

**Diagnoseverfahren zur
Schwingungs- und Körperschallüberwachung
in Siedewasserreaktoren**

Von dem Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Peter Heidemann

geboren am 09.01.1966 in Münster

2001

Tag der Promotion: 09.02.2001

Prüfungskommission:

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. H.-H. Gatzert

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

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. M. Rautenberg

Abstract

Durch Analyse der Signale der Standardreaktorinstrumentierung lassen sich ohne Beeinträchtigung des laufenden Kraftwerkbetriebes Informationen über die mechanische Integrität der Anlage und die Güte der Produktionsprozesse gewinnen. Die vorliegende Arbeit stellt die Möglichkeiten der Schwingungs- und Körperschallüberwachung in Kernkraftwerken anhand der Anwendung in zwei baugleichen Siedewasserreaktoren dar. Es wird die Entwicklung und Qualifikation eines Meßverfahrens vorgestellt, welches darauf basiert, einen Beschleunigungsaufnehmer bei Leistungsbetrieb, anstelle der Fahrkammer innerhalb der Fahrkammersysteme von Siedewasserreaktoren, einzusetzen. Hierdurch können an jeder beliebigen Höhenposition der Instrumentierungslanzen der Neutronenflußdetektoren Beschleunigungsmessungen innerhalb des Reaktordruckbehälters durchgeführt werden.

Der Miniaturbeschleunigungsaufnehmer wurde bei Leistungsbetrieb temporär über die Fahrkammersysteme in die Druckbehälter zweier Siedewasserreaktoren (1300 MW_{el}) eingebracht. Die Ergebnisse der mit einem Detektorprototyp in zwei Siedewasserreaktoren durchgeführten Beschleunigungsmessungen zeigen die Möglichkeiten des Verfahrens zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung der Reaktoreinbauten auf.

Niederfrequente Schwingungen der Instrumentierungslanzen wurden innerhalb des Reaktorkerns gemessen und detailliert in ihrer Schwingungsform, Schwingfrequenz und ihrer absoluten Amplitude analysiert. Das Verfahren erweitert somit die Möglichkeiten der Schwingungsuntersuchungen der Reaktoreinbauten.

Einzelschallereignisse, die z.B. durch Fretting oder leichtes Anschlagen zwischen den Einzelrohren der Instrumentierungslanzen oder anderer Strukturteile entstehen, können detektiert und ihr Entstehungsort innerhalb des Reaktordruckbehälters in radialer und axialer Richtung eingegrenzt werden. Das Verfahren ermöglicht hierdurch die Überwachung des mechanischen Zustandes von Reaktorkomponenten mit hoher Empfindlichkeit und Ortsauflösung und somit auch den Wirksamkeitsnachweis durchgeführter Reparaturmaßnahmen.

Stichworte: Siedewasserreaktor, Schwingungsdiagnose, Körperschallüberwachung

Abstract

By analysing the signals of the standard reactor instrumentation several information about the mechanical integrity of the reactor components and about the quality of the production process can be gathered without any interference of the power production. In this respect the following work presents the possibilities of vibration analysis and loose parts monitoring at the example of two boiling water reactors.

The development and qualification of a measurement system is presented which is based on the idea of inserting an accelerometer inside the Travelling Incore Probe System of a boiling water reactor. Thus enables acceleration measurement at any axial position of the neutron flux instrumentation strings inside the reactor pressure vessel and inside of the reactor core.

A prototype accelerometer has been inserted temporarily in the TIP-systems of two boiling water reactors (1300 MW el) during full power operation. The results of these measurements demonstrate the possibilities of the new measurement system for vibration analysis and loose parts monitoring inside the reactor pressure vessel. The vibration of instrumentation tubes which have been measured directly inside the reactor core were analysed detailed in mode, frequency and amplitude. By this, the new measurement system provides additional possibilities for vibration monitoring of the reactor internals.

Noise emission, which for example originated through fretting or slight impacting between the tubes of the instrumentation strings or between other core internals can be detected and the place of impacting can be estimated in radial and axial position.

The acceleration measurements inside the TIP-system enable the supervision of the mechanical constitution of the reactor internals with a high resolution in radial and axial direction.

Key-words: boiling water reactor, vibration monitoring, loose part monitoring

Vorwort

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

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts, die mir bei der Durchführung der Arbeit behilflich waren. Ebenso bedanke ich mich beim Betriebspersonal der Kernkraftwerke Gundremmingen für ihre umfangreiche Unterstützung zur Vorbereitung und bei der Durchführung der Messungen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	III
1. Einleitung	1
2. Standardverfahren zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung in Siedewasserreaktoren	3
2.1. Untersuchte Siedewasserreaktoren	3
2.2. Verwendete Instrumentierung	3
2.2.1. Druckbehälterinstrumentierung	3
2.2.2. Kerninstrumentierung	5
2.3. Körperschall- und Schwingungsanalyse	10
2.3.1. Zeitbereichsanalyse	10
2.3.2. Anwendungsbeispiel Körperschallüberwachung	12
2.3.3. Frequenzbereichsanalyse	13
2.3.4. Anwendungsbeispiel Schwingungsüberwachung	14
2.3.5. Datenerfassung	18
2.4. Zustandsüberwachung von Kerneinbauten durch Rauschanalyse von Neutronenflußsignalen	19
3. Entwicklung eines Meßverfahrens für In-Kern Beschleunigungsmessungen in Fahrkammersystemen von Siedewasserreaktoren	28
3.1. Zielsetzung des Meßverfahrens	29
3.2. Auswahl und Modifikation des Detektorprototyps	29
3.3. Strahlungsdosimetrische Berechnung des Verfahrens	32
3.4. Funktionsüberprüfung des Adaptionselementes und Nachweis der praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens	42
4. Untersuchungen zum Schwingungs- und Schallübertragungsverhalten am Modell einer Instrumentierungslanze	54
4.1. Schwingungsuntersuchungen	55
4.2. Körperschalluntersuchungen	56
4.3. Schlußfolgerungen zur Interpretation der Messungen aus dem Kraftwerk	62

5. Beschleunigungsmessungen mit dem Detektorprototyp in Siedewasserreaktoren	63
5.1. Vorbereitung der Fahrkammersysteme	63
5.2. Schwingungsuntersuchungen der Instrumentierungslanzen	66
5.2.1 Instrumentierungslanzen mit ausgeprägter Eigenschwingung	66
5.2.2. Kombinierte Lanzen/Brennelementschwingungen	71
5.2.3. Instrumentierungslanzen mit auffälligem Schwingungsverhalten	74
5.2.4. Schwingungsübertragung zwischen den Instrumentierungslanzen	77
5.2.5. Übertragungsfaktoren zur Quantifizierung von Schwingungsamplituden aus Signalen der Neutronenflußinstrumentierung	78
5.2.6. Verhalten des Detektors im direkten Strahlungsfeld des Kerns	81
5.3. Körperschallmessungen in Instrumentierungslanzen	83
5.3.1. Zusammenstellung der Ergebnisse von Körperschallmessungen in den Instrumentierungslanzen eines Reaktorblockes	83
5.3.2. Detaillierte Untersuchung einzelner Instrumentierungslanzen	86
5.3.3. Nachweis der Wirksamkeit von Instandhaltungsmaßnahmen	88
5.4. Erfahrungen aus dem Einsatz des Verfahrens	91
6. Entwicklungspotential des Verfahrens	93
7. Zusammenfassung	94
Literaturverzeichnis	96

Abkürzungen und Formelzeichen

a Abkürzungen

A02, A03	Absolutwegaufnehmer
AC	Wechselstrom
ADC	Analog-Digital-Konverter
AKF	Autokorrelationsfunktion
ASLD	Autospektrale Leistungsdichte
BA	Beschleunigungsaufnehmer
BE	Brennelement
BEZ	Brennelementzyklus
CA-607	Beschleunigungsaufnehmer für Einsatz im Fahrkammersystem
CAX, CAY	Meßachsen des Beschleunigungsaufnehmers CA-607
Coh	Kohärenz
DC	Gleichstrom
Det.	Detektor
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
Eb	Ebene
FFT	Fast Fourier-Transformation
FKR	Fahrkammerrohr
GE	General Electrics
HF	Hochfrequenz
KFMR	Kernflußmeßgehäuserohr
KGB	Kernkraftwerke Gundremmingen Betriebsgesellschaft mbH
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
KP	Kernposition
KSLD	Kreuzspektrale Leistungsdichte
KÜS	Körperschallüberwachungssystem
KWU	Kraftwerks Union
LVD	Leistungsverteilungsdetektor
M01 - M12	Körperschallaufnehmer
NASLD	Normierte Autospektrale Leistungsdichte

RDB	Reaktordruckbehälter
RMS	Root Mean Square Value
RW	Relativwegaufnehmer
SAR	Steuerstabantriebsraum
SF	Skalierungsfaktor
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
YU10/YU80	Umwälzpumpen
z.B.	zum Beispiel

b Formelzeichen

ASLD (f_1)	Peakamplitude bei der Frequenz (f_1)
ASLD _u (f_1)	Untergrundhöhe
a	Beschleunigung
D	Energiedosis
F_g	Grenzfrequenz
$F(j\omega)$	Fourier-Transformierte
f	Frequenz
f_a	Abtastfrequenz
g	Gravitationskonstante
g	Index für den Nuklidgrundzustand
j	$\sqrt{-1}$
m	Masse
m	Index für angeregten Nuklidzustand
N	Anzahl, Teilchenzahl
n	Laufvariabel
P	Strahlungsleistung
Q	Qualitätsfaktor
R	Reaktionsrate
R _{xx}	Autokorrelationsfunktion (AKF)
R _{xy}	Kreuzkorrelationsfunktion (KKF)

RMS_n	Neutronenflußschwankung
$RMS_{x,y}$	Schwingungsamplitude
r	Radius, Abstand
S	Aktivität
s	Schwingweg
T, t	Zeitpunkte
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
T_a	Abtastintervall
V	Verstärkungsfaktor
W_D	Dampfblasengeschwindigkeit
$X(\omega)$	Fouriertransformierte
$X^*(\omega)$	Konjugiert komplex Fouriertransformierte
\bar{x}	Zeitmittelwert
\bar{x}^2	quadratischer Mittelwert
$x(t), y(t)$	Zeitreihen, Momentanwerte
β_2	Kurtosiswert
γ	Kohärenz
$\Delta(f_1)$	Peakbreite auf halber Höhe der Maximalamplitude
$\Delta(f_u)$	Peakbreite auf Untergrundhöhe
ΔW	Absorbierte Strahlungsenergie
ΔZ_d	Detektorabstand
λ	Zerfallszeitkonstante
σ	Standardabweichung
σ	Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen, Reaktionsrate
τ	zeitliche Verschiebung
Φ	Neutronenfluß
φ	Phase
ω	Kreisfrequenz
*	Index für angeregten Nuklidzustand

1. Einleitung

Die Optimierung der Instandhaltung hat einen wesentlichen Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit eines Kernkraftwerkes, da sich das Produktionsergebnis durch eine höhere Verfügbarkeit der Anlagen verbessert und gleichzeitig die Betriebskosten durch Reduktion des Aufwandes für Wartung und Reparatur sinken. Aus diesen Gründen wird es im Rahmen technischer Revisionen angestrebt, allgemeine fristenmäßige Wartungen durch gezielte zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahmen zu ersetzen. Hierzu werden im Anlagenbetrieb Informationen über die Integrität der Anlagenkomponenten und die Betriebsprozesse gewonnen und anschließend bei Stillstand der Anlage nur die Komponenten gewartet und überholt, bei denen sich mögliche Anzeichen für die Notwendigkeit einer Instandhaltungsmaßnahme gezeigt haben.

Durch die Überprüfung der Komponenten während des laufenden Anlagenbetriebes lassen sich zum einen längere Wartungsintervalle erreichen, zum anderen werden die Zeiten für die Fehlersuche reduziert oder in die Betriebsphase des Kernkraftwerks verlagert. Zusätzlich ergeben sich durch die bessere Revisionsvorbereitung kürzere Reparaturzeiten. Durch die hohen Sicherheitsanforderungen kerntechnischer Anlagen darf durch diese Maßnahmen die Qualität der Instandhaltung und damit die Anlagenintegrität und die Prozeßqualität nicht beeinträchtigt werden.

In welchem Umfang die von zeitlich festgelegten Wartungsintervallen vorgegebenen Revisionen durch zustandsorientierte Instandhaltungen ersetzt werden können, hängt wesentlich vom Informationsstand über den aktuellen Anlagenzustand ab. Je detaillierter und frühzeitiger die Informationen über eine notwendige Instandhaltungsmaßnahme vorliegen, desto gezielter kann die Maßnahme vorbereitet und durchgeführt werden. Besonders exakte Informationen sind erforderlich, um die Dringlichkeit einer notwendigen Instandhaltungsmaßnahme einzuschätzen. Hierdurch kann eine Reparatur eventuell verschoben und im Zeitraum eines planmäßig anstehenden Anlagenstillstandes durchgeführt werden.

Ein bewährtes Verfahren, durch das sich mit relativ geringem Aufwand Informationen über den Zustand der Anlage bzw. die Güte der Betriebsprozesse gewinnen lassen, ist die Rauschanalyse. Informationen über die Integrität von Bauteilen und über Betriebsparameter der Anlage werden hierbei aus den Signalen der Standardbetriebsinstrumentierung extrahiert und können so zur Schwingungs- und zur Prozeßüberwachung sowie zur Funktionsüberwachung der Meßwertnehmer und Signalverarbeitungsketten eingesetzt werden. Eine auf Rauschanalysen basierende Schwingungsüberwachung ermöglicht es, Veränderungen der Bauteilsteifigkeiten bereits in ihrer Entstehungsphase anhand der Veränderung des Schwingungszustandes zu erkennen. Die Rauschanalyse nutzt die Auswirkungen der Schwingung auf die Meßgrößen der für die Untersuchung verwendeten Detektoren.

Ein anderer Ansatz zur Detektion von Bauteilanomalien ist die akustische Überwachung der Großkomponenten wie z.B. dem Reaktordruckbehälter. Lose Bauteile, die z.B. durch ein vergrößertes

Lagerungsspiel an andere Anlagenteile anschlagen, werden durch die hierbei verursachten Schallwellen identifiziert. Fortschreitende Schäden durch Anschlagvorgänge können so vermieden werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten der Schwingungs- und Körperschallüberwachung und deren Anwendung in zwei baugleichen Siedewasserreaktoren aufgezeigt. Der Stand der Technik wird anhand der Analyse der Schwingungen des Reaktordruckbehälters (RDB) und der Kerneinbauten exemplarisch dargestellt.

Anschließend wird die Entwicklung und Qualifikation eines Meßverfahrens vorgestellt, welches darauf basiert, einen Beschleunigungsaufnehmer bei Leistungsbetrieb kurzzeitig innerhalb der Instrumentierungslanzen der Neutronenflußdetektoren zu positionieren und wieder zu entnehmen. Aufbauend auf einem bestehenden biaxialen Miniaturbeschleunigungsaufnehmer, der für einen zeitlich begrenzten Einsatz in radioaktiven Umgebungen und bei hohen Temperaturen geeignet ist, wurde ein Detektor entwickelt, der anstelle der Fahrkammer innerhalb der Fahrkammersysteme der Siedewasserreaktoren eingesetzt werden kann. Hierdurch können an jeder Höhenposition der Instrumentierungslanzen Beschleunigungsmessungen innerhalb des Reaktordruckbehälters durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der mit dem Detektorprototyp in zwei Siedewasserreaktoren durchgeführten Beschleunigungsmessungen zeigen die Möglichkeiten des Verfahrens auf. Schwingungen von Kerneinbauten werden detailliert in ihrer Schwingungsform, Schwingfrequenz und ihrer absoluten Amplitude analysiert. Das Verfahren erweitert somit die Möglichkeiten der Schwingungsuntersuchungen der Reaktoreinbauten.

Durch die Messungen innerhalb des Reaktordruckbehälters lassen sich Einzelschallereignisse direkt im Bereich der Anschlagposition messen. Das Verfahren hat hierdurch bezüglich der Detektion von Einzelschallereignissen eine hohe Empfindlichkeit und Ortsauflösung. Es lassen sich auch Bauteilberührungen detektieren, deren Intensität zu gering ist, um sie außerhalb des Druckbehälters zu registrieren. Das neue Verfahren bietet durch die Verschieblichkeit des Detektors auch die Möglichkeit zur Lokalisierung der Höhenlage eventueller Anschlagpositionen.

Abschließend wird durch Beschleunigungsmessungen innerhalb des Reaktordruckbehälters der Nachweis der Wirksamkeit durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen anhand der drastischen Reduktion zuvor detektierter Anschlagvorgänge erbracht.

2. Standardverfahren zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung in Siedewasserreaktoren

Kerntechnische Anlagen sind mit einer umfangreichen Instrumentierung ausgestattet, die der Überwachung und Regelung der Anlagenparameter und des Produktionsprozesses dient. Zusätzlich werden automatisierte Überwachungssysteme und regelmäßig wiederkehrende Untersuchungen eingesetzt, um eventuelle Veränderungen an Bauteilen der Anlage frühzeitig zu erkennen. Hierzu wird eine Körperschallüberwachung des Reaktordruckbehälters und eine Schwingungsüberwachung der Druckbehältereinbauten, durch Rauschanalyse der Signale der Reaktorinstrumentierung, eingesetzt. Der Stand der Technik von Schwingungs- und Körperschalluntersuchungen in Siedewasserreaktoren wird im folgenden anhand von Messungen aus den Kernkraftwerken Gundremmingen dargestellt.

2.1. Untersuchte Siedewasserreaktoren

Am Standort der Kernkraftwerke Gundremmingen werden in der Nähe von Ulm zwei baugleiche Siedewasserreaktoren der KWU Baulinie 72 betrieben. Beide Reaktorblöcke können jeweils eine thermische Leistung von 3840 MW produzieren. Das Kühlmittel (leichtes Wasser) wird bei einem Druck von ca. 70 bar von acht internen Zwangsumwälzpumpen durch den Reaktorkern gepumpt und dort teilweise verdampft. Der Dampf durchströmt im oberen Teil des Reaktordruckbehälters (RDB) den Dampf/Wasserabscheider und den Dampftrockner (Bild 2.1) und wird anschließend über die Frischdampfleitungen direkt der Turbine zugeführt. Betreiber der Anlagen ist die Kernkraftwerke Gundremmingen Betriebsgesellschaft mbH (KGB) [1, 2].

2.2. Verwendete Instrumentierung

Für die im folgenden dargestellten Untersuchungen wurden Signale der Betriebsinstrumentierung der Reaktoren, speziell von Detektoren der Druckbehälter- und der Kerninstrumentierung, verwendet.

2.2.1. Druckbehälterinstrumentierung

Der Reaktordruckbehälter ist außen mit 12 Beschleunigungsaufnehmern des Körperschallüberwachungssystems instrumentiert (Bild 2.1, Ebenen A, C und D). Eventuell im Reaktordruckbehälter stattfindende Anschlagvorgänge loser Teile können über die von ihnen verursachten Einzelschallergebnisse detektiert werden. Zusätzlich bilden sich die Schwingungen der Großkomponenten im niederfrequenten Bereich in den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer ab. Am RDB-Deckelflansch sind drei Absolutwegaufnehmer angebracht, die ursprünglich zur Sonderinstrumentierung des RDB für Inbetriebsetzungsmessungen gehörten.

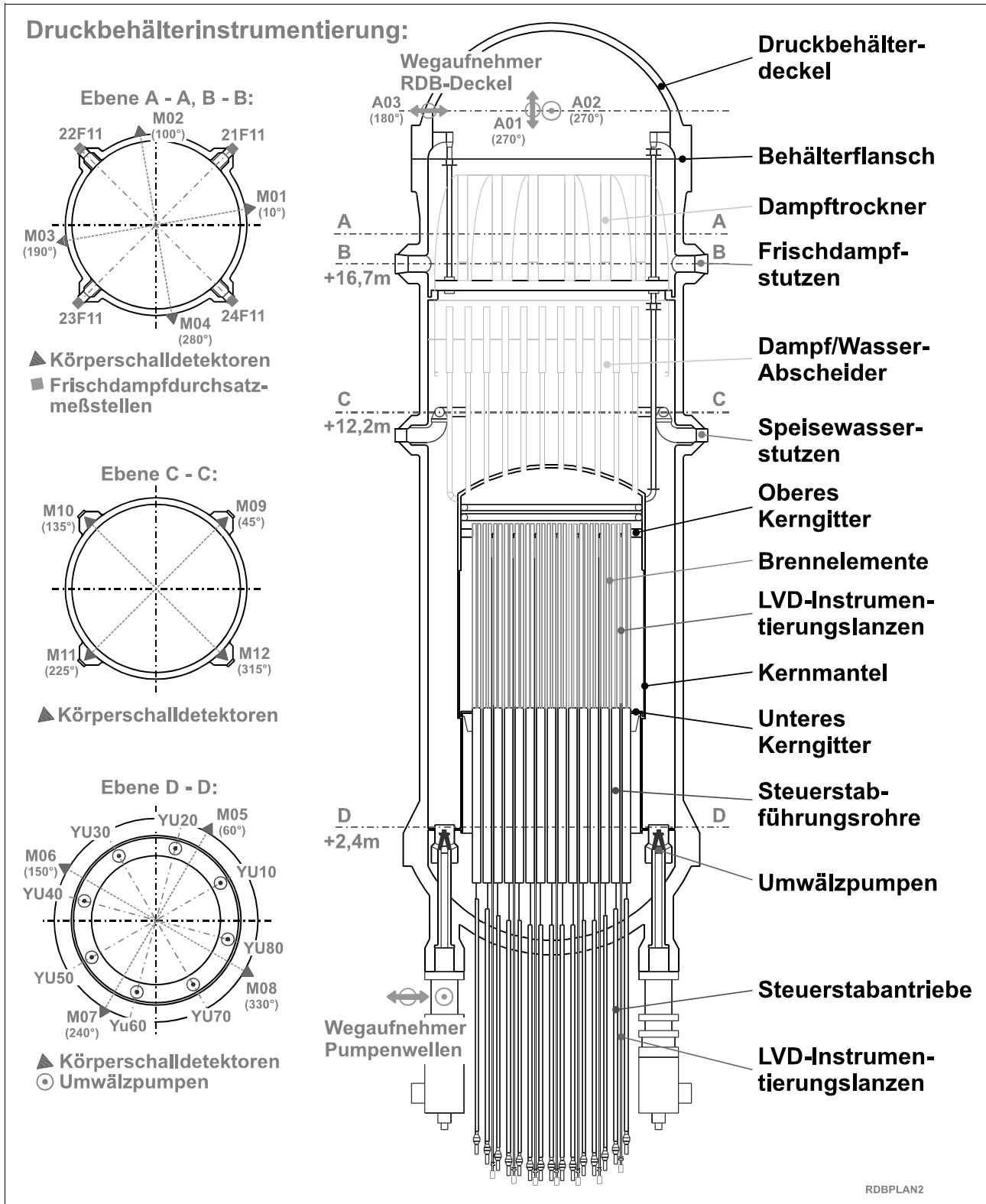


Bild 2.1: Aufbau und Instrumentierung des Reaktordruckbehälters (Block B)

Neben vier Durchflußmeßstellen in den Frischdampfleitungen (Bild 2.1, Ebene B) besteht die thermohydraulische Instrumentierung des RDB hauptsächlich aus Druckmeßstellen, die der Überwachung des Reaktordruckes, des Reaktorfüllstandes sowie diverser Differenzdrücke dienen.

