48/ V.V. Bulavin, D.F. Gutsev, V.I. Pavelko; Some Results of Vibrations Analysis on the VVER 440 Type Reactor Vessel Top Head and on the Facilities of ist Primary Circuit Six Loops; Proceedings of SMORN VII, OECD, 1996
- /49/ T.R. Kim, S. Jung, J.Park, S. Choi; Reactor Internals Vibration Monitoring in Korean Nuclear Power Plant; Proceedings of Instrumentation & Control, 1996
- /50/ T.R. Kim, J.Park, J. Ryu, B. Koh, D. Lee, J. Runkel, J. Fiedler, P. Heidemann; Neutron Noise Monitoring in Korean Nuclear Power Plant; The 27th Informal Meeting on Reactor Noise, IMORN-27, November 18-20, 1997, Valencia, Spain

- /51/ A. Trenty; Operational Feedback on Internal Structure Vibration in 54 French PWRs during 300 Fuel Cycles; Proceedings of SMORN VII, OECD, 1996
- /52/ W. Seifritz; At-power reactor noise induced by fluctuations of the coolant flow; Atomkernenergie 16, 1970
- /53/ P. Gebureck, O.P. Singh, D. Stegemann; Experimental and Theoretical Noise Analysis Investigations in Boiling Water Reactors; Progress in Nuclear Energy Vol. 1, Perg. Press 1977
- /54/ J. Blázquez, F. Barrio, J. Ballestrín; Parameters of Reduced Order Model BWR Dynamics from Neutron Noise Analysis; Proceedings of the SMORN VI, Gatlinburg, USA, 1991
- /55/ V. Grondey, P. Gebureck, D. Stegemann; On-line-Erfassung und Auswertung von Core-Meßdaten in Leichtwasserreaktoren; Atomkernenergie-Kerntechnik 41, 195, 1982
- /56/ S. Kanemoto, M. Enomoto, Y. Ando, H. Namba, S. Ebata, A. Takagi, T. Hattori, N. Kitamura, A. Yoshizawa; Development of an On-line Reactor Stability Monitoring System in a Boiling Water Reactor; Prog. Nucl. Energy, 21, 745, 1988
- /57/ D. Wach; Ermittlung lokaler Dampfblasengeschwindigkeiten aus Rauschsignalen von Incore-Ionisationskammern; Atomwirtschaft, Dez. 1973
- /58/ D. Wach; Ein neues Meßmodell der Neutronenflußkreuzleistungsdichte zur Identifizierung von Rauschquellen in Leistungsreaktoren; Dissertation, 1976
- /59/ A. Stekelenburg, T. van der Hagen; Two-phase Flow Monitoring by Analysis of In-Core Neutron Detector Noise Signals; Ann. Nucl. Energy 20, 9, 1993
- /60/ K. Behringer, Lj. Kostic, W. Seifritz; Observation of In-core Instrument Tube Vibrations in a BWR by Evaluating Reactor Noise Data; Prog. Nucl. Energy Vol. 1, 183, 1977
- /61/ D. Fry, R. Kryter, M. Mathis, J. Mott, J. Robinson; Use of Neutron Noise to Detect BWR-4 In-core Instrument Tube Vibrations and Impacting; Nucl. Technol.43, 42, 1979
- /62/ J. Runkel, E. Laggiard, D. Stegemann, J. Fiedler, P. Heidemann, H. P. Mies, R. Oed, F.-P. Weiß, E. Altstadt; Application of Noise Analysis in two BWR Units of Nuclear Power Plants Gundremmingen; SMORN VII, OECD, 1996
- /63/ P. Heidemann; Diagnoseverfahren zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung in Siedewasserreaktoren; Dissertation, Universität Hannover, 2001