Der Block C der Kernkraftwerke Gundremmingen ist gegenüber Block B baugleich, aber im wesentlichen spiegelbildlich angeordnet. Auf eine gesonderte Darstellung der Instrumentierung des Block C wird hier deshalb verzichtet.

2.2.2. Kerninstrumentierung

Die Kerninstrumentierung dient der Überwachung des zeitlichen Verlaufs und der räumlichen Verteilung der im Reaktor erzeugten thermischen Leistung. Der zur thermischen Leistung proportionale Neutronenfluß wird hierfür durch 176 Miniaturspaltkammern direkt im Kern gemessen. Diese fest installierten Neutronenflußdetektoren des Leistungsverteilungsdetektorsystems (LVD-System) sind verteilt in 44 Instrumentierungslanzen, auf jeweils vier Ebenen unterschiedlicher Kernhöhe, zwischen den Brennelementkästen angeordnet (Bild 2.2).

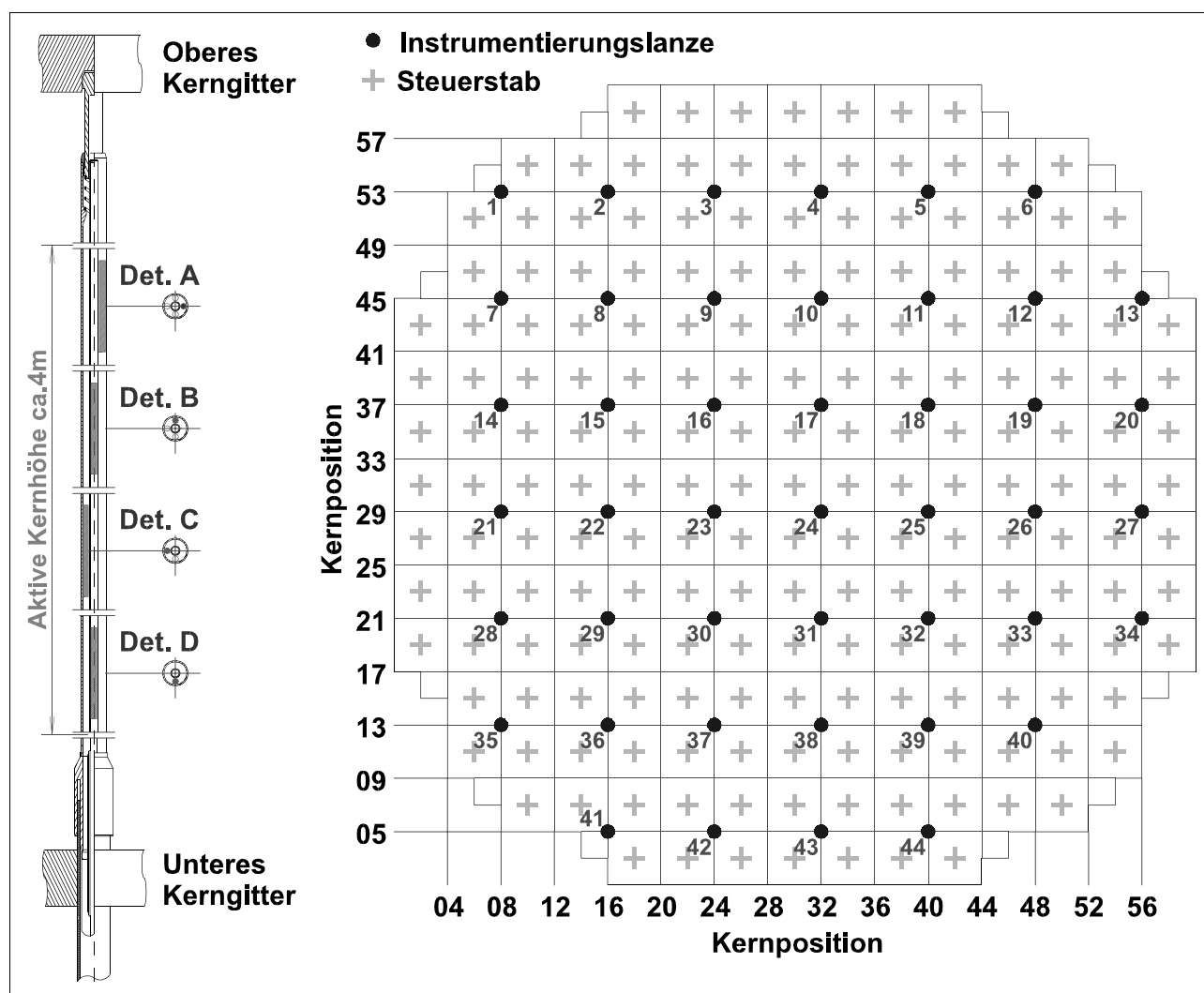


Bild 2.2: Kerninstrumentierung des Block B der Kernkraftwerke Gundremmingen

Jeweils vier Neutronenflußdetektoren sind in einer Instrumentierungslanze zusammengefaßt. Eine Lanze besteht im Kernbereich aus zwei konzentrisch angeordneten Rohren, dem drucklosen Hüllrohr außen und dem druckdichten Fahrkammerrohr innen (Bild 2.3). Im Ringspalt zwischen Fahrkammerrohr und Hüllrohr sind, jeweils um 90° versetzt und in einem Abstand von ca. 928 mm zueinander, die vier Spaltkammern positioniert. Das Hüllrohr ist im Bereich des Reaktorkerns mit Bohrungen versehen. Hierdurch wird der Ringspalt zwischen Hüllrohr und Fahrkammerrohr mit Wasser durchströmt und eine Kühlung der Detektoren ermöglicht.

Das obere Ende der Instrumentierungslanze bildet ein Zentrierstift, der innerhalb des Hüllrohres geführt, durch eine Feder beim Aufsetzen des oberen Kerngitters in eine Vertiefung einrastet und so die Lanzenspitze fixiert. Im unteren Kerngitter wird die Lanze über die LVD-Lanzensmanschette in einem Führungsrohr, dem Kernflußmeßgehäuserohr (KFMR), radial geführt. Das KFMR besteht aus zwei Teilen. Der obere Rohrabschnitt ist im unteren Kerngitter befestigt und über eine Steckverbindung auf dem unteren Abschnitt, dem Abschlußrohr, aufgesteckt. Die Lanze wird durch das Abschlußrohr, welches über den Kernflußmeßgehäuserohrstutzen mit dem RDB-Boden verschweißt ist, aus dem Reaktordruckbehälter herausgeführt.

Etwa 5 m unter dem Reaktordruckbehälter endet das KFMR mit einem Abschlußflansch, durch den die Lanze radial und axial fixiert wird und in dem sie über einen konischen Dichtsitz gegen das Kernflußmeßgehäuserohr abgedichtet ist. Die keramisch isolierten Metallmantelkabel der Miniaturspaltkammern werden im Ringspalt zwischen Hüllrohr und Fahrkammerrohr zum Abschlußflansch geführt. Hier sind die Detektorkabel in einem Durchführungsstopfen druckdicht eingelötet. Dieses Dichtungselement gewährleistet die Abdichtung des Hüllrohres gegen das Fahrkammerrohr und die druckdichte Durchführung der vier Signalkabel.

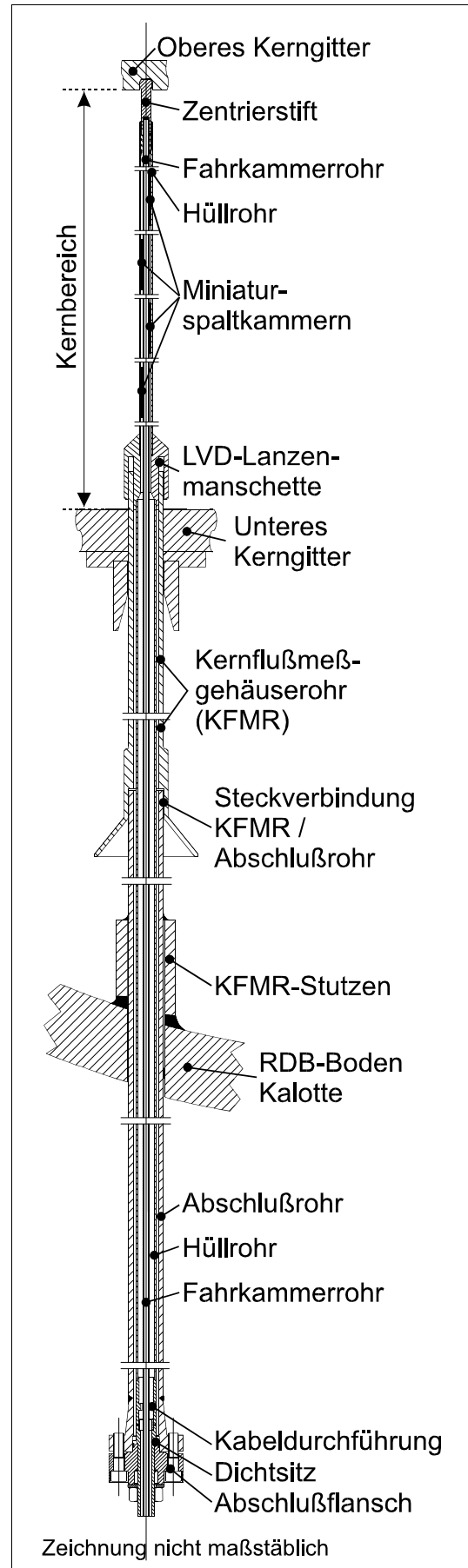


Bild 2.3: Instrumentierungslanze in Einbaulage

Die Spaltkammern bestehen aus zwei konzentrisch angeordneten Elektroden, die durch einen Gasraum getrennt sind. Die innere Elektrode ist, zum Nachweis auftreffender Neutronen, mit einer dünnen Schicht aus spaltbarem Material beschichtet. Die aus dieser Schicht austretenden Spaltbruchstücke gelangen in den Gasraum, in dem Wechselwirkungen der elektrisch geladenen Spaltbruchstücke mit den Gasatomen zur Bildung von Ionenpaaren führen. Durch die zwischen den Elektroden anliegende Versorgungsspannung werden die Ladungen getrennt und erzeugen elektrische Impulse, deren Impulsrate dem Neutronenfluß proportional ist. Die Betriebsspannung wird so gewählt, daß sie groß genug ist, um eine Rekombination der Ionenpaare zu verhindern, aber noch unterhalb der Grenze bleibt, ab der die transportierten Ladungsträger durch die Beschleunigung im elektrischen Feld soviel Energie aufnehmen, daß sie ihrerseits im Gas Ionenpaare bilden (Elektronenmultiplikation). Der Bereich der Betriebsspannung wird als Sättigungsbereich oder Kammerplateau bezeichnet. Je nach Neutronenflußdichte werden die Impulse entweder bei Anfahren des Reaktors über einen Kondensator als Impuls abgenommen (Impulsmodus) oder bei Leistungsbetrieb direkt gemessen (Strommodus) [3, 4, 5]. In den beiden hier untersuchten Siedewasserreaktoren werden Spaltkammertypen vom Typ MNK61 und MBK61 (KWU) sowie vom Typ NA-300 (GE/Reuter Stokes) eingesetzt. Der Außendurchmesser eines Leistungsverteilerdetektors (LVD) beträgt 6 mm und die Länge 94 mm.

Das im Zentrum der Instrumentierungslanzen verlaufende Fahrkammerrohr dient als Führungsrohr für einen verschieblichen Neutronenflußdetektor. Diese Fahrkammer wird jedoch nicht zur kontinuierlichen Flußdichtemessung, sondern lediglich kurzzeitig eingesetzt, um die einem Abbrand unterliegenden LVDs während des Betriebes zu kalibrieren oder die axiale Leistungsdichteverteilung möglichst exakt zu bestimmen [4, 5, 6]. Für die Messungen wird die Fahrkammer vom Fahrkammerantriebsraum über das Fahrkammersystem in den Kern eingeschoben (Bild 2.4).

Der Vorschub wird über das Signalkabel vom Antrieb der Kabeltrommel auf den Detektor aufgebracht. Das Antriebsmoment des Getriebemotors wird über eine Lamellenkupplung mit einstellbarer Drehmomentübertragung auf etwa $5/6$ des Umfangs der Kabeltrommel über einen eng anliegenden umlaufenden Endlosriemen übertragen. Um eine Beschädigung der Fahrkammer oder des -systems bei einem eventuell auftretenden Verklemmen des Detektors in der Fahrstrecke auszuschließen, wird bei Überschreitung eines Antriebsmomentes von 18 Nm eine Vorabschaltung des Antriebes ausgelöst.

Da die Fahrkammer und das Detektorkabel auf einer Länge von bis zu 4 m bei den Messungen im Reaktorkern aktiviert werden, wird das Fahrkammerkabel nur soweit aufgewickelt, daß dieser Kabelabschnitt im ausgefahrenen Zustand innerhalb einer ca. 5 m langen Bleiabschirmung verbleibt (Bild 2.4). Der Fahrkammerantrieb wird hierfür durch zwei induktive Bleiendlagenschalter beim Passieren des Detektors abgeschaltet.

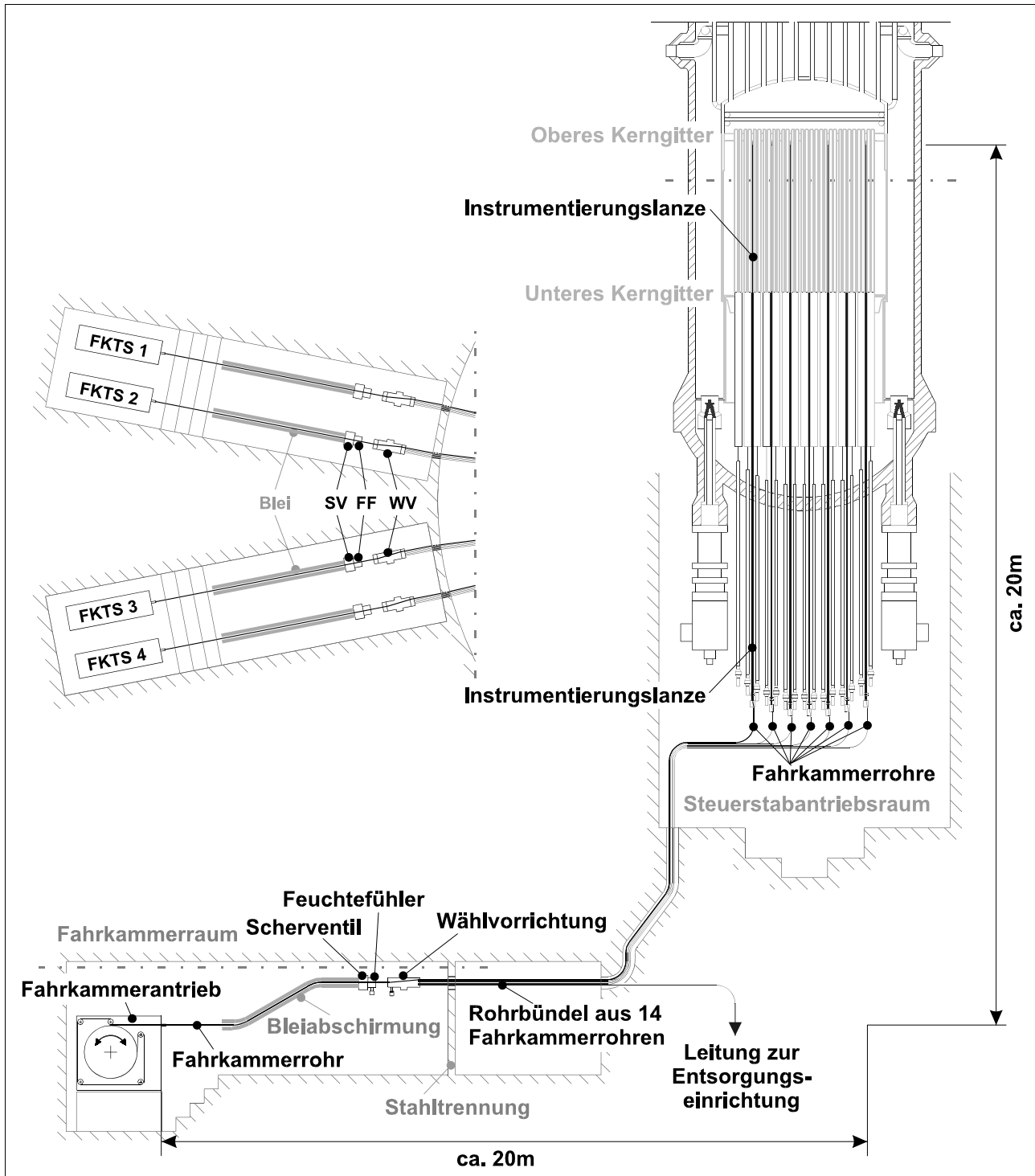


Bild 2.4: Aufbau der Fahrkammersysteme

Im Anschluß an die Bleiabschirmung ist das Fahrkammerrohr mit einem Scherventil und einem Feuchtefühler instrumentiert. Im Fall einer Leckage des Fahrkammerrohres innerhalb des RDB wird das austretende Primärkreiswasser vom Feuchtefühler registriert und das Fahrkammerrohr durch das Scherventil gegen den Reaktordruck verschlossen. Sollte sich in diesem Moment der Detektor beim Zurückziehen innerhalb der Fahrstrecke verklemmt haben, wird das Signalkabel beim Verschließen vom Scherventil durchtrennt.

Eine Wählvorrichtung verbindet die Antriebsseite des Fahrkammersystems mit einer von maximal 14 angeschlossenen Fahrkammerleitungen und einer Entsorgungsleitung (Bild 2.4, Bild 2.5). Die Rohrleitungen sind druckdicht an das Gehäuse der Wählvorrichtung angeschlossen, in deren Inneren ein drehbares, S-förmiges Rohrstück die Verbindung zu jeweils einem der kreisförmig angeordneten, abgehenden Fahrkammerrohre bildet. Zu Rohrbündeln zusammengefaßt durchlaufen die Rohrleitungen zunächst die Stahltrennung

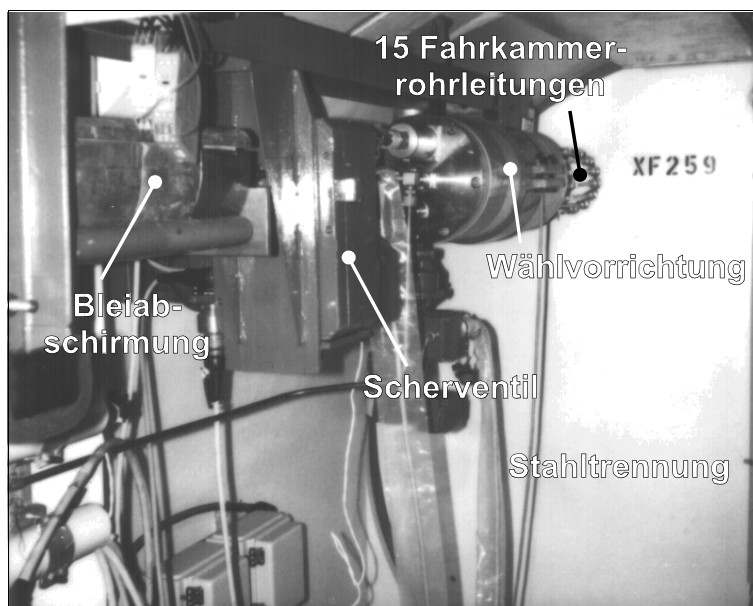


Bild 2.5: Wählvorrichtung und Scherventil

des Sicherheitsbehälters und führen an der Wand des Steuerstabantriebsraumes (SAR) entlang bis zum Reaktordruckbehälter, wo sie horizontal unterhalb des RDB zu den jeweiligen Anschlußpositionen der LVD-Lanzen führen.

Durch die auftreffenden Neutronen sinkt die Menge des spaltbaren Materials in der Fahrkammer und dadurch die Empfindlichkeit des Detektors. Schadhafte Fahrkammern werden über eine Entsorgungsleitung entsorgt, um die Installation einer neuen Fahrkammer zu ermöglichen. Die Leitung endet in einer Bleiflasche, in der der aktivierte Abschnitt des Kabels und die Fahrkammer ferngesteuert über eine hydraulisch angetriebene Schere abgetrennt werden können. Eine Instrumentierungslanze im Zentrum des Kerns (KP:32/29) ist mittels einer Weiche von allen vier Fahrkammersystemen erreichbar. Die Empfindlichkeiten der vier Fahrkammern können miteinander verglichen werden, indem sie bei konstantem Neutronenfluß nacheinander in diese Referenzlanze gefahren werden. Die verbleibenden maximal 13 Fahrkammerrohre führen in die restlichen 43 Instrumentierungslanzen des LVD-Systems. Um jede der 44 Instrumentierungslanzen mit einer Fahrkammer befahren zu können, sind pro Block vier Fahrkammersysteme vorhanden.

Während des Verfahrens der Fahrkammer im Kernbereich und im Bereich der Wählvorrichtung beträgt die Vorschubgeschwindigkeit 5 m/min, im restlichen Bereich des Systems 20 m/min. Innerhalb der Instrumentierungslanze hat das Führungsrohr der Fahrkammer auf einer Länge von 14560 mm einen Innendurchmesser von 7 mm und eine Wandstärke von 1,5 mm. Unterhalb der Instrumentierungslanze beträgt der Innendurchmesser 8 mm. Die einzelnen Teilstücke des Fahrkammerrohrsystems sind druckdicht miteinander verschraubt. Alle verwendeten Rohre sind nahtlos gezogen.

Die Fahrkammern (Typ KWU-MFK61 [5]) entsprechen in ihrem Aufbau den zuvor beschriebenen Spaltkammern der LVD-Instrumentierung. Für die speziellen Anforderungen an den Einsatz im

Fahrkammersystem wird im Hinblick auf die Verschieblichkeit des Detektors ein verschleißfest ausgeführtes Gehäuse mit abgerundeten Kanten und zum Einschieben bzw. Herausziehen des Detektors ein steiferes Signalkabel eingesetzt. Da die Fahrkammer trocken eingesetzt und damit nicht vom Moderator gekühlt wird, ist die Detektormasse im Vergleich zu den fest installierten Miniaturspaltkammern geringer, um die Erwärmung durch γ -Strahlung zu reduzieren. Der Außendurchmesser einer solchen Fahrkammer beträgt 6 mm, die Länge 78 mm. Das Signalkabel hat eine Al_2O_3 -Isolierung und einen Außenmantel aus Titan mit einem Durchmesser von 3 mm.

2.3. Körperschall- und Schwingungsanalyse

Die Signale der Standardreaktorinstrumentierung enthalten zahlreiche Informationen über Betriebsparameter und die Integrität der Bauteile der Anlage. Die Information können stochastisch oder periodisch im gemessenen Signal auftreten. Deshalb müssen unterschiedliche Verfahren angewendet werden, um sie zu extrahieren.

2.3.1. Zeitbereichsanalyse

Zur Beurteilung lassen sich Zeitsignale durch Kennwerte in Form von Skalaren charakterisieren [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Dies sind zunächst der Zeitmittelwert \bar{x} (1) und der quadratische Mittelwert \bar{x}^2 (2).

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1)$$

$$\bar{x}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (2)$$

Der Zeitmittelwert dient in der Rauschanalyse vor allem der Normierung der Rauschanteile auf den Gleichspannungsanteil (DC) des zugrundeliegenden Signals. Zur Quantifizierung des Rauschpegels bzw. der Streuung der Meßwerte wird der *Root Mean Square Value* oder RMS-Wert (3) verwendet, der bei mittelwertbereinigten Signalen der Standardabweichung (σ) (4) entspricht.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x}(t))^2 dt} \quad (4)$$

Da die in der mathematischen Definition geforderte unendliche Meßzeit nicht erreichbar ist, werden die Kennwerte in der Praxis durch mathematische Schätzer ermittelt, die anstelle des Integrals eine Reihensumme über die einzelnen Meßpunkte bilden (5). Unter Voraussetzung eines ergodischen Signalverhaltens resultiert aus dieser Vereinfachung nur ein geringer Fehler.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Zur Bewertung der Form eines Meßsignals bzw. der Verteilung der Meßpunkte wird der Kurtosiswert β_2 (6) verwendet. Bei einer Normalverteilung eines Signals um seinen Mittelwert ergeben sich Kurtosiswerte um 3. Abweichungen eines Signals von der Normalverteilung durch pulsartige Signalanteile, führen zur Erhöhung des Kurtosiswertes und lassen sich so quantifizieren.

$$\beta_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (6)$$

Weitere Informationen für die Signalanalyse werden durch die Signalkennfunktionen [9, 13] gewonnen. Die Autokorrelationsfunktion (AKF) (7) stellt eine Erweiterung des quadratischen Mittelwertes dar. Sie ergibt die lineare Abhängigkeit des Momentanwertes $x(t)$ vom Wert eines folgenden Zeitpunktes $x(t + \tau)$ innerhalb einer Zeitreihe und ist somit ein Maß für die innere Verwandtschaft eines Signals bezüglich seines zukünftigen Verlaufs [11]. Durch diese Beziehung sind periodische Anteile im Signal erkennbar.

$$R_{xx}(\tau) = AKF(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (7)$$

Für eine zeitliche Verschiebung $\tau = 0$ entspricht die AKF dem quadratischen Mittelwert. Die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) (8) bildet die gleiche Beziehung bezüglich zweier verschiedener Zeitreihen $x(t)$ und $y(t)$.

$$R_{xy}(\tau) = KKF_{12}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) \cdot x_2(t + \tau) dt \quad (8)$$

Sind die Signale vollständig korreliert, ergibt die KKF den Wert +1 bzw. -1. Für den Wert 0 sind die Signale unabhängig. Eine Kreuzkorrelation zweier Signale ist nur dann sinnvoll, wenn die Signale zeitgleich aufgezeichnet werden, da sich anderenfalls die Zeit zwischen den Messungen als zeitliche Verschiebung (τ) zwischen den Signalen auswirkt. Um bei verschiedenen Reaktorleistungen aufgenommene Rauschsignale vergleichen zu können, werden AKF und KKF auf den Zeitmittelwert der zugrundeliegenden Signale normiert.

2.3.2. Anwendungsbeispiel Körperschallüberwachung

Das Körperschallüberwachungssystem (KÜS) dient der akustischen Überwachung des Reaktor-druckbehälters. Eventuell vorhandene lose Teile können durch die im Behälter herrschenden Strömungsverhältnisse an dessen Innenwand oder gegen Reaktoreinbauten schlagen und durch die hierbei entstehenden Schallwellen vom Körperschallüberwachungssystem registriert werden. Unter Berücksichtigung der Schallausbreitungsbedingungen ist mittels mehrerer verteilt angeordneter Detektoren die Bestimmung der Schalleinleitungsstelle und eine Abschätzung der Anschlagenergien möglich [14, 15, 16]. Die Beschleunigungsaufnehmer des KÜS sind außen am RDB auf drei Instrumentierungsebenen verteilt montiert (Bild 2.1, Ebenen A,C und D). Die Ebenen befinden sich auf Höhe der RDB-Bodenkalotte, der Wasserabscheider- und der Dampfabscheiderrinne und somit in den Bereichen, in denen innerhalb des RDB die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für abgelöste Teile groß ist [14].

Neben diesem globalen Standardüberwachungssystem können Beschleunigungsaufnehmer als Sonderinstrumentierung von außen direkt an zu untersuchende Komponenten montiert werden, um detaillierte Informationen über auftretende Schallereignisse zu gewinnen. Die Nähe der Detektorposition zur Schalleinleitungsstelle ermöglicht über die Bestimmung der Burstintensitäten, der Burstform und der Frequenzinhalte eine exaktere Eingrenzung der Schallquelle. Der Großteil dieser Informationsinhalte geht bei längeren Schallübertragungstrecken durch die Dämpfung innerhalb des Materials und Überlagerung mit anderen Schallwellen verloren. Die kontinuierliche Überwachung ortsfester Anschlagereignisse ermöglicht die Einstellung von Betriebsparametern (z.B. bestimmter Strömungsverhältnisse), bei der die Anschläge nicht oder nur stark reduziert auftreten. Fortschreitende Schäden lassen sich so vermeiden. Typische Einsatzfälle für derartige Sonderuntersuchungen sind das ortsfeste Anschlagen loser Teile, Kavitationsschläge in Pumpen und Behältern und Anstreich- und Schwingungsvorgänge in rotierenden Maschinen. Die akustische Überwachung dient somit der Lokalisierung von Bauteilschäden oder Anomalien, der Schadenbegrenzung bei Weiterbetrieb der Anlage und der Vorbereitung der nachfolgenden Schadenbehebung.

Bei der Untersuchung von Schallereignissen gibt das Abhören der Signale einen ersten Eindruck über die Schallquelle. Ein „geschultes Ohr“ kann schon kleine Bursts in einem ansonsten verrauschten Körperschallsignal identifizieren.

Zur rechnergestützten bzw. automatischen Verarbeitung von Zeitsignalen ist eine möglichst hohe Abtastfrequenz anzustreben, um ein digitales Signal mit geringer Stufung zu erhalten, das den Signalverlauf möglichst gut wiedergibt. Die Bewertung eines Schallereignisses kann in einfachster Form über die Burstmaximalamplitude erfolgen. Hierbei wird häufig eine Aufmerksamkeitsschwelle definiert, bei deren Überschreitung eine eingehende Untersuchung eingeleitet wird.

2.3.3. Frequenzbereichsanalyse

Die Separation periodischer Signalanteile wird durch die Transformation des Zeitsignals in den Frequenzbereich mittels der Fourier-Transformation ermöglicht. Im Falle eines digitalisierten, gesampelten Signals erfolgt die Übertragung in den Frequenzbereich mit der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) (9) [17].

$$F_d(j\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) \cdot e^{-j\omega_k nT_a} \quad (9)$$

Hierbei bezeichnet ω_k eine diskrete Frequenz, für welche die Transformation durchgeführt wird, T_a das Abtastintervall bei der verwendeten Abtastfrequenz f_a und N die Anzahl der aufgenommenen Meßwerte. Das Quadrat der Betragsfunktion der Fourier-Transformierten $F(j\omega)$ über der Frequenz ist die Autospektrale Leistungsdichte (ASLD), die physikalisch als die auf die Frequenzen ω verteilte Leistungsdichte des Signals interpretiert werden kann [18]. Periodische Signalanteile, z.B. Schwingungen, bilden sich in den autospektralen Leistungsdichten als Peak, also als Frequenzbereich mit erhöhter Amplitude ab. Somit wird die Analyse eines Signals, das sich aus verschiedenen Frequenzkomponenten zusammensetzt, in die einzelnen Frequenzanteile möglich.

In der praktischen Anwendung wird der Algorithmus der sog. Fast Fourier-Transformation (FFT) angewendet, wodurch sich die Rechenzeit, im Vergleich zur Berechnung der DFT, erheblich verkürzen läßt [19, 20, 9, 21, 22, 13]. Zunächst ergeben sich aus der Transformation die Fouriertransformierte $X(\omega)$ (10) und die konjugiert komplex Fouriertransformierte $X^*(\omega)$ (11).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (10)$$

$$X^*(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{j\omega t} dt \quad (11)$$

Hieraus lassen sich die *Autospektrale Leistungsdichte* ASLD (12) und für den Vergleich zweier zeitgleich gemessener Signale die *Kreuzspektrale Leistungsdichte* $KSLD_{12}$ (13) nach folgenden Beziehungen berechnen:

$$ASLD(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot X(\omega) \cdot X^*(\omega) \quad (12)$$

$$KSLD_{12}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot X_1(\omega) \cdot X_2^*(\omega) \quad (13)$$

Um den statistischen Fehler zu verringern, werden die Kennfunktionen aus mehreren unabhängigen, zeitlich verschobenen Signalintervallen errechnet und anschließend gemittelt. Der Fehler sinkt dabei proportional dem Kehrwert der Wurzel der Mittelungsanzahl ab. Darüber hinaus lassen sich aus der

kreuzspektralen Leistungsdichte die frequenzabhängigen Größen Kohärenz und Phase bestimmen [19]. Die Kohärenz (14) ist ein über die ASLD normiertes Maß für die Übereinstimmung zweier verschiedener Signale. Ist die Kohärenz gleich 0, so sind die Signale unabhängig, für den Wert 1 enthalten sie die gleichen Informationen.

$$Y_{12}^2(\omega) = Koh = \frac{|KSLD_{12}(\omega)|}{ASLD_1(\omega) \cdot ASLD_2(\omega)} \quad (14)$$

$$\varphi_{12}(\omega) = Phase = \frac{Im KSLD_{12}(\omega)}{Re KSLD_{12}(\omega)} \quad (15)$$

Durch unterschiedliche Übertragungswege zu den Meßstellen oder durch verschiedene Meßrichtungen der Detektoren bilden sich Rauschquellen oftmals nicht zeitgleich in den untersuchten Signalen ab. Die Phase gibt die auf die Kreisfrequenz bezogene zeitliche Verschiebung zwischen dem jeweiligen Auftreten eines gemeinsamen Anteils in den beiden Signalen an. In Frequenzbereichen, in denen keine Kohärenz zwischen den betrachteten Signalen vorliegt, ist die relative Phasenlage nicht definiert. Die Phasenlage kann entweder zwischen -180° und 180° oder als kontinuierliche Phase im Bereich von $-\infty$ bis $+\infty$ dargestellt werden.

2.3.4. Anwendungsbeispiel Schwingungsüberwachung

Die Schwingungen von Bauteilen enthalten Informationen bezüglich ihrer mechanischen Integrität. Veränderungen der Einspannbedingungen, Relaxation oder eventuell auftretende Risse verändern die Steifigkeit des Bauteils und damit u. a. die Frequenz, Form und Amplitude der Eigenschwingungen. Somit ermöglicht die Analyse des Schwingungsverhaltens von Reaktorkomponenten Rückschlüsse auf ihren mechanischen Einbau- und Funktionszustand. Die Frequenzbereichsanalyse soll im folgenden exemplarisch anhand der Untersuchung der Grundschwingung des Reaktordruckbehälters durch Analyse der Signale der beiden horizontal ausgerichteten Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckel gezeigt werden. Bei komplexen Strukturen (Konstruktionen), wie z.B. dem Reaktordruckbehälter, bilden sich, durch stochastische Signalanteile überlagert, eine Vielzahl von Schwingungssignaturen periodisch in den Signalen der Absolutwegaufnehmer ab. Für die Analyse ist es daher notwendig, das Signal in diese einzelnen Bestandteile zu zerlegen.

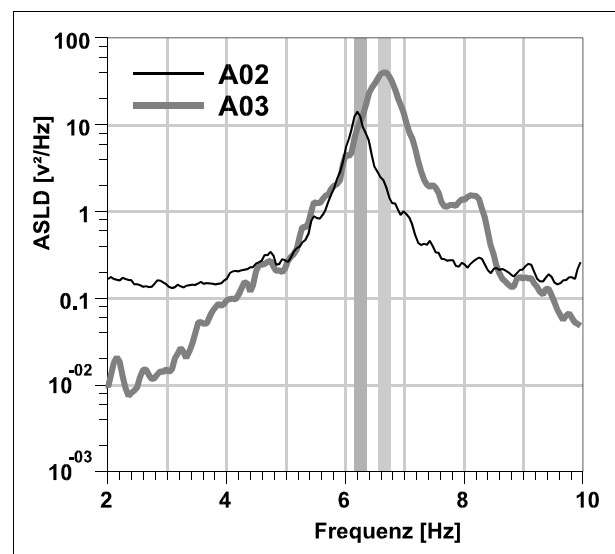


Bild 2.6 zeigt die autospektralen Leistungsdichten einer mit 50 Hz gesampelten Messung der Signale

Bild 2.6: Schwingungen des RDB in den ASLD der Signale der Absolutwegaufnehmer am RDB-Deckelflansch

der beiden horizontal ausgerichteten Absolutwegaufnehmer von Block C. Bei 6,2 Hz für A02 (270° horizontal) und bei 6,6 Hz für A03 (180° horizontal) ist jeweils ein markanter Peak zu erkennen, der durch Schwingungen des RDB bei diesen Frequenzen hervorgerufen wird. Eine genauere Beschreibung der vorliegenden Taumelbewegung des RDB ermöglicht die Korrelationsanalyse. Im Fall korrelierter Signalanteile gibt der Phasenwinkel zwischen den Signalen von A02 und A03 die zeitliche Verschiebung der maximalen Auslenkung des RDB in Richtung A02 und der maximalen Auslenkung in Richtung A03, bezogen auf die betrachtete Frequenz. Bei den hier vorliegenden, orthogonal zueinander ausgerichteten Meßrichtungen der beiden Detektoren lassen sich daraus Form und Ausrichtung der Schwingung abschätzen.

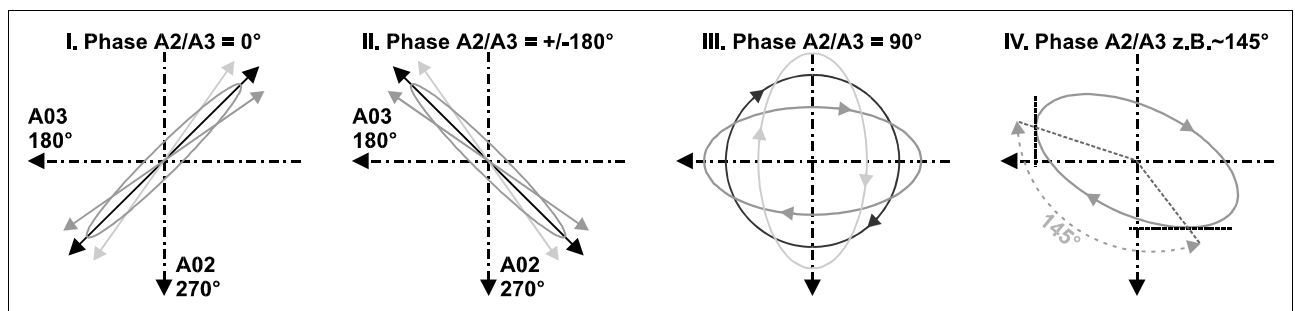


Bild 2.7: Taumel- bzw. Pendelbewegungen und daraus resultierende Phasenlagen zwischen Signalen zweier orthogonal angeordneter Wegaufnehmer

Bei einer Phasenlage von 0° (Bild 2.7, I) erreichen beide Signale zeitgleich ihre maximale Amplitude. Dies ist genau dann der Fall, wenn der RDB eine schmale, ellipsenförmige Taumelbewegung mit einer zwischen die Detektoren weisenden Ausrichtung (180° bis 270°) durchläuft. Die gleiche Bewegungsform in Richtung von 270° bis 360° bewirkt entgegengesetzte Signalverläufe beider Detektoren und dadurch eine Phasenverschiebung um $\pm 180^\circ$ (Bild 2.7, II). Entspricht die Phasenlage einem Winkel von 90°, so erfährt jeweils ein Detektor seine maximale Auslenkung im Moment des Nulldurchlaufes des anderen (Bild 2.7, III). Dies ergibt sich bei einer kreisförmigen bzw. ellipsenförmigen Taumelbewegung, wobei die Hauptachsen der Bewegungsbahn in Richtung der Meßachsen liegen. Bei jeder anderen Phasenlage beschreibt die Bahnkurve eine in der Detektorebene gedrehte Ellipse (Bild 2.7, IV). Neben diesen Bahnformen kann bei einer Phasenverschiebung von 0° ebenfalls eine durch Druckpulsationen verursachte Dehnung des RDB vorliegen, so daß hierbei auch das Signal des Absolutdruckaufnehmers mit in die Analyse einbezogen werden muß.

Bild 2.8 zeigt die Kohärenzen und Phasen zwischen den Signalen der Absolutwegaufnehmer A02 und A03. Für 6,2 Hz ergibt sich zwischen den Signalen ein Phasenwinkel von ca. 180° . Bei dieser Frequenz liegt also eine Bewegung mit vorherrschender Schwingungsrichtung zwischen 270° und 360° vor. Hingegen folgt aus der Phasenverschiebung um 90° bei 6,6 Hz eine eher kreisförmige Bewegung. Da bei diesem Frequenzanteil gleichzeitig der deutliche Peak in der ASLD von A03 vorliegt und die Signale bei dieser Frequenz nicht so hoch korreliert sind, ist zunächst eher davon auszugehen, daß es sich um eine Ellipsenbahn handelt, deren lange Hauptachse in Richtung 180° verläuft. Die starken Schwankungen in der relativen Phasenlage (z.B. unter 5 Hz und um 8 Hz) sind nicht auf Schwingungen, sondern auf die geringe Kohärenz zwischen den Signalen zurückzuführen (vgl. Kap 2.3.3.).

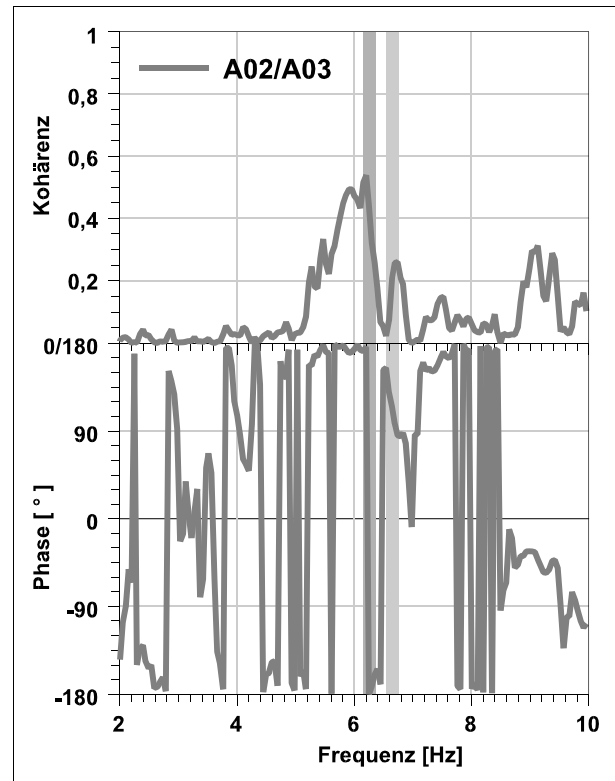


Bild 2.8: Schwingungen des RDB in den Korrelationen zwischen den Signalen der Wegaufnehmer

Die Signale der Beschleunigungsaufnehmer des Körperschallüberwachungssystems zeigen in dem hier betrachteten Frequenzbereich kein lineares Signalkennlinienverhalten und können deshalb nicht für die Bestimmung der Schwingungsamplitude verwendet werden. Die Korrelationen ihrer Signale zu den Absolutwegaufnehmern können aber mit in die Analyse einbezogen werden, da hierbei nicht das Amplitudenverhältnis der Signale, sondern der Anteil der Übereinstimmung der Signale bezogen auf die Gesamtsignale betrachtet wird. Die Kohärenzen zwischen den Signalen zweier Körperschalldetektoren der oberen Detektorebene (M01, M02, Bild 2.1, Ebene A) und den Absolutwegaufnehmern sind in Bild 2.9 dargestellt. Bei 6,2 Hz ist eine Korrelation zwischen den Signalen von M02 (100°) zu A02 zu erkennen, die in den Signalen der anderen Beschleunigungsaufnehmer nicht auftritt. Hierbei bestätigt die Korrelation zu A02 eine Taumelbewegung mit Ausrichtung zwischen 270° und 360° . Aus der geringen Korrelation zu M01 (10°) läßt sich darüber hinaus schließen, daß diese eher in Richtung 280° (bzw. 100°) orientiert ist. Die Korrelationen der Absolutwegaufnehmer zu den

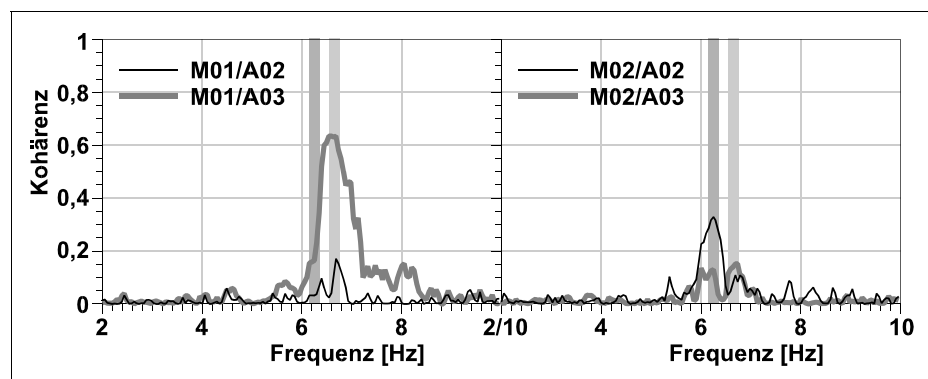


Bild 2.9: Schwingungen des RDB in den Kohärenzen der Signale der Wegaufnehmer zu Signalen von Körperschalldetektoren

Signalen der anderen beiden KÜS-Detektoren, die am RDB-Deckel montiert sind (M03, M04), bestätigen dies.