- /64/ A. Husemann, E. Laggiard, H.P. Mies, R. Oed, J. Runkel, D. Stegemann; BWR Vibration Measurements by In-core Neutron Noise Analysis; SMORN VI, Gatlinburg, USA, 1991
- /65/ D. Smidt; Reaktortechnik; G. Braun Karlsruhe, 1971
- /66/ Central Nuclear en Atucha; Comision Nacional de Energia Atomica, Av. Del Libertador 8250, 1429-Buenos Aires, Republica Argentina
- /67/ J. Pineyro, H. Lescano, E.Laggiard, L. Wenzels, A. Pereyra, J. Sidelnik, R. Perez; Monitoring of the Internals in the PHWR ATUCHA I by Means of Neutron Noise Analysis; Proceedings of SMORN VI, Gatlinburg, Tennessee, USA, May 1991
- /68/ K. J. Serdula, M. Beaudet; On-Power Verification of the Dynamic Response of Self-Powered In-Core Detectors; SMORN VII, OECD, 1996
- /69/ K. J. Serdula; Canadian Experience in the Area of Reactor Noise, Annals of Nuclear Energy, Vol. 2, pp.287-300, Pergamon Press 1975
- /70/ V.Lescano, E. Laggiard, J.Pineyro, L.Wentzeis, M. Guevara, J.Vinez; Neutron Noise Measurements and Spectra Characterization in the 600 MW Candu PHWR Embalse; IMORN 24, Oybin, Germany, 1993
- /71/ O. Glöckler, M.V. Tulett; Application of Reactor Noise Analysis in the CANDU Reactors of ONTARIO HYDRO, Progress in Nuclear Energy, Vol. 29, No. 3 / 4 , 1995
- /72/ J.Fiedler, J. Runkel, D.Stegemann, E.Laggiard, V.H.Lescano, M.Guevara, C.Moreno; Vibration Measurement in the Argentine CANDU Reactor EMBALSE by Use of Noise Analysis, Proceedings of SMORN VII, OECD, 1996
- /73/ E. Laggiard, J. Runkel, D. Stegemann; One-dimensional Bimodal Model of Vibration and Impacting of Instrument Tubes in a Boiling Water Reactor; Nucl. Sci. and Eng. 115, 62, 1993
- /74/ J. Sujatt, E. Laggiard; Estimación de frecuencias naturales de vibración de unidades verticales detectoras de flujo(VFD) de la Central Nuclear Embalse; CNEA 1016/92
- /75/ O. Glöckler, D. Cooke, G. Czuppon, K. Kapoor; Reactor Noise Analysis Applications in Ontario Hydro: A Statistical Technique used for Systems Surveillance; CANDU Systems & Equipment Surveillance Programs COG Workshop, Toronto, November 1996

- /76/ E. Hassan, S. Makarem A. Hussein; Moderator circulation in CANDU reactors: an alternative approach for the tube matrixsimulation; Nuclear Technology, Vol. 88, Dec. 1989
- /77/ A.D. Lane, I.E. Oldaker, C.F. Forrest, F. Stern, V.C. Orpen; The measurement and prediction of vibrations in CANDU-PHW fuel and channel assemblies: B.N.E.S. Vibration in Nuclear Plant, Keswick, U.K. May 1978
- /78/ Introductory Remarks; W.B. Stewart; COG surveillance workshop, Toronto, Nov, 4 & 5, 1996
- /79/ G.J. Field; Problems caused by Irradiation Deformation in CANDU Reactors; Journal of Nuclear Materials 159 (1988) 3-11
- /80/ W.G. Morison; The CANDU nuclear power system; Kerntechnik 52 (1988), Nr. 2
- /81/ B. A. W. Smith, D. D. Derksen, M. Yetisir; Modelling of reactor core components to support noise analysis; COG surveillance workshop, Toronto, Nov, 4 & 5, 1996

Lebenslauf:

Persönliches

Jürgen Fiedler
geboren am 23.02.1964 in Hameln
als Sohn von Ernst Günther Fiedler und Gretel Fiedler, geb. Schmidt
verheiratet mit Heidrun Fiedler, zwei Kinder

Schulbildung:

1970 - 1974 Grundschule Bad Münder
1974 - 1979 Kreisrealschule Bad Münder
1979 - 1983 Schiller-Gymnasium, Hameln
Abitur am 13.05.1983

Grundwehrdienst:

1983 - 1984 beim Heer in Hildesheim

Studium:

1984 - 1992 Physikstudium (Dipl.) an der Universität Hannover
Diplomzeugnis am 04.06.1992

Berufliche Tätigkeit:

1992 - 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kerntechnik
und Zerstörungsfreie Prüfverfahren der Universität Hannover

seit 2001 Geschäftsführer der Kerntechnik und Anlagendiagnostik Han-
nover GmbH