Um 6,6 Hz ergibt sich eine Korrelation aller Körperschalldetektoren zu A03, was die oben getroffene Annahme einer bauchigen, ellipsenförmigen Taumelbewegung, die von allen Detektoren aufgezeichnet wird, bestätigt. Zusätzlich deutet die hohe Kohärenz zu M01 (10°) bei dieser Frequenz auf eine Ausrichtung der langen Hauptachse zu 0° bzw. 180° hin. Die Signale der drei Absolutwegaufnehmer wurden bei dieser Meßreihe dreimal nacheinander, unter einer zeitlichen Verschiebung von bis zu 20 Stunden, aufgezeichnet. Bei dem Vergleich der drei Ergebnisse zeigen sich nur geringe Abweichungen. Sie betragen bei der Frequenzlage der Peaks $\pm 0,1$ Hz, in der zugehörigen Kohärenz maximal 10% und bei der Phasenlage $\pm 5^\circ$.

Die Bewegungen des Reaktordruckbehälters lassen sich auch in einer großen Anzahl weiterer Signale der Standardinstrumentierung nachweisen, die zwar eigentlich nicht zur Schwingungsmessung geeignet sind, deren Meßgrößen aber indirekt durch die Schwingungen beeinflusst werden. So enthalten die Signale der Reaktorfüllstands- und der unteren Reaktordruckmeßstellen einen periodischen Signalanteil um 6,5 Hz, der auf minimale Füllstandsschwankungen an der Position der Meßstellen durch die Taumelbewegungen des RDB zurückzuführen ist. Daneben bewirkt die Schwingung eine geringe Relativbewegung zwischen RDB und Kernbehälter und dadurch eine Veränderung der Breite des dazwischenliegenden, wassergefüllten Ringraumes (vgl. Bild 2.1). Dies bewirkt eine periodische Veränderung der lokalen Neutronenmoderation und -reflektion im Randbereich des Reaktorkerns und ist in den Signalen der Miniaturspaltkammern, die am dichtesten zum Rand positioniert sind, nachweisbar (KP: 08/53, 56/45 und 16/05, vgl. Bild 2.2).

Obwohl dieser Signalanteil oftmals zu gering ist, um in der autospektralen Leistungsdichte erkennbar zu sein, ergeben sich bei der Korrelation dieser LVD-Signale mit den Signalen der Absolutweg- und der Körperschalldetektoren nachweisbare Kohärenzen im Bereich um 6,6 Hz (Bild 2.10). Zum Vergleich ist neben den Korrelationen von Lanze 01, Ebene C, ebenfalls die Korrelation zwischen dem Detektorsignal der gleichen Ebene der innenpositionierten Lanze 15 und

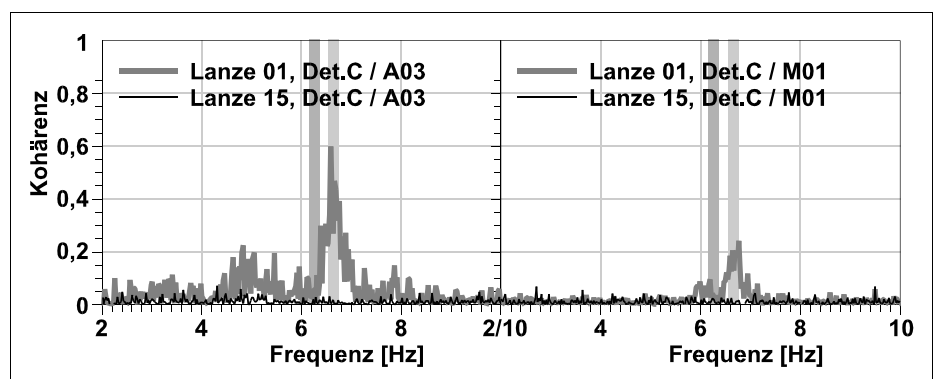


Bild 2.10: Kohärenzen der Wegaufnehmersignale zu Signalen von LVD der Instrumentierungslanzen 01 (KP.:08/53) und 15 (KP.:16/37)

A03 bzw. M01 dargestellt. Erwartungsgemäß ergeben sich im Fall der Lanze 15 keine Kohärenzen zwischen Neutronenfluß- und Absolutwegaufnehmer- bzw. Körperschallsignal im Frequenzbereich der Reaktordruckbehälterschwingung.

Neben dieser Hauptschwingung um 6,5 Hz sind durch die Korrelationsanalyse weitere Schwingungen des RDB bei höheren Frequenzen zu erkennen (Bild 2.11). Hierbei handelt es sich neben Eigenfrequenzen des Reaktordruckbehälters auch um Eigen-schwingungen der RDB-Einbauten (Wasserabscheider, Dampftrockner usw.) oder der an ihn angeflanschten und verspannten Komponenten (z.B. Loopleitungen), die sich auf den RDB übertragen. Zusammenfassend kann daraus geschlossen werden, daß der RDB durch eine Vielzahl überlagerter Kräfte zu Schwingungen angeregt wird und daß im Frequenzbereich um 6,5 Hz seine Hauptschwingungskomponente ausgeführt wird.

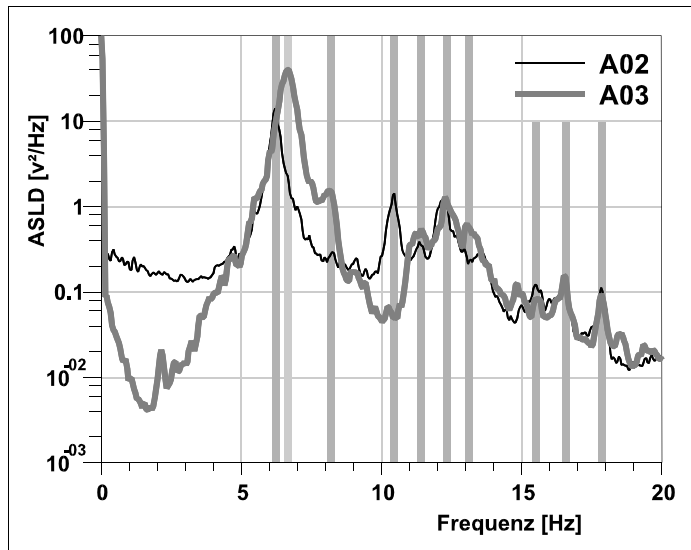


Bild 2.11: Schwingungen des RDB in den ASLD der Absolutwegaufnehmersignale

Wie am Beispiel des Reaktordruckbehälters gezeigt, lassen sich die Schwingungen der von außen zugänglichen Reaktorkomponenten wie Loopleitungen, Pumpen, Ventile und der Turbine durch direkte Instrumentierung mit Beschleunigungs- bzw. Wegsensoren überwachen. Die Schwingungen der kleineren Reaktoreinbauten (z.B. Brennelemente) lassen sich in der Regel aufgrund ihrer relativ geringen Masse nicht außerhalb des Druckbehälters feststellen.

Innerhalb des Kerns ist, durch die dort vorherrschenden extremen Umgebungsbedingungen, keine Festinstrumentierung mit Schwingungsdetektoren ausgeführt. Somit stehen zur Überwachung der Schwingungen der Kerneinbauten weder Weg- noch Beschleunigungssignale der Standardreaktorinstrumentierung zur Verfügung. Eine Möglichkeit zur indirekten Analyse und Überwachung der Schwingungen der Kerneinbauten von Siedewasserreaktoren ist die Rauschanalyse der Neutronenflußsignale der Kerninstrumentierung.

2.3.5. Datenerfassung

Die Rauschanalyse nutzt den allen kontinuierlichen Signalen der betrieblichen Instrumentierung überlagerten Rauschanteil. Im Gegensatz zu den meisten Größen der betrieblichen Signalverarbeitung wird für die Schwingungs- und Körperschallanalyse also nicht der Gleichstromanteil (DC), sondern der dem Signal überlagerte Wechselstromanteil (AC) ausgewertet. Da der AC-Anteil in Relation zum DC-Anteil oft nur geringe Amplituden aufweist, wird der DC-Anteil vor der Aussteuerung durch die Meßverstärker über Hochpaßfilter eliminiert. Um einen Einfluß der Meßdatenerfassung auf die Signalverarbeitung des Kraftwerkes zu vermeiden, werden die Signale der Reaktorinstrumentierung über Trennverstärker verzweigt.

Zur rechnergestützten Analyse und Verarbeitung analoger Signale werden diese durch den Analog-Digital-Umsetzer zu diskreten Zeitpunkten abgetastet, amplitudenquantisiert und gespeichert. Um eine exakte Rekonstruierbarkeit des Signals zu gewährleisten, muß das Signal mindestens

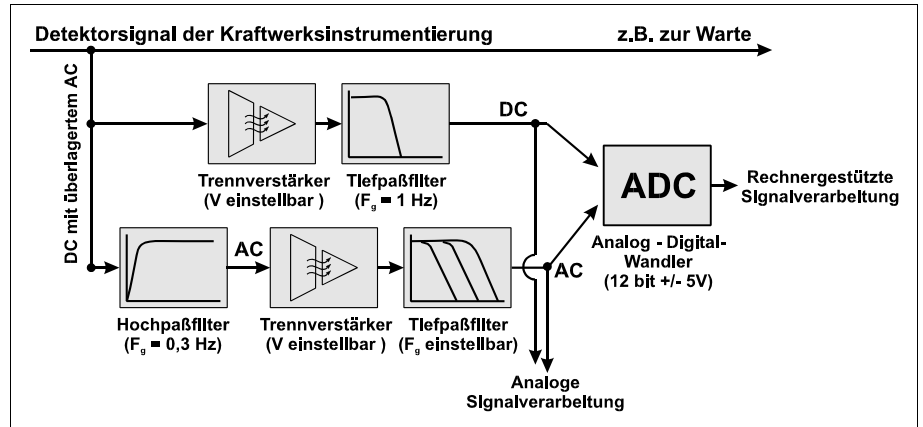


Bild 2.12: Meßkette zur Signalverarbeitung

mit dem doppelten der Frequenz, die als höchster Frequenzanteil im Signal enthalten ist, abgetastet werden (Nyquist-Frequenz), da sonst infolge einer Unterabtastung des Analogsignals ein als Aliasing bezeichneter Effekt auftritt, der spektrale Komponenten im Signal vortäuscht [18,8]. In der Praxis wird das Signal vor der Digitalisierung durch Tiefpaßfilter (Anti-Aliasing-Filter) im Frequenzinhalt auf die Analysefrequenz beschränkt und mit mindestens der doppelten Analysefrequenz abgetastet.

2.4. Zustandsüberwachung von Kerneinbauten durch Rauschanalyse von Neutronenflußsignalen

Die Kerneinbauten werden durch die turbulente Strömung des Kühlmittels zu Schwingungen angeregt. Über ihre Lagerungsstellen werden zusätzlich Schwingungen des oberen und des unteren Kerngitters auf sie übertragen. Da sich innerhalb des Neutronenflußgradienten des Kerns jedes Bauteil entweder als Neutronenquelle (z.B. Brennstäbe) oder Neutronensenke (z.B. Strukturmaterialien) verhält, verursachen Schwingungen über die Verlagerungen der Bauteile periodische Änderungen des lokalen Neutronenflusses im Umfeld des Bauteils. Hierdurch bilden sich die Schwingungen der Kerneinbauten in den Signalen der In-Kern-Instrumentierung ab. Daneben beeinflussen auch zahlreiche thermohydraulische Effekte, wie z.B. der Siedeprozess, über kurzzeitige lokale Dichteschwankungen des Moderators, den Neutronenfluß. Die Gesamtheit dieser stochastischen und deterministischen Flußschwankungen ergibt das sogenannte Neutronenflußrauschen. Das Ziel der Rauschanalyse ist die Zuordnung der einzelnen Signalanteile zu ihren Quellen, um dadurch indirekt eine Überwachung der zugrundeliegenden Schwingungen oder thermohydraulischen Prozesse zu realisieren [13, 10, 23].

Durch die große Anzahl der Neutronenflußdetektoren in Siedewasserreaktoren und der daraus resultierenden räumlichen Dichte der Meßstellen (vgl. Bild 2.2), lassen sich mit hoher Ortsauflösung Aussagen über die Schwingungen der Brennelemente bzw. BE-Kästen und Instrumentierungsanlagen gewinnen. Verglichen mit dem breitbandigen Rauschhintergrund sind die Amplituden der auf Schwingungen zurückzuführenden Signalanteile in den meisten Fällen relativ gering. Bild 2.13 zeigt

die auf den Signalmittelwert normierten autospektralen Leistungsdichten (NASLD) der Signale der jeweils vier Miniaturspaltkammern der LVD-Lanzen 03 und 12 aus Block C aus je einer Messung, die zu Beginn, und einer Messung, die gegen Ende des 13. Brennelementzyklus (BEZ) durchgeführt wurde.

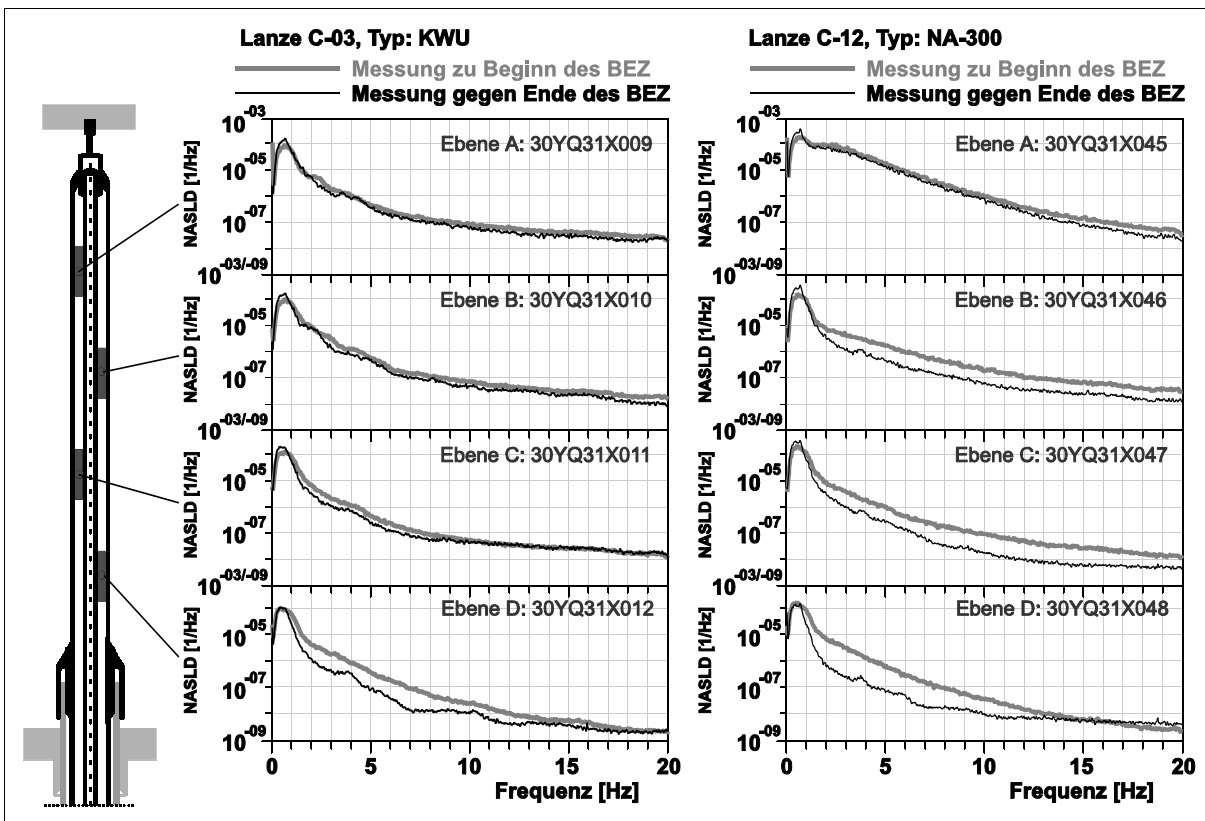


Bild 2.13: ASLD der Signale der LVD-Lanzen C-03 (KP.:24/53) und C-12 (KP.:48/45) aus Messungen zu Beginn und gegen Ende des Brennelementzyklus

Zunächst fällt in den Spektren der Detektorsignale der Ebenen A und B aus Lanze 12 ein erhöhter Rauschanteil auf, welcher ein von den entsprechenden Detektoren der Lanze 03 abweichendes Signalverhalten zeigt. Dies ist ein lanzentypabhängiger Effekt, der bei einigen Instrumentierungslanzen in beiden Reaktorblöcken auftritt. Neben den Instrumentierungslanzen der Typen MNK61 und MBK61 (Siemens/KWU) werden auch Lanzen des Typs NA 300 (GE/Reuter-Stokes) verwendet. Durch eine gegenüber den KWU-Lanzen andere Strömungsführung ist innerhalb der NA-300-Lanzen im oberen Bereich des Hüllrohres ein größerer Dampfblasenanteil enthalten, der den Rauschanteil im Neutronenflußsignal der dort positionierten Detektoren verursacht. Dieser Effekt erschwert die Identifikation von Schwingungssignaturen in den Signalen der oberen Detektorebenen.

In den Spektren der Signale der Messungen, die gegen Ende des BEZ aufgezeichnet wurden, sind in den Signalen der unteren drei Detektorebenen beider Lanzen im Bereich um 4 Hz und im Signal der Detektorebene D um 6 Hz periodische Signalanteile zu erkennen. Die Korrelation zwischen diesen Signalen zeigt keine klare Schwingungsfrequenz, sondern eher relativ breitbandige Übereinstimmungen im Frequenzbereich zwischen 3 Hz und 7 Hz (Bild 2.14). Es handelt sich hierbei um

die Schwingungen eines oder mehrerer der Lanze benachbarter Brennelemente/BE-Kästen, deren Bewegungen sich vermutlich mechanisch auf das Hüllrohr der Lanze übertragen. Dieses Schwingungsverhalten ist bei zahlreichen Lanzen gegen Ende des Brennelementzyklus zu beobachten. In den Signalen der Messungen, die zu Beginn des BEZ durchgeführt wurden, ist diese Schwingung nicht zu erkennen (Bild 2.13). Dies ist auf die Abhängigkeit der einzelnen Signalanteile von den Betriebsparametern des Reaktors, speziell dem Dampfblasenanteil im Moderator und dem Kerndurchsatz zurückzuführen. Um die Leistungsproduktion möglichst konstant zu halten und den zunehmenden Abbrand durch eine höhere Neutronenmoderation zu kompensieren, wird der Reaktor gegen Ende des Brennelementzyklus mit einem höheren Kerndurchsatz gefahren. Dadurch werden die Lanzen durch die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit stärker zu Schwingungen angeregt. Zusätzlich drückt die höhere Strömungsgeschwindigkeit die Siedegrenze im Kern nach oben, wodurch sowohl der Dampfanteil im Kern als auch das Dampfblasenrauschen im Neutronenfluß reduziert wird. Die von den Schwingungen der Kerneinbauten verursachten periodischen Neutronenflußschwankungen werden weniger stark überlagert und treten im Spektrum deutlicher hervor. Dies ist besonders in den Signalen der im unteren Teil des Kerns positionierten Detektoren zu beobachten. Die Phasenbeziehungen zwischen den Signalen der unteren drei Detektoren der LVD-Lanze C-12 verdeutlichen diesen Zusammenhang (Bild 2.14).

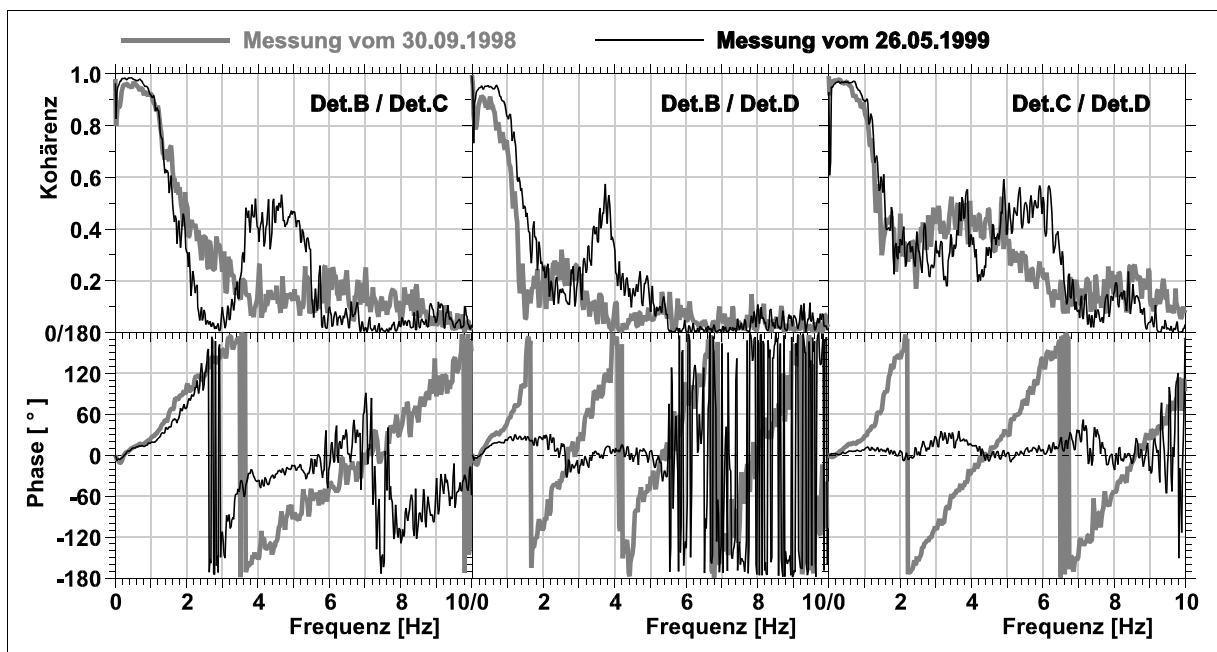


Bild 2.14: Korrelation zwischen Signalen der LVD der Lanze C-12 von Messungen zu Beginn und gegen Ende des BEZ

Die beinahe linear ansteigenden Phasenlagen zwischen den Signalen der unteren drei Detektoren, die bei der Messung zu Beginn des BEZ aufgezeichnet wurden, sind auf Transportprozesse der im Kühlmittel enthaltenen Dampfblasen innerhalb des Kerns zurückzuführen. Hingegen sind die Detektorsignale bei der Messung vom Ende des BEZ, abgesehen vom Bereich unter 1,5 Hz, der durch globale Reaktivitätsschwankungen geprägt ist, in korrelierten Frequenzbereichen in Phase.

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Messungen besteht darin, daß die Signale der LVDs jeweils durch eine andere Rauschquelle geprägt werden. Bestimmend ist hierbei der Rückgang des zu Beginn des BEZ dominierenden Dampfblasenrauschens und daß die strömungsinduzierten Schwingungen durch die Betriebsparameter des Reaktors gegen Ende des Zyklus stärker angeregt werden.

Vorausgesetzt, daß der Großteil der entstandenen Dampfblasen im Kühlmittel erhalten bleibt, passieren sie auf ihrem Weg durch den Kern nacheinander die Detektoren einer Lanze. Aus der Transportzeit der Dampfblasen zwischen den Detektoren läßt sich die Transportgeschwindigkeit bestimmen. Die Transportzeit bzw. die zeitliche Verschiebung der durch die Dampfblasen erzeugten Neutronenflußschwankungen innerhalb der Detektorsignale läßt sich aus dem Maximum der Korrelationsfunktion (Gleichung 8) zwischen beiden Signalen ablesen. Mit dem bekannten Detektorabstand ΔZ_d ergibt sich aus der Steigung der Phase φ (16) direkt die Dampfblasengeschwindigkeit W_D (17) zwischen den Detektoren [24].

$$\varphi_{12} = -\omega \tau_0 \quad (16)$$

$$W_D = \frac{\Delta Z_d}{\tau_0} \quad (17)$$

Aus der Berechnung der Dampfblasengeschwindigkeiten ergibt sich ein Instrument zur qualitativen Überwachung des Kühlmittelflusses. Die Ermittlung der Dampfblasengeschwindigkeit ist nur ein Beispiel für die Möglichkeiten der Untersuchung von Transporteffekten mittels Rauschanalyse. Im Rahmen anderer Studien wurden unter Laborbedingungen der vorliegende Siedezustand [25], der Dampfgehalt [26], die tatsächliche Kühlmittelgeschwindigkeit [27] und die Strömungsform [28, 29] aus Neutronenflußsignalen bestimmt.

Die Betriebsparameter des Reaktors sind, durch unterschiedlich starke Ausprägung der Signalanteile einzelner Rauschquellen und die variable Schwingungsanregung der Einbauten, bei der Interpretation der Messungen zu berücksichtigen. Unterschiedliche Standzeiten der Reaktoreinbauten oder Variationen der Einbaulage einzelner Bauteile wirken sich ebenfalls im Schwingungsverhalten aus.

Durch die Zuordnung der einzelnen periodischen Signalanteile zu ihren Quellen ist es möglich, das Schwingungsverhalten der die Neutronenflußschwankung verursachenden Komponente wiederkehrend zu beobachten. Durch den Vergleich der aktuellen Rauschsignale mit denen von Referenzmessungen oder mit dem durchschnittlichen Signalverhalten, läßt sich eine Schwingungsüberwachung realisieren. Abweichungen können auf eine Änderung des Schwingungsverhaltens der Reaktorkomponenten zurückzuführen sein, die z.B. durch veränderte Einbaubedingungen nach einer Revision oder durch Bauteilveränderungen hervorgerufen werden. Die Änderung der Frequenz einer Bauteilschwingung führt zu einer Verlagerung des zugehörigen Peaks im Signalspektrum. Die Vergrößerung der Amplitude der Schwingung bewirkt, daß der zugeordnete Peak größer wird oder hervortritt, sofern er zuvor vom Untergrundrauschen überlagert wurde. Eine Schwingung, die durch

das Anschlagen einer Komponente begrenzt wird, macht sich u.a. durch eine Verbreiterung und Dämpfung des zugehörigen Peaks im Spektrum bemerkbar (s. u.). Veränderungen und Entwicklungen können auf diese Weise aufgezeigt und daraus Empfehlungen für eingehende Bauteiluntersuchungen während der Revisionen abgeleitet werden.

Die Interpretation der Rauschsignale kann durch die Ergebnisse mathematischer Modellierungen ergänzt werden. Bereits Ende der 80er Jahre wurden die Auswirkungen eines schwingenden Absorbers auf die Neutronenflußdichte im Reaktorkern berechnet [z.B. 30, 31]. Ebenso kann die Modellierung des Schwingungsverhaltens der Bauteile die Zuordnung der einzelnen periodischen Signalanteile zu ihren Quellen unterstützen. Treten Veränderungen im Schwingungsverhalten auf, können die Ergebnisse der Berechnungen als Anhaltspunkte zur Ursachenfindung beitragen. Bewährt hat sich dabei die Kombination der Berechnung mit den Ergebnissen zuvor durchgeführter Schwingungsmessungen [32, 33]. Die Randbedingungen des mathematischen Modells können so mit den tatsächlich vorliegenden Gegebenheiten abgeglichen werden. Für die Instrumentierungslanzen ergibt sich daraus eine Grundschwingung um 2,5 Hz im Bereich des Reaktorkerns. Ebenso wurde der Einfluß eines Anschlages der Lanze an die sie umgebende Strukturen, z.B. Brennelementkästen, im Neutronenflußsignal berechnet. Das Ergebnis ist eine Dämpfung und deutliche Verbreiterung des Schwingungspeaks in den Neutronenflußspektren. Dieses bei Lanzenschwingungen, die durch Anschlagereignisse begrenzt werden, typische Signalverhalten der Neutronenflußdetektoren wurde im Rahmen aktueller Studien umfassend untersucht und bestätigt [34].

Für die Berechnung des Schwingungsverhaltens der Lanzenrohre über ihrer gesamten Bauhöhe wurde die Instrumentierungslanze mit einer Finite-Elemente-Berechnung modelliert [35]. Darüber hinaus wurden auch die Schwingungen der einzelnen Komponenten der Lanze (z.B. Innen- und Außenrohr), die auch unabhängig voneinander auftreten können, ermittelt. Diese Analyse erbrachte 14 Schwingfrequenzen der Instrumentierungslanze im Bereich bis 8 Hz und außerdem für verschiedene, mögliche Einbautzustände jeweils leicht variierende Ergebnisse. Die Finite-Elemente-Berechnung liefert neben den Schwingungsfrequenzen auch die zugehörigen Schwingungsformen und Auslenkungen. Treten bei den Messungen ungewöhnliche Schwingungssignaturen auf, so kann deren Ursache durch den Vergleich zwischen gemessenen Phasenbeziehungen und gerechneten Schwingungsformen und -frequenzen eingegrenzt werden. Die Schwingungen der Einzelrohre bilden sich nur deutlich im Neutronenflußsignal ab, wenn sie im Kernbereich hohe Amplituden, verbunden mit gleichgerichteten Auslenkungen, aufweisen. Damit verbleibt als Grundmode eine errechnete Schwingung um 2,3 Hz, die einen höheren (vierten) Schwingungsmode der Instrumentierungslanze zwischen Dichtsitz der Lanze und oberem Kerngitter beschreibt. Im Bereich zwischen dem oberen und unteren Kerngitter, in dem die LVD positioniert sind, stimmt die Schwingungsform mit der zuvor berechneten Grundschwingung überein.

Als Beispiel für ein ungewöhnliches Schwingungsverhalten zeigt Bild 2.15 die normierten autospektralen Leistungsdichten der Signale der vier Miniaturspaltkammern einer LVD-Lanze (Block C, Nr.26, KP.: 48/29). Im Frequenzbereich unter 20 Hz tritt in allen vier Signalen um 2,5 Hz ein auffallend großer Peak hervor. Die Korrelation zeigt in allen Signalkombinationen hohe Übereinstimmungen bei dieser Frequenz (Bild 2.16, links). Aus den relativen Signalphasen läßt sich die Schwingungsform rekonstruieren (Bild 2.16, rechts). Es handelt sich hierbei um eine Schwingung der Instrumentierungslanze zwischen dem oberen und dem unteren Kerngitter. Die durch die Lanzenschwingung um 2,5 Hz verursachte Signalschwankung tritt hier deutlicher hervor als bei den anderen Instrumentierungslanzen.

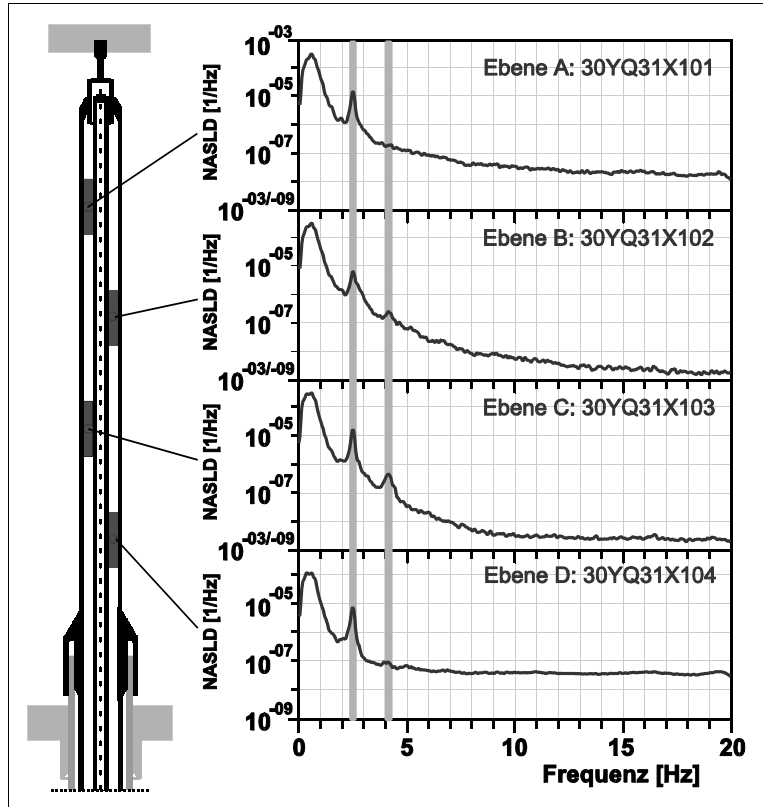


Bild 2.15: ASLD der LVD-Signale der Lanze C-26 (KP.: 48/29)

Dies deutet zunächst auf eine überdurchschnittlich große Schwingungsamplitude hin.

Um 4 Hz ist in den NASLD ein Peak, hauptsächlich in den Signalen der beiden mittleren Detektoren und etwas schwächer im Signal der Ebene D, zu erkennen. Zwischen allen Signalkombinationen ergibt sich dabei eine klare Nullphase, die zum Beispiel durch einen ersten Schwingungsmodus zwischen den Kerngittern verursacht werden kann. Hierbei handelt es sich aber nicht um die Schwingung der LVD-Lanze, sondern um die Schwingung eines benachbarten Brennelementes/BE-Kastens, die sich über die Veränderung des Neutronenflusses, im Bereich der Instrumentierungslanze, in den Signalen abbildet (vgl. Kap 5.2.1.). Ein An-

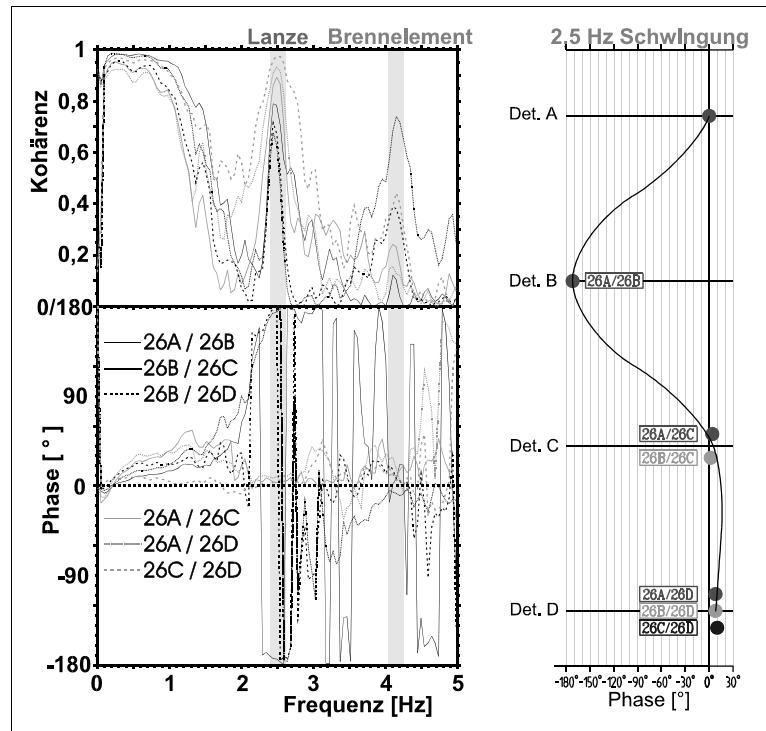


Bild 2.16: Korrelationen zwischen LVD-Signalen der Lanze C-26 und resultierendes Schwingungsbild

liegen der Lanze an dem schwingenden BE-Kasten ist unwahrscheinlich, da sich hierbei die zuvor gezeigte freie Schwingung um 2,5 Hz nicht ausbilden könnte.

Bild 2.17 zeigt die NASLD der Neutronenflußsignale der Lanze 26 in Form einer Trendanalyse über mehrere Brennelementzyklen. Die Schwingungen der Instrumentierungslanze bei 2,5 Hz waren in den Brennelementzyklen, die im Bild mit BEZ B und BEZ D bezeichnet sind, nicht feststellbar, während sie im BEZ C ebenso wie im BEZ A auftraten. Durch das innerhalb der Brennelementzyklen jeweils unveränderte Schwingungsverhalten der Lanze und die relativ großen Änderungen nach erfolgter Revision, ist bei dieser Lanze von einer Abhängigkeit der Schwingung von jeweils veränderten Einbaubedingungen der Lanze auszugehen.

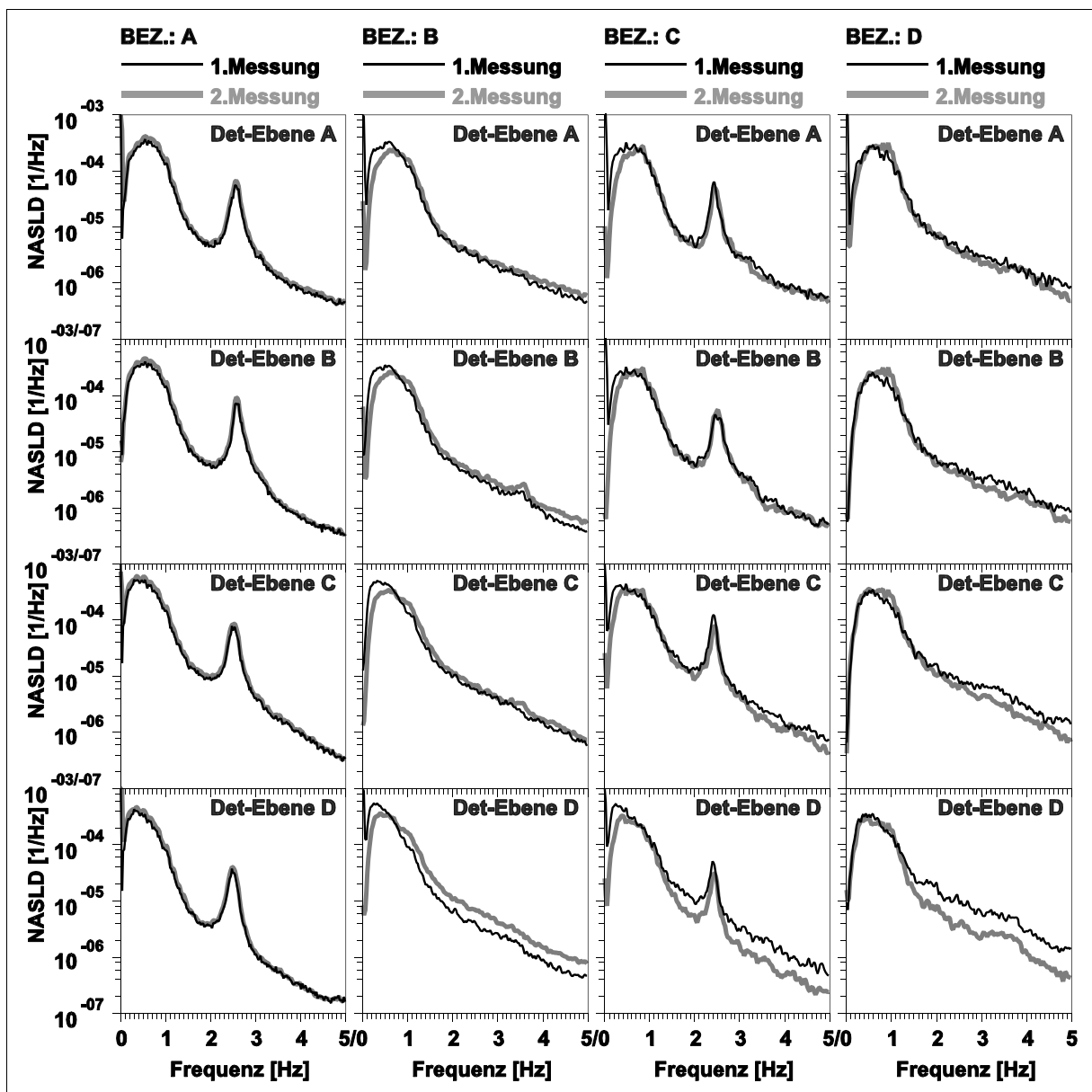


Bild 2.17: Trenddarstellung der NASLD der LVD-Signale der Lanze C-26

Die Einbaubedingungen begünstigen entweder eine freie Grundschiwingung zwischen dem oberen und unteren Kerngitter oder unterdrücken sie durch das Anliegen des Hüllrohres an einem benachbarten Brennelementkasten.

Ein weiteres auffälliges Schwingungsverhalten einer Instrumentierungslanze wurde über die Dauer mehrerer Brennelementzyklen in den LVD-Signalen der Lanze 42 aus Block C beobachtet [35]. In den Spektren der ersten in Bild 2.18 dargestellten Messung (BEZ A, 1. Messung) ist zwischen 4 Hz und 5,5 Hz ein sehr breitbandiger Peak im Detektorsignal der Ebene A zu erkennen, der in den anderen Signalen der Lanze bei dieser Messung nicht nachweisbar war. Zu Beginn des folgenden BEZ (BEZ B, 1. Messung) bildete sich die Schwingung in den Signalen der oberen drei Detektoren der Lanze ab. Zusätzlich lag eine Amplitudenvergrößerung des Peaks der Ebene A mit gleichzeitiger Frequenzabnahme auf ca. 3 Hz vor. Die Phasenlagen ergaben einen höheren Schwingungsmodus zwischen oberem und unterem Kerngitter, der vermutlich aus einer Schwingung der Lanze über ihrer gesamten Bauhöhe resultierte.

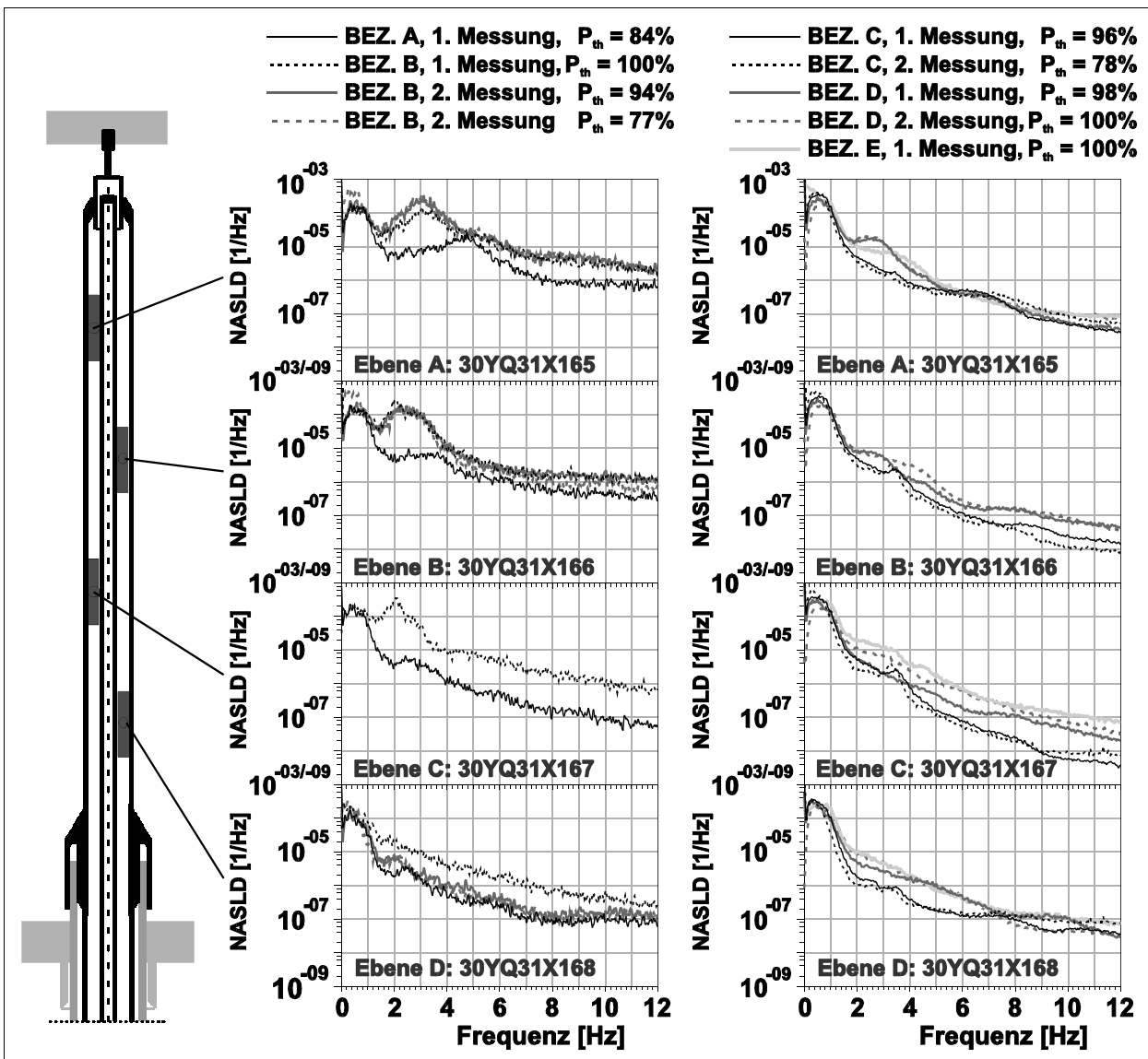


Bild 2.18: Trenddarstellung der NASLD der Signale der LVD-Lanze C-42

Bei den folgenden beiden Messungen (BEZ B, 2. und 3. Messung) war die Maximalamplitude des Peaks um 3 Hz im Detektorsignal der Ebene A weiter angestiegen.

Die sehr breite, gedämpfte Form der Schwingungspeaks führte zu der Vermutung, daß ein Anschlagen zwischen den Einzelrohren der Instrumentierungslanze oder der Lanze an die sie umgebende Strukturen, z.B. Brennelemente, vorliegen könnte. Diese Vermutung wurde durch die Ergebnisse mathematischer Modellierungen der Lanze untermauert (s.o).

Um weitere Informationen über das Schwingungsverhalten der Instrumentierungslanzen zu gewinnen, wurde eine Versuchsreihe mit variablen Drehzahlen der Hauptkühlmittelpumpen durchgeführt [36]. Zunächst wurde die der Lanze 42 benachbarte Pumpe (YU70, Bild 2.1) abgeschaltet. Bei gleichzeitiger, voller Drehzahl (2000 U/min, P_{th} 85%) der sieben anderen Pumpen, sanken die Schwingungsanteile in den Detektorsignalen von Lanze 42 um mehr als eine Dekade ab. In einer folgenden Versuchsreihe sind die Drehzahlen aller Pumpen gleichmäßig abgesenkt worden. Ab einer Drehzahl von ca. 600 U/min (P_{th} 42%) waren die erhöhten Signalamplituden sowohl in den Signalen der Lanze 42, als auch der 2,5 Hz-Anteil in den Signalen der Lanze 26 fast vollständig verschwunden. Hieraus ergibt sich, daß die Schwingungen der Instrumentierungslanzen hauptsächlich durch die Kühlmittelströmung angeregt werden.

Nach dem Austausch der Instrumentierungslanze war zunächst in den Neutronenflußsignalen keine Abweichung vom durchschnittlichen Schwingungsverhalten der anderen LVD-Lanzen feststellbar (Bild 2.18, BEZ C, 1. und 2. Messung). Bei den Analysen der Messungen der folgenden BEZ (BEZ D und E) wurden wiederum breitbandige, langfristig nicht gleichbleibende Schwingungssignaturen in den Neutronenflußsignalen detektiert.

Bei einer folgenden Inspektion dieser Kernposition wurde eine Schädigung bzw. ein vergrößertes Spiel im Bereich der Steckverbindung zwischen dem Kernflußmeßgehäuserohr und dem Abschlußrohr festgestellt (vgl. Bild 2.4). Die Ursache der Lanzenschwingung, die in den Signalen der Neutronenflußdetektoren festgestellt wurde, war demnach eine Schwingung des Kernflußmeßgehäuse- und/oder des Abschlußrohres im Bereich der Steckverbindung, die sich auf die Lanze übertragen und bis in den Kernbereich fortgesetzt hat.

Die Beispiele zeigen, daß unter Verwendung der Signale der Kerninstrumentierung eine Überwachung der Schwingungen der LVD-Instrumentierungslanzen erfolgen kann. Der Stand der Technik ist hierbei, während des Betriebes der Anlage auftretende Veränderungen im Schwingungsverhalten zu ermitteln, und ungewöhnliche Bauteilschwingungen durch den Vergleich mit Referenzmessungen relativ zu bewerten. Dabei ist es notwendig, abweichende Signalverhalten eingehend und wiederkehrend zu untersuchen.

3. Entwicklung eines Meßverfahrens für In-Kern Beschleunigungsmessungen in Fahrkammersystemen von Siedewasserreaktoren

Die Rauschanalyse der Signale der Neutronenflußinstrumentierung ermöglicht die Überwachung der Schwingungen der Kerneinbauten. Die Stärke und Häufigkeit eventueller Anschlagvorgänge oder die Absolutamplitude einer detektierten Schwingung läßt sich so zunächst nicht ermitteln, da nicht die Schwingungen selbst, sondern lediglich ihr Einfluß auf den Neutronenfluß im Bereich des Detektors gemessen wird. Das Verfahren ist hierdurch auf qualitative Aussagen zum Schwingungsverhalten beschränkt. Die Anschlaghäufigkeit oder die Schwingungsamplitude sind aber wesentliche Informationen zur Bewertung einer ungewöhnlichen Bauteilschwingung und damit zur Einschätzung der Dringlichkeit einer eventuell einzuleitenden Reparaturmaßnahme. Hierdurch ergibt sich die Forderung nach zusätzlichen Meß- bzw. Auswertungsverfahren zur Erweiterung der Schwingungsanalyse von Kerneinbauten.

Durch mathematische Modellierung der Auswirkungen von Absorberschwingungen im Neutronenflußgradienten eines Reaktors, wurde versucht eine Übertragungsgröße zu errechnen, durch die sich die gemessene Neutronenflußschwankung in die zugrundeliegende Schwingungsamplitude umrechnen läßt [37, 38, 34]. Durch die Vereinfachungen der Modellierung lassen sich die Ergebnisse aber nicht auf die komplexen Zusammenhänge in Leistungsreaktoren übertragen. Mit demselben Ziel wurden in einem Versuchsreaktor definierte Absorberschwingungen mit den durch sie verursachten Schwankungen in den Signalen von Neutronenflußdetektoren in Beziehung gesetzt [39]. Aufgrund der Anlagenunterschiede im Vergleich zu Leistungsreaktoren lassen sich aber auch diese Ergebnisse nicht übertragen.

Die Montage von Beschleunigungsaufnehmern außen auf den Führungsrohren unterhalb des Reaktordruckbehälters ermöglicht zwar die Detektion von Einzelschallereignissen, die sich als Körperschall in den äußeren Lanzenrohren ausbreiten, aber weder der Anschlagort innerhalb des RDB noch die zugrunde liegende Schwingung lassen sich analysieren [40]. Ähnliche Ergebnisse lassen sich mit Messungen erzielen, bei denen unterhalb des RDB ein Beschleunigungsaufnehmer kurzzeitig von Hand gegen die zu untersuchenden Strukturen gedrückt wird.

Durch Einbau zweier Beschleunigungsaufnehmer in Instrumentierungslanzen eines Druckwasserreaktors konnten die Schwingungen der Instrumentierungslanzen direkt im Reaktordruckbehälter gemessen werden [41]. Die Meßergebnisse erbrachten zusätzliche Informationen über das Schwingungsverhalten der Kerneinbauten und ermöglichten auch die Abschätzung von anlagenspezifischen, frequenzabhängigen Übertragungsfaktoren zwischen der gemessenen Schwingungsamplitude und der gemessenen Neutronenflußschwankung. Die Beschleunigungsaufnehmer, speziell die piezoelektrischen Kristalle, wurden im Reaktorkern durch die einwirkende Strahlung geschädigt und lieferten deshalb nur über einen kurzen Zeitraum verwertbare Signale. Die Standzeit der Detektoren im Kern war dadurch zu gering, um eine Schwingungsüberwachung über den Zeitraum eines Brennelementzyklus zu realisieren.

3.1. Zielsetzung des Meßverfahrens

Zur Untersuchung der Schwingungen der Kerneinbauten von Siedewasserreaktoren soll ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer zeitweise in den Reaktordruckbehälter eingebracht werden. Der Detektor wird hierzu innerhalb der Rohrleitungen des Fahrkammersystems anstelle einer Fahrkammer bis in den Reaktorkern eingeschoben. Die dort auftretenden Beschleunigungen des Fahrkammerrohres werden gemessen, und anschließend wird der Detektor wieder ausgefahren. So sind Beschleunigungsmessungen für Schwingungs- und Körperschallanalysen an jeder beliebigen Höhenposition innerhalb der Instrumentierungslanzen möglich, ohne daß dazu Umbauten an der Anlage oder eine fest installierte Zusatzinstrumentierung erforderlich sind. Die Schwingungen der LVD-Lanze, sowie die der mit der Lanze verbundenen Bauteile, wie z.B. dem Kernflußmeßgehäuserohr, können mit hoher Ortsauflösung analysiert werden. Eventuell auftretende Einzelschallergebnisse, die z.B. durch Anschlagvorgänge erzeugt werden, können im Bereich der Schalleinleitungsstelle gemessen werden. In Zusammenarbeit mit der Firma Vibro-Meter wurde ein bestehender Beschleunigungsdetektor für den Einsatz im Fahrkammersystem modifiziert. Zur erstmaligen Instrumentierung der LVD-Lanzen mit dem Beschleunigungsaufnehmer waren eine Reihe von Vorversuchen notwendig, um die Durchführbarkeit der Messungen und die Belastbarkeit der Ergebnisse der Schwingungs- und Körperschallanalysen zu überprüfen.

3.2. Auswahl und Modifikation des Detektorprototyps

Die Auswahl des Detektortyps wird im wesentlichen durch die extremen Umgebungsbedingungen im Reaktorkern und die geometrischen Voraussetzungen innerhalb des Fahrkammersystems bestimmt. Die Anforderung nach einer für den Einsatzzweck erforderlichen geringen Baugröße, kombiniert mit einer Resistenz gegen die am Meßort vorliegende hohe Temperatur und Strahlungseinwirkung, lassen sich am besten unter Verwendung eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers erfüllen [42, 43].

Das Meßprinzip eines solchen Beschleunigungsaufnehmers beruht auf der Erzeugung von elektrischen Ladungen auf der Oberfläche von piezoelektrischen Materialien, wenn auf diese eine Druck-, Zug- oder Scherkraft wirkt. Ein piezoelektrisches Element wird als Feder zwischen einer seismischen Masse und der Basis des Detektors montiert. Bei Beschleunigung des Aufnehmers wirkt auf das piezoelektrische Element eine Kraft, die durch Trägheit der seismischen Masse hervorgerufen wird. Die an der Oberfläche des Materials auftretenden Potentialdifferenzen sind zu der einwirkenden Kraft und dadurch, entsprechend dem 2. Newtonschen Axiom, auch der Beschleunigung direkt proportional. Somit ist bei guter Ankopplung der Aufnehmerbasis an das zu messende Objekt das Ausgangssignal des Aufnehmers proportional der Beschleunigung des schwingenden Meßobjektes [43].

Da der Detektor für die Messungen mit seiner Längsachse parallel zur Rohrachse an die Innenwand des zu untersuchenden Fahrkammerrohres angekoppelt werden soll, sind die beiden Meßachsen (X und Y) jeweils unter 90° zur Längsachse orientiert. Der Beschleunigungsaufnehmer arbeitet nach einem 1992 patentierten Verfahren (EU Patent No. 316498 und US Patent No. 5.117.696) [44, 45]. Die Elektroden des Detektors sind auf einem Ring aus piezoelektrischem Material positioniert (Bild 3.1). Dieser piezoelektrische Wandler wird unter Vorspannung durch eine Stange zusammengehalten, an deren Spitze eine seismische Masse montiert ist. Um eine hohe Empfindlichkeit auf kleinstem Raum zu erreichen, werden mehrere piezoelektrische Wandler gestapelt und mit einer seismischen Masse hoher Dichte (Wolfram) kombiniert. Jeder piezoelektrische Wandler ist an seiner Ober- und seiner Unterseite mit einer, in vier Segmente geteilten, Elektrode verbunden. Die Verbindung der Segmente der Oberseite mit dem jeweils gegenüberliegenden Segment der Unterseite ergibt den biaxialen Beschleunigungsaufnehmer. Durch Trägheitskräfte, die senkrecht zur Detektorachse auftreten, verbiegt die seismische Masse den vorgespannten Stift. Es resultiert eine Zunahme der Druckkraft auf der einen Seite und eine Abnahme der Druckkraft auf der anderen Seite der piezoelektrischen Wandler und dadurch ein elektrisches Potential, proportional zu der Kraft, die auf den Ring des Wandlers einwirkt. Die starke Vorspannung hält den Aufnehmer zusammen, so daß auch bei maximalen Beschleunigungen keine Verschiebungen zwischen den Komponenten auftreten können. Hierbei ist es wesentlich, daß sich die Vorspannung nicht durch Temperatureinflüsse verändert, da sonst eine Temperaturkompensation erforderlich wäre.

Die Auswahl des piezoelektrischen Materials wird in erster Linie durch die Einsatztemperatur, die Strahlungseinwirkung und durch den Aufbau des Detektors, welcher ein besonders homogenes stabiles piezoelektrisches Material erfordert, bestimmt. Aus diesen Gründen wurde der natürliche piezoelektrische Kristall „Vibro-Meter VC2“ ausgewählt. Aufnehmer dieser Bauart (Vibro-Meter CA-606) wurden bereits fest in zwei Instrumentierungsanlagen eines Druckwasserreaktors eingebaut (s.o.) [46]. Aufbauend auf diesem Detektortyp wurde ein neuer Beschleunigungsdetektor (Vibro-Meter, Typ CA-607) zum Einsatz innerhalb der Fahrkammersysteme von Siedewasserreaktoren entwickelt.

Die Resonanzfrequenz des CA-607 beträgt 1,5 kHz. Diese für Beschleunigungsaufnehmer geringe Resonanzfrequenz ist durch den Aufbau des biaxialen Beschleunigungsdetektors begründet, der die geringe Baugröße ermöglicht. Um Frequenzanteile, die im Bereich der Resonanzüberhöhung liegen, auszufiltern, wird die Meßkette durch den Einsatz einer zusätzlichen Tiefpaßfilterstufe erweitert.

Die Temperatur, auf die der Detektor bei den Messungen im Reaktor erhitzt wird, ergibt sich aus der Umgebungstemperatur im Reaktor von ca. 280°C und der zusätzlichen Erwärmung durch die

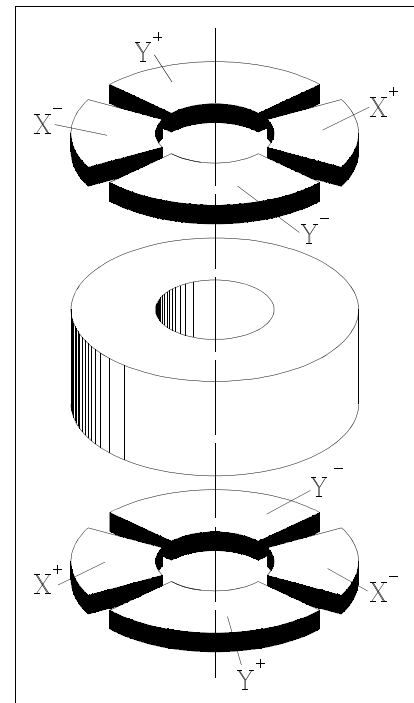


Bild 3.1: Piezoelektrischer Wandler

Einwirkung der γ -Strahlung. Für die Spaltkammern der Kerninstrumentierung wird die resultierende Einsatztemperatur mit max. 380° angegeben [5]. Die vom Hersteller angegebene zulässige Grenztemperatur für den kontinuierlichen Einsatz des CA-607 liegt mit 650°C deutlich über diesem Wert [47]. Im Bereich zwischen 300°C und 600°C ist eine Empfindlichkeitsabweichung von $+2\%$ bis $+12\%$ angegeben. Als Grenzwert der Fluenz, welcher der Detektor ohne Schädigung ausgesetzt werden kann, sind 10^{18} n/cm^2 angegeben. Bei einem Neutronenfluß von $10^{14}\text{ (n/cm}^2\text{)/s}$ im Reaktorkern wäre dieser Wert bereits nach 3 Stunden Meßzeit im Kern erreicht. Dies ist bei der Planung der Messungen zu berücksichtigen.

Der Aufnehmer soll einerseits leicht innerhalb des Fahrkammerrohres verschoben werden können und andererseits während der Messungen innerhalb der Instrumentierungslanzen möglichst fest an die Innenwand des Fahrkammerrohres angekoppelt sein. Hierfür wird auf dem Detektor ein Adaptionselement (Bilder 3.2, 3.3) montiert. Dieses Element ist so gestaltet, daß es beim Verschieben des Detektors, speziell in den Bögen der Fahrkammerrohre, eng am Detektor anliegt und so genügend Raum für Bewegungen des Detektors freigibt. Das Federelement stützt sich durch zwei Federbügel an der Rohrwand ab und drückt den Detektor an die gegenüberliegende Rohrwand. Die Enden des auswechselbaren Federelementes sind jeweils als geschlossener Ring ausgeführt. Das Adaptionselement wird auf den Detektor aufgeschoben und über eine Arretierungsschraube befestigt.

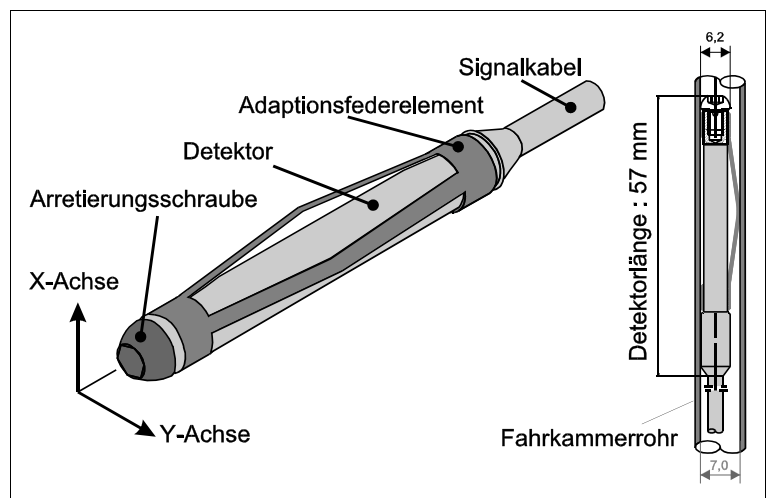


Bild 3.2: Aufbau des Beschleunigungsaufnehmers CA-607



Bild 3.3: CA-607 mit Adaptionselement

Innerhalb des Fahrkammersystems soll der Detektor mittels des Signalkabels eingeschoben und an ihm auch wieder herausgezogen werden. Das Signalkabel ist deshalb ein stabiles, fest mit dem Detektor verschweißtes, vieradriges Metallmantelkabel (Inconel) mit einer MgO -Isolierung und einem Außendurchmesser von 3 mm. Das Metallmantelkabel wird auf einer Kabeltrommel mit einem Durchmesser von 955 mm aufgewickelt. Das Kabel liegt geschützt in dafür vorgesehenen Rillen in der Oberfläche der Kabeltrommel. Durch einen umlaufenden Andruckriemen wird es auf einem Umschlingungswinkel von ca. 300° angedrückt. Die eingeschobene Kabellänge und damit die

Fahrstrecke des CA-607 wird an der Kabeltrommel über einen Wegstreckenzähler angezeigt. Zur Abschirmung ist an der Kabeltrommel eine Bleiflasche mit einer Wandstärke von 10 cm angebracht, in die der Detektor bei Entnahme aus dem Fahrkammerrohr eingeschoben wird. Bei Ein- und Ausfahren in das Fahrkammerrohr wird das Kabel durch eine speziell konstruierte Einschubvorrichtung gegen Knickung geschützt. Gleichzeitig gewährleistet diese Einschubvorrichtung auch das sichere und feste Greifen des glatten Metallmantelkabels beim Einschieben und Herausziehen [48].

Das Ausgangssignal des Sensors (Potentialdifferenz) wird mittels eines Ladungs-Strom-Wandlers mit integriertem Hochpaßfilter (Vibro-Meter: Typ IPC-629) in ein Stromsignal umgewandelt. Dies ist insbesondere für den Einsatz im Kraftwerk vorteilhaft, da die Orte der Signalentstehung und -aufzeichnung weit auseinander liegen und ein Stromsignal gegenüber Störeinflüssen, wie zum Beispiel magnetisch induktiven Einstreuungen, wesentlich unempfindlicher ist, als ein Spannungssignal. Gleichzeitig wird das Meßsignal mit einem Tiefpaßfilter oberhalb einer Frequenz von 600 Hz abgeschwächt, um die Auswirkungen des nichtlinearen Signalverhaltens im Bereich der Resonanzfrequenz des Detektors (1,5 kHz) zu eliminieren. Das Stromsignal wird am Aufzeichnungsort über einen Trennverstärker (Vibro-Meter: Typ GSI 130) in ein Spannungssignal umgewandelt, das als Meßgröße weiterverarbeitet werden kann. Die Meßempfindlichkeit des Beschleunigungsaufnehmers beträgt 2,0 pC/g. Der Ladungsverstärker hat eine Umsetzung von 50 $\mu\text{A}/\text{pC}$ und die GSI-Einheit von 1 V/mA. Die Gesamtempfindlichkeit der Meßkette beträgt somit 0,0102 V/(m/s²) .

3.3. Strahlungsdosimetrische Berechnung des Verfahrens

Bei Messungen im Reaktorkern werden die Detektormaterialien durch Neutronenstrahlung aktiviert. Für die Handhabung des Detektors ist diese Aktivierung von entscheidender Bedeutung. Die Berechnung der zu erwartenden Strahlungsleistung des Detektors und des Signalkabels dient deshalb als Grundlage für die Planung zur Durchführung der Messungen und das Ergreifen geeigneter Schutzmaßnahmen. Ziel ist es, die Dosisleistung, die vom Bedienpersonal bei Auf- bzw. Abbau des Meßsystems aufgenommen wird, zu minimieren und deutlich unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte zu halten.

Da der Beschleunigungsdetektor aufbauend auf einem bereits erprobten Detektortyp entwickelt wurde, waren die Detektormaterialien beim Prototyp bereits vorgegeben. Die verwendeten Werkstoffe, Lotmaterialien und der piezoelektrische Kristall des Beschleunigungsdetektors unterliegen dem Geschäftsgeheimnis des Herstellers. Für die Berechnung der zu erwartenden Aktivität werden deshalb nicht die verwendeten Materialien angegeben, sondern die aufsummierten Massen der einzelnen Legierungsbestandteile [49], nach ihren Ordnungszahlen sortiert, in Tabelle 1 aufgelistet. Mit Detektor ist hierbei stets die Kombination von Detektor, Adaptionselement und Arretierungsschraube gemeint.

Element	Symbol	Ordnungszahl	Detektor	Kabel
			Masse [g]	Masse [g/m]
Bohr	B	5	0,000849	0,00162
Kohlenstoff	C	6	0,028785	0,027
Sauerstoff	O	8	0,03973125	3,176
Magnesium	Mg	12	--	4,82
Aluminium	Al	13	0,06230725	0,081
Silicium	Si	14	0,0456865	0,135
Phosphor	P	15	0,0025945	0,0054
Schwefel	S	16	0,0020175	0,00405
Titan	Ti	22	0,0291	0,081
Vanadium	V	23	0,04185	--
Chrom	Cr	24	1,13095	4,185
Mangan	Mn	25	0,08907	0,27
Eisen	Fe	26	3,329896	2,09493
Kobalt	Co	27	0,3753	--
Nickel	Ni	28	3,661653	19,98
Kupfer	Cu	29	0,02232	0,135
Zirkonium	Zr	40	0,00099	--
Molybdän	Mo	42	0,0544	--
Palladium	Pd	46	0,005	--
Wolfram	W	74	0,486	--

Tabelle 1: Materialbestandteile des CA-607 und des Signalkabels

Die Berechnung der durch die Aktivierung erzeugten Strahlungsleistung der Detektormaterialien [50, 51, 52, 53] soll exemplarisch anhand des Nickelanteils dargestellt werden. Nickel verteilt sich auf die stabil vorliegenden Nickelisotope Ni-58 (68%), Ni-60 (26%), Ni-61 (1,1%), Ni-62 (3,6%) und Ni-64 (0,9%) [54]. Zur Vereinfachung werden Folgekerne der durch Aktivierung entstandenen Isotope nur berücksichtigt, wenn ihr Beitrag zur Gesamtaktivität größer als ein Promill ist. Somit können zur Berechnung der Aktivität die Folgekerne, die aus aktivierten Nickelisotopen entstehen, vernachlässigt werden. Es verbleiben nur die entstehenden Nickelisotope Ni-59, Ni-63 und Ni-65. Die Berechnung erfolgt für jedes Isotop nach der für die Entstehung von Nickel-65 dargestellten Differentialgleichung (18, 19).

$$\dot{N}_{Ni-65}(t) = -\lambda_{Ni-65} N_{Ni-65}(t) + \sigma_{Ni-64} \Phi_0 (N_{Ni-64,0} - N_{Ni-65}(t)) - \sigma_{Ni-65} \Phi_0 N_{Ni-65}(t) \quad (18)$$

$$\dot{N}_{Ni-65}(t) = (-\lambda_{Ni-65} - \sigma_{Ni-64} \Phi_0 - \sigma_{Ni-65} \Phi_0) N_{Ni-65}(t) + \sigma_{Ni-64} \Phi_0 N_{Ni-64,0} \quad (19)$$

mit	Ni-64	Ausgangsnuklid
	Ni-65	Folgenuklid
	N	Teilchenzahl
	t	Bestrahlungszeit im Reaktorkern
	σ	Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen
	Φ	Neutronenfluß im Reaktorkern = const. = 10^{14} 1/cm ² s
	λ	Zerfallszeitkonstante

Unter der Annahme des konstanten Neutronenflusses, ist $R(t) = \text{const} = R$ und daß zu Beginn der Bestrahlung keine Folgenuklide im Detektormaterial vorhanden sind, also $N_{Ni-65}(t=0) = 0$ ist, ergibt sich die Lösung der Differentialgleichung zu (20):

$$N_{Ni-65}(t) = \frac{\sigma_{Ni-64} \Phi_0 N_{Ni-64,0}}{\lambda_{Ni-65} - \sigma_{Ni-64} \Phi_0 + \sigma_{Ni-65} \Phi_0} (1 - e^{-(\lambda_{Ni-65} + \sigma_{Ni-64} \Phi_0 + \sigma_{Ni-65} \Phi_0) t}) \quad (20)$$

Die Aktivität S des Folgenuklids ergibt sich nach Gleichung (21) :

$$S_{Ni-65}(t) = \lambda_{Ni-65} \cdot N_{Ni-65}(t) \quad (21) \quad \text{mit} \quad \lambda_{Ni65} = \frac{\ln 2}{T_{1/2, Ni65}}$$

Nach einer Stunde im Reaktorkern bei einem Neutronenfluß von 10^{14} [1/cm²s] ergibt sich somit eine Anfangsaktivität des Nickel-59 von 13600 Bequerel im Detektormaterial, zuzüglich 74200 Bequerel je Meter Signalkabel, welches sich in der angegebenen Zeit im Reaktorkern befunden hat. Außerhalb des Kerns klingt die Aktivität der Nickel-65-Isotope mit t_1 als Zeitpunkt, bei dem der Detektor aus dem Kern ausgefahren wird, und $T = t - t_1$ als Abklingzeit des Detektors außerhalb des Reaktorkerns nach Beziehung (22) ab.

$$S_{Ni-65}(t + T) = S_{Ni-65}(t) e^{-\lambda_{Ni-65} T} \quad (22)$$

Die Ergebnisse der Berechnungen, bezogen auf eine 1-stündige Bestrahlung und anschließender 1-stündiger Abklingdauer außerhalb des Kerns, weisen die in Tabelle 2 aufgeführten Aktivitäten des Nickelanteils im Detektor aus.

Isotop	Anfangsaktivität nach 1-stündiger Bestrahlung		Aktivität nach anschl. 1-std. Abklingen	
	Detektor [Bq]	Kabel [Bq/m]	Detektor [Bq]	Kabel [Bq/m]
Ni-59	1,36e+04	7,42e+04	1,36e+04	7,42e+04
Ni-63	5,43e+06	2,96e+07	5,43e+06	2,96e+07
Ni-65	1,22e+10	6,68e+10	1,12e+10	6,10e+10
Summe	1,23e+10	6,69e+10	1,12e+10	6,10e+10

Tabelle 2: Aktivität des Nickelanteils des CA-607 und des Signalkabels nach Aktivierung im Kern

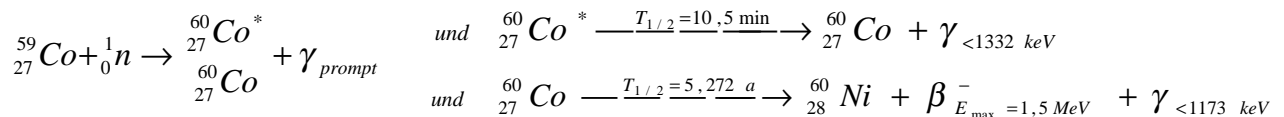
Nickel-63 und Nickel-65 sind Beta⁻ - Strahler mit einer maximalen Strahlungsenergie von 0,07 bzw. 2,0 MeV [54]. Nickel-59 ist ein Beta⁺ - Strahler, dessen freiwerdendes Positron mit einem Elektron der umgebenden Materie zerstrahlt. Pro Paarzerfall wird hierbei die Energie von 1,44 MeV freigesetzt. Um die Strahlungsleistung bei der Berechnung nach oben abzuschätzen, wurden stets die Maximalwerte der Beta⁻ - Strahlungsenergie verwendet. Damit ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Strahlungsleistungen der Nickelisotope im Detektormaterial.

Isotop	Strahlungsleistung nach 1-stündiger Bestrahlung		Strahlungsleistung nach anschl. 1-std. Abklingen	
	Detektor [MeV/s]	Kabel [(MeV/s)/m]	Detektor [MeV/s]	Kabel [(MeV/s)/m]
Ni59 (t)	1,96e+04	1,07e+05	1,96e+04	1,07e+05
Ni63 (t)	3,80e+05	2,07e+06	3,80e+05	2,07e+06
Ni65 (t)	2,45e+10	1,34e+11	2,24e+10	1,22e+11
Summe	2,45e+10	1,34e+11	2,24e+10	1,22e+11

Tabelle 3: Strahlungsleistung des Nickelanteils des CA-607 und des Signalkabels nach Aktivierung im Kern

Nach diesen Beziehungen wurde die Aktivierung der Detektormaterialien, mit Ausnahme des Kobaltanteils, und die entstehende Strahlungsleistung berechnet. Auftretende n, α Reaktionen des Bohranteils konnten vernachlässigt werden, da dieses Element nur innerhalb des Detektors und nicht im Gehäuse vorhanden ist. Die entstehenden Alpha Teilchen verlassen den Detektor nicht. Ihre kinetische Energie wird im Detektor in Wärmeenergie umgewandelt.

Im Unterschied zu den vorangegangenen Nukliden treten bei der Aktivierung des Kobaltanteils (Co-59) mit thermischen Neutronen zwei konkurrierende Prozesse auf. Dies trifft zwar auch für einige andere der hier behandelten Isotope zu, konnte aber dort aufgrund kurzer Halbwertzeiten, kleiner Teilchenzahlen oder Wirkungsquerschnitte vernachlässigt werden. Für die Aktivierung des Co-59 ist eine derartige Vereinfachung nicht zulässig, da der resultierende Fehler zu groß wäre. Natürliches Kobalt besteht zu 100% aus Co-59. Co-59 wird durch Neutroneneinfang zu Co-60 oder Co-60* aktiviert, wobei der Stern (*) den angeregten Zustand des Nuklids kennzeichnet. Dabei finden folgende Kernreaktionen statt :



Im folgenden steht der Index m für den angeregten Zustand und Index g für den Grundzustand. Für die Berechnung wird angenommen, daß die Zahl der entstehenden Folgekerne, gegenüber der Zahl der Kerne des Ausgangsnuklides, sehr gering ist und somit die Teilchenzahl des Ausgangsnuklides konstant bleibt. Außerdem kann die Reduzierung von Co-60 und Co-60* durch erneute Aktivierung im Reaktorkern vernachlässigt werden. Aus dem Zerfallsgesetz ergeben sich die folgenden gekoppelten Differentialgleichungen (23) und (24):

$$\dot{N}_m(t) = -\lambda_m N_m(t) + \sigma_m \Phi_0 N_{\text{Co-59}} \quad (23)$$

$$\dot{N}_g(t) = -\lambda_g N_g(t) + \lambda_m N_m(t) + \sigma_g \Phi_0 N_{\text{Co-59}} \quad (24)$$

mit	$N_m(t)$	Anzahl der Co-60* Kerne im Detektor
	$\sigma_g(t)$	Reaktionsrate für die Aktivierung von Co-60 [s^{-1}]
	σ_m	Reaktionsrate für die Aktivierung von Co-60* [s^{-1}]
	$N_g(t)$	Anzahl der Co-60 Kerne im Detektor
	$\lambda_g = 4,16 \cdot 10^9 s^{-1}$	Zeitkonstante für den Zerfall von Co-60
	$\lambda_m = 1,1 \cdot 10^3 s^{-1}$	Zeitkonstante für den Zerfall von Co-60*

Dann ist die Lösung der Differentialgleichungen für den Zeitraum, in dem sich der Detektor im Reaktorkern befindet, (25) und (26):

$$N_m(t) = \frac{\sigma_m \Phi_0 N_{Co-59}}{\lambda_m} (1 - e^{-\lambda_m t}) \quad (25)$$

$$N_g(t) = \frac{\Phi_0 N_{Co-59}}{\lambda_g} (\sigma_g + \sigma_m - (\sigma_g - \frac{\lambda_m \sigma_m}{\lambda_g - \lambda_m}) e^{-\lambda_g t} - \frac{\lambda_g \sigma_m}{\lambda_g - \lambda_m} e^{-\lambda_m t}) \quad (26)$$

Außerhalb des Reaktorkerns, ohne Einwirkung des Neutronenflusses, wird $R(t) = 0$. Daraus ergibt sich die Anzahl der aktivierten Kobaltkerne nach der Abklingzeit T zu:

$$N_m(T) = N_m(t_1) e^{-\lambda_m T} \quad (27)$$

$$N_g(T) = N_g(t_1) - \frac{\lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} N_m(t_1) e^{-\lambda_g T} + \frac{\lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} N_m(t_1) e^{-\lambda_m T} \quad (28)$$

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlungsleistung sind in Bild 3.4 für die Aktivierung der Detektormaterialien und in Bild 3.5 für die Materialien des Signalkabels dargestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Gesamtaktivität des Signalkabels mit der Länge, die sich innerhalb des Reaktors befunden hat (max. 4 m), linear ansteigt. Zusätzlich sind jeweils für fünf unterschiedliche Aktivierungsdauern die Abklingverläufe dargestellt.

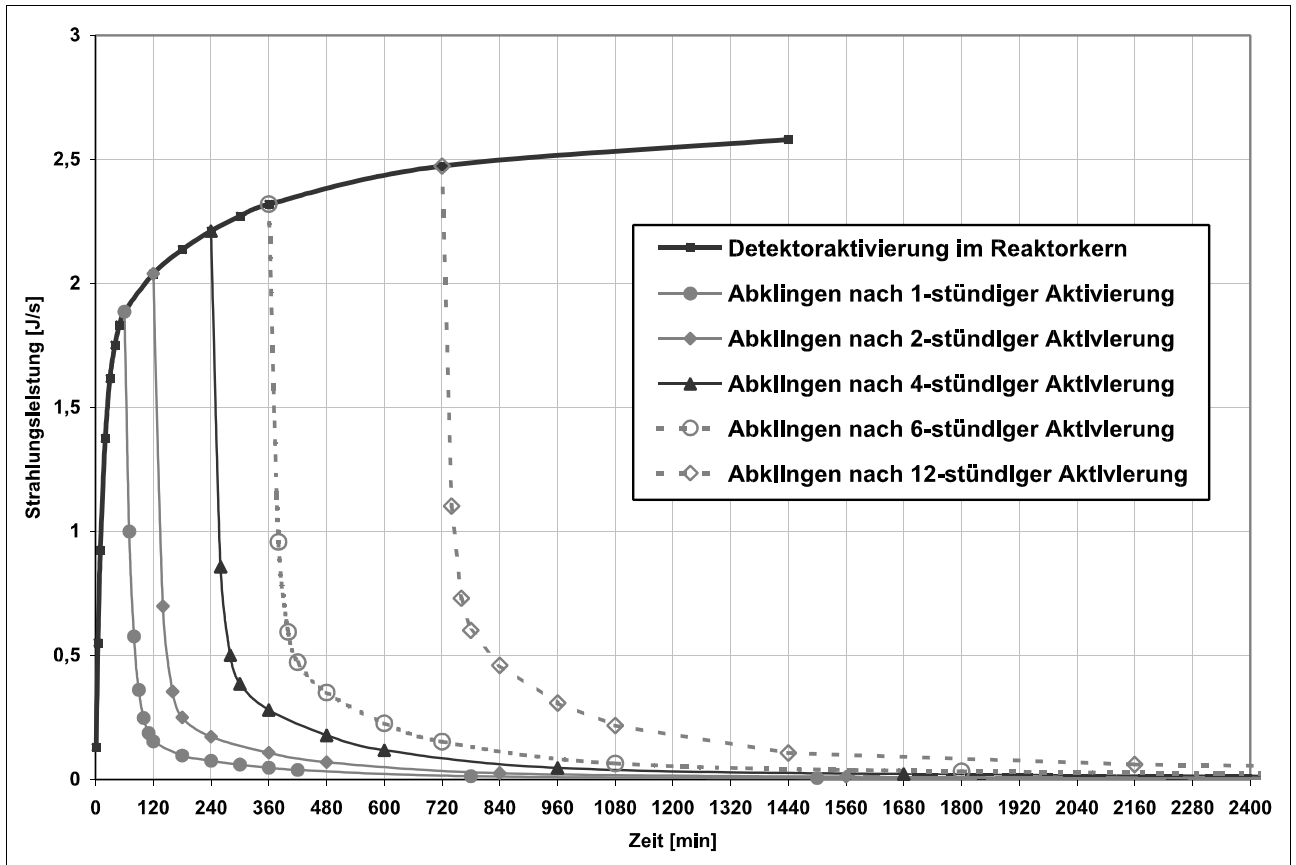


Bild 3.4: Aktivierungs- und Abklingverläufe des Beschleunigungsdetektors CA-607

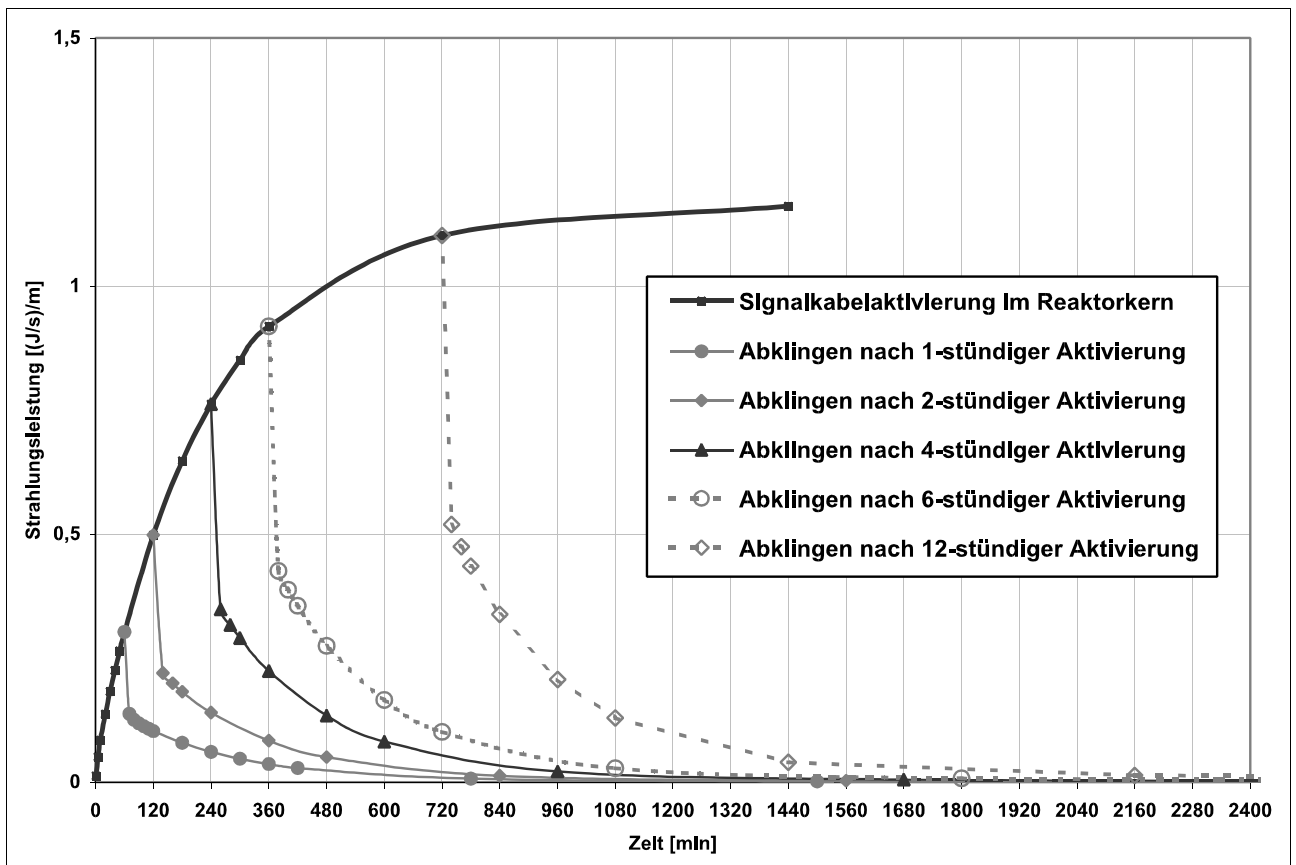


Bild 3.5: Aktivierungs- und Abklingverläufe des Signalkabels

Aus diesen Ergebnissen läßt sich die durch das Bedienpersonal beim Umgang mit dem Detektor empfangene Äquivalenzdosis direkt errechnen. Detektor und Kabel werden hierfür als punktförmige Strahlenquelle angesehen. Für eine Abschätzung nach oben wird die Abschwächung der Strahlung in Luft vernachlässigt und angenommen, daß die gesamte auftreffende Strahlungsenergie im Körper absorbiert wird. Die empfangene Energiedosis (D) ergibt sich als Quotient der absorbierten Strahlungsenergie (ΔW) und der Masse (m) der bestrahlten Person. Die bestrahlte Person wird mit einer Körpergröße von 1,80 m, einem Gewicht von 80 kg und einer bestrahlten Frontfläche von 0,5 m² angesetzt. Aus der Strahlungsleistung (P), dem mittleren Abstand (r) zwischen Detektor und Bedienpersonal und der Aufenthaltszeit (t) folgt die Energiedosis zu [55]:

$$D = \frac{\Delta W}{m} = \frac{\frac{1}{8} \pi r^2 P t}{80} \quad (29)$$

Nach 4-stündiger Aktivierung des Detektors und 2 m Signalkabel, ergibt sich nach einer Abklingzeit von 24 Stunden eine Strahlungsleistung von 0,034 [J/s]. Wird der mittlere Abstand zwischen Detektor und Bedienpersonal bei Umbau und Transport mit 0,5 m angesetzt, so folgt daraus eine Energiedosisleistung von 0,15 [Gray/h]. Der für die Berechnung der Äquivalenzdosis in lebendem Gewebe erforderliche Qualitätsfaktor (Q) für die hier auftretende β - und γ -Strahlung kann gleich 1 gesetzt werden [56, 57]. Daraus resultiert eine Äquivalenzdosisleistung von 0,15 Sievert pro Stunde, wovon rund 70 % von den Detektormaterialien abgestrahlt werden. Der übliche Grenzwert der Personentagesdosis der Kernkraftwerke Gundremmingen von 0,001 Sievert (1 mSv) wäre somit nach 24 Sekunden erreicht.

Die Strahlungs-dosis läßt sich durch eine längere Abklingzeit vor Entnahme des CA-607 aus dem Fahrkam-mersystem erheblich redu-zieren (Bild 3.6). So fällt in einer Abklingzeit von 7 Ta-gen die Personendosis um weitere 84 % ab. In diesem Zeitraum kann der Detektor zunächst innerhalb der Blei-strecke des Fahrkam-ersystems bleiben (vgl. Bild 2.4). Auch bei einer Mini-mierung der Aufenthalts-

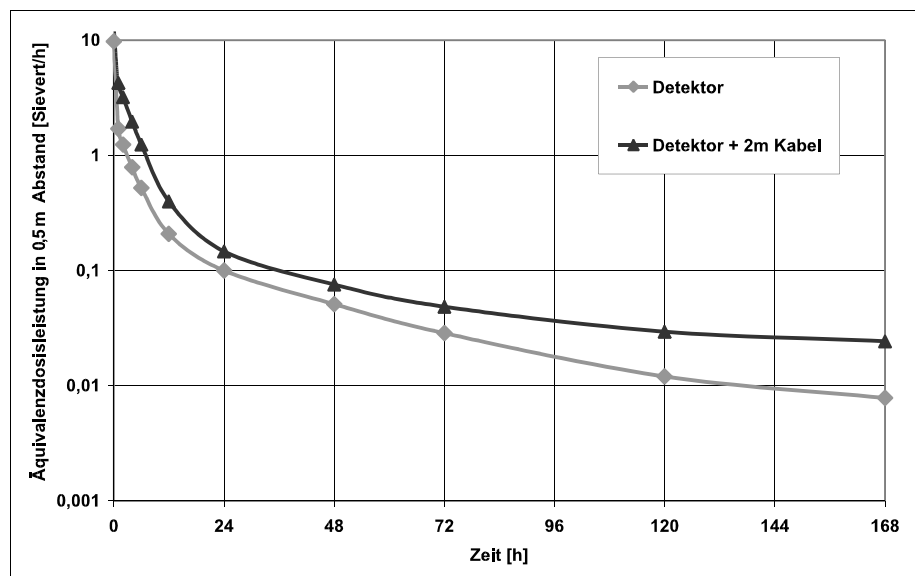


Bild 3.6: Abklingverlauf der Äquivalenzdosisleistung für Personen im Abstand von 0,5 m zum Beschleunigungsdetektor nach 4-stündiger Aktivierung der Detektormaterialien

dauer des Bedienpersonals im Bereich des Detektors ist die Dosisleistung sowohl für den Umbau zwischen den Fahrkam-mersystemen als auch für den Transport zwischen den vier Fahrkam-merräu-

men beider Reaktorblöcke zu hoch. Zur weiteren Reduzierung der Dosis wird der Detektor deshalb bei der Entnahme aus dem Fahrkammersystem sofort in eine 10 cm dicke Bleiabschirmung (Bleiflasche) verbracht, die an der Kabeltrommel befestigt ist. Beim Transport werden 2 m lange Traggriffe an der Kabeltrommel montiert, um den Abstand des Personals zu Detektor und Kabel zu vergrößern.

Eine wesentliche Reduzierung der Personendosis des Bedienpersonals ist durch die Auswahl der verwendeten Materialien möglich. Die Strahlungsleistung des Detektors und des Signalkabels kann durch die konsequente Vermeidung derjenigen Materialien, die im Neutronenfluß besonders stark aktiviert werden, minimiert werden. Da die Entwicklung des CA-607 auf einem bestehenden Beschleunigungsaufnehmer aufbaute, der im Einsatz in radioaktiven Umgebungen erprobt ist, konnte diese Optimierung beim Prototyp nicht erfolgen. Ein weiterentwickelter Detektor sollte bezüglich der Minimierung der Strahlungsleistung, und damit der vom Bedienpersonal aufgenommenen Strahlendosis, optimiert werden.

Zu diesem Zweck wurden die anteiligen Aktivitäten der Materialien einzeln berechnet. Bild 3.7 zeigt im oberen Teil die absoluten Beiträge der einzelnen Materialien zur Gesamtstrahlungsleistung des Detektors für die Zeit einer 4-stündigen Aktivierung im Reaktorkern mit anschließendem 12-stündigem Abklingen. Im unteren Diagramm von Bild 3.7 sind die Anteile an der jeweiligen Gesamtstrahlungsleistung prozentual aufgetragen. Die Elemente, die einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtstrahlungsleistung beitragen, sind im Bild gesondert hervorgehoben.

Der auffällig hohe Strahlungsanteil des Kobalt in den ersten sechs Stunden, ist auf das schnell abklingende Kobalt 60 im angeregten Zustand zurückzuführen. Durch Vermeidung von Wolfram und Mangan im Detektormaterial, z.B. durch Verwendung eines anderen Materials für die seismische Masse bzw. manganfreier Legierungen, ließe sich die Aktivität des Detektors für den hier dargestellten Fall nach 12-stündigem Abklingen um 92 %, bei zusätzlicher Vermeidung von Chrom, Vanadium, Kobalt, Nickel und Kupfer um 99,6 % reduzieren.

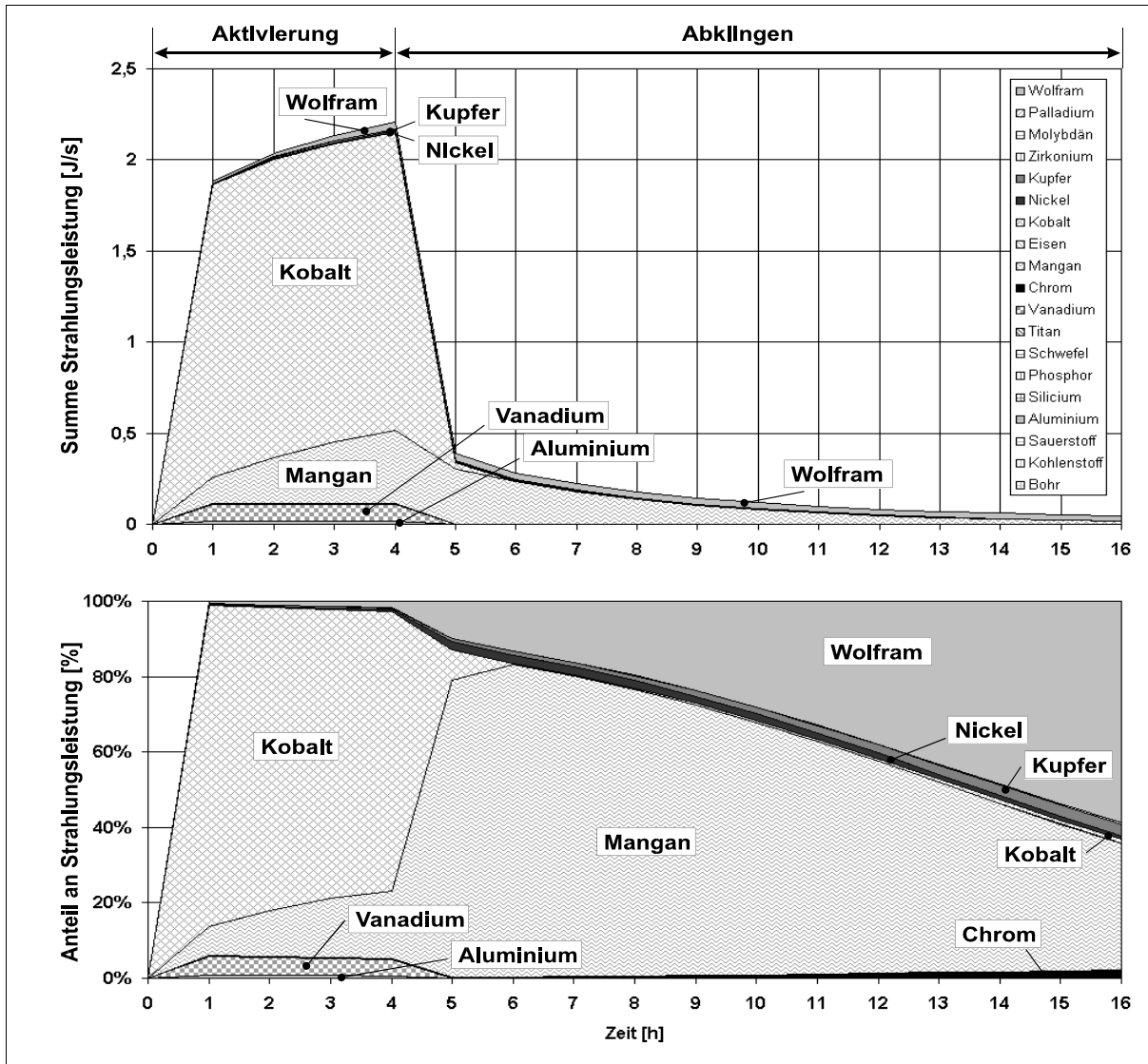


Bild 3.7: Zeitlicher Verlauf der anteiligen Strahlungsleistung der Materialbestandteile des CA-607

Durch Vermeidung von Kupfer, Nickel, Mangan und Chrom ließe sich die Strahlungsleistung des Detektorkabels für denselben Aktivierungs- und Abklingverlauf um 99,93 % reduzieren (Bild 3.8).

Mit zunehmender Abklingzeit des Detektors und des Signalkabels sinkt die Anzahl der Elemente, die einen wesentlichen Beitrag zur Strahlungsleistung beitragen. Bild 3.9 zeigt für fünf Zeitpunkte eines einjährigen Abklingverlaufs, die nach Elementen aufgeschlüsselte Strahlungsleistung von Detektor und Signalkabel. Bereits nach einer Woche tragen nur noch Chrom, Kobalt und Wolfram und nach einem Monat nur noch Chrom und Kobalt wesentlich zur Gesamtstrahlungsleistung bei.

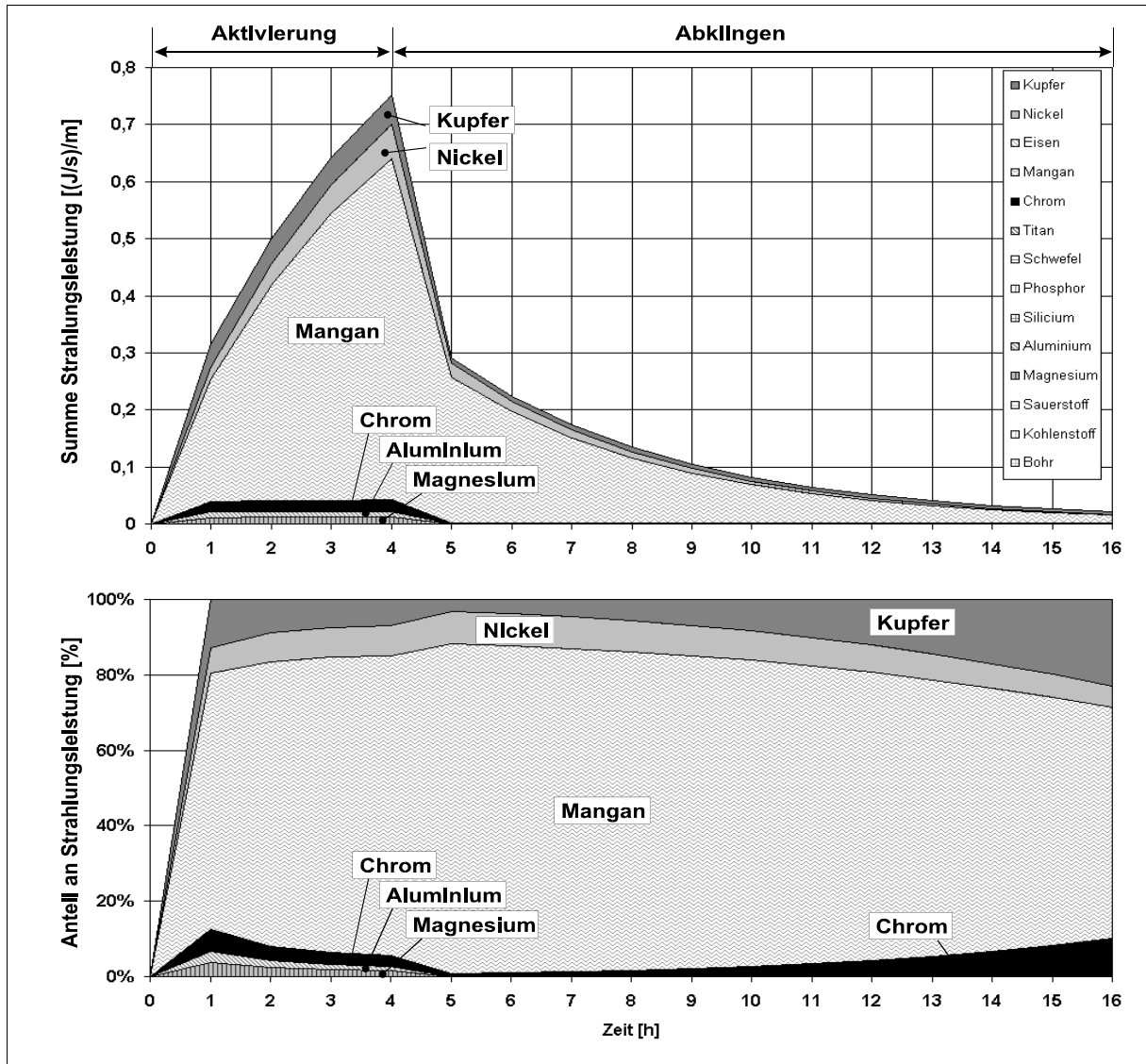


Bild 3.8: Zeitlicher Verlauf der anteiligen Strahlungsleistung der Materialbestandteile des Signalkabels

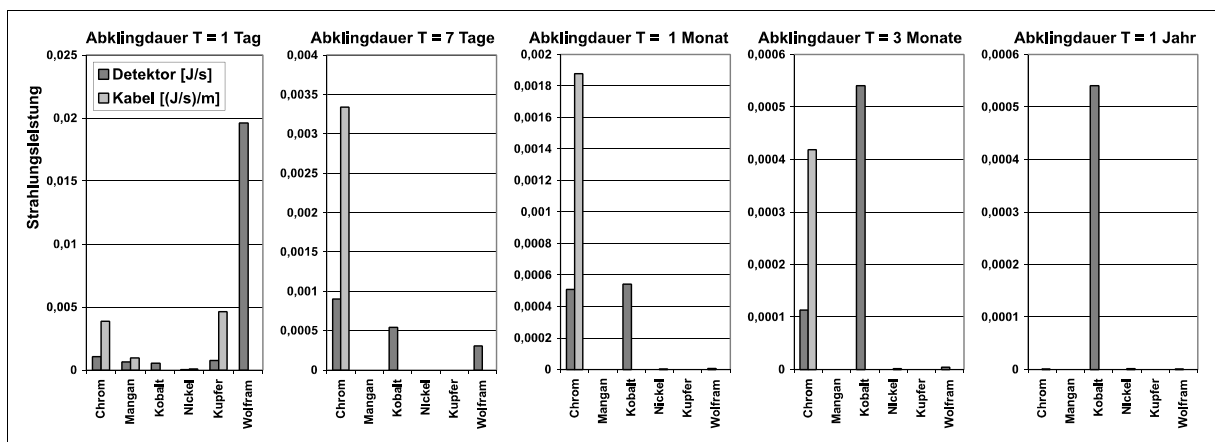


Bild 3.9: Anteilige Strahlungsleistungen der Materialbestandteile des CA-607 und des Signalkabels

3.4. Funktionsüberprüfung des Adaptionselementes und Nachweis der praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens

Da die Fahrkammer der Kalibrierung des LVD-Systems dient, wird das Fahrkammersystem der betrieblichen Leittechnik zugeordnet [4]. Vor dem Einsatz des CA-607 im Kraftwerk muß überprüft werden, ob das geplante Einschleiben des Detektors in das Fahrkammerrohr möglich ist und ob sicher gestellt ist, daß der Detektor unter allen Umständen wieder entnommen werden kann. Zur Qualifikation des Meßverfahrens wurde deshalb zunächst die Verschiebbarkeit des Detektors innerhalb des Fahrkammersystems nachgewiesen. Darüber hinaus wurde überprüft, ob für die geplanten Schwingungs- und Körperschalluntersuchungen eine ausreichend steife Ankopplung des Detektors an das Fahrkammerrohr durch das Adaptionselement gegeben ist.

Zur Überprüfung der ausreichenden Ankopplung wurde der verschiebbliche Beschleunigungsdetektor CA-607 in das Prüfrohr des in Bild 3.10 dargestellten Versuchsaufbaus eingeschoben [58]. Das 1,5 m lange Rohrstück entspricht in seinen radialen Abmessungen dem Fahrkammerrohr. Mittels eines Elektromagneten kann dieses Rohr, über ein auf ihm montiertes Zwischenstück aus ferromagnetischem Material, zu Schwingungen angeregt werden. Der Strom, der den Magneten speist, wird einem Frequenzgenerator mit nachgeschaltetem, regelbarem Leistungsverstärker entnommen, wodurch Amplitude und Frequenz der Rohrschwingung variabel einstellbar sind. Die Anregungseinheit ist radial zum Rohr verschiebbar und kann in Winkelteilungen von 45° um das Rohr geschwenkt werden. Zusätzlich kann der Schwingung über einen drehzahlregulierten Elektromotor mit Excenter und Pleul (nicht dargestellt) eine zweite Schwingung mechanisch überlagert werden.

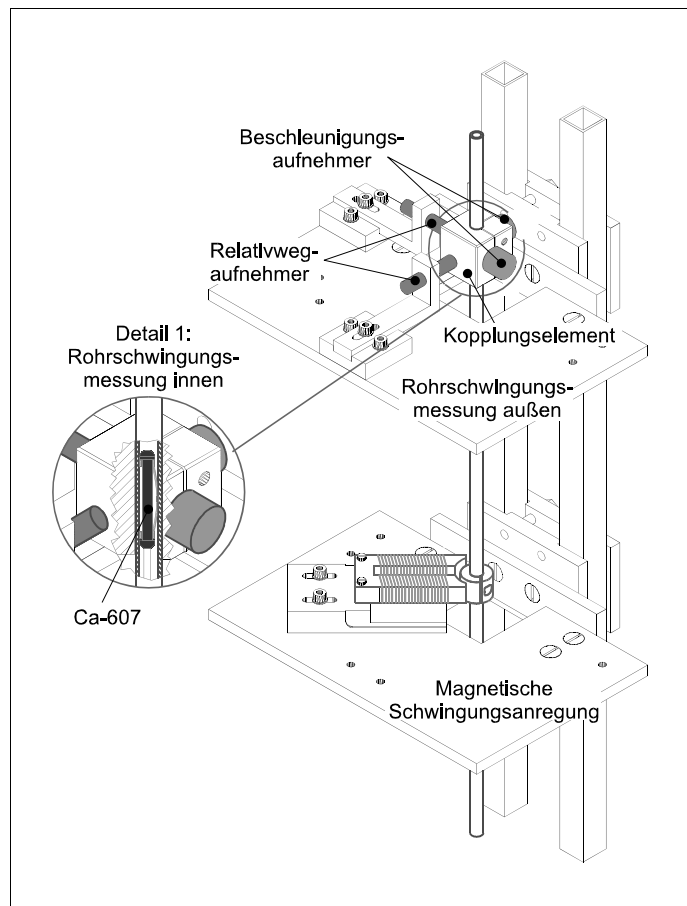


Bild 3.10: Versuchsstand zum Nachweis der Ankopplung des CA-607 an das Fahrkammerrohr

Die mit dem CA-607 gemessenen Rohrbeschleunigungen werden zunächst mit den Beschleunigungssignalen verglichen, die von zwei, auf der Außenseite des Rohres positionierten Beschleunigungsaufnehmern gemessen werden. Diese piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer sind im rechten Winkel zueinander über ein Kopplungsstück fest mit dem Rohr verschraubt.

Bei der Auswertung der Signale des CA-607 soll aus den Beschleunigungsamplituden auch der Schwingweg ermittelt werden. Der Schwingweg des Rohres wird dafür zusätzlich außen von zwei im rechten Winkel zueinander angeordneten Relativwegaufnehmern gemessen. Aus den Meßwerten des Beschleunigungsaufnehmers wird durch zweimalige Integration die Schwingungsamplitude errechnet. Die so ermittelte Amplitude wird zur Überprüfung der Software mit den durch die Relativwegaufnehmer gemessenen Auslenkungen des Rohres verglichen.

Die Relativwegaufnehmer arbeiten nach dem Wirbelstromverfahren. Bei diesem berührungslos arbeitenden Verfahren wird durch eine wechselstromdurchflossene Spule (Detektor) ein Magnetfeld erzeugt, welches in dem gegenüberliegenden Prüfkörper, aus elektrisch leitendem Material, Wirbelströme induziert. Hierdurch wird ein sekundäres Magnetfeld erzeugt, welches die Induktivität der Spule verändert. Eine Anpasseinheit versorgt den Sensor mit einem hochfrequenten (HF) Wechselstrom. Anpasseinheit und Detektor bilden zusammen einen HF-Schwingkreis. Abhängig vom Abstand des Aufnehmers zum Prüfkörper, wird dieser Schwingkreis durch die Rückwirkung des Sekundärfeldes mehr oder weniger gedämpft. Der sog. Meßkanal versorgt den Schwingkreis mit der benötigten elektrischen Leistung und gibt das Maß der Dämpfung und somit des Abstandes von Detektor und Prüfkörper als Spannungssignal aus [42, 59, 60, 61]. Für die Ausbildung des Sekundärfeldes bei der Abstandsmessung nach dem Wirbelstromverfahren ist eine Mindestmaterialstärke des Prüfkörpers von 10 mm erforderlich. Da die Wandstärke des Prüfrohrs hierfür nicht ausreicht, ist ein Metallblock formschlüssig auf dem Rohr montiert, welcher auch als Montagesockel für die äußeren Beschleunigungsaufnehmer dient. Um eine Beeinflussung der Meßtechnik durch das Magnetfeld der Anregungseinheit zu vermeiden, sind die Sensoren in einer zweiten Einheit (räumlich getrennt von der Anregungseinheit) zusammengefaßt.

Für die Messungen wurden die Meßachsen des CA-607 zunächst so ausgerichtet, daß sie mit den Meßachsen der an der Außenseite des Testrohres angebrachten Beschleunigungs- und Relativwegaufnehmer übereinstimmten. Hierdurch konnten die Signale des CA-607 direkt mit den Signalen der Referenzsensoren verglichen werden. Der Meßrichtung von 45° (225°) sind der X-Kanal des CA-607 (CAX), der Beschleunigungsaufnehmer (BA1) und der Relativwegaufnehmer (RW1) zugeordnet. Entsprechend messen der Y-Kanal des CA-607 (CAY), der BA2 und der RW2 die Beschleunigungen bzw. Auslenkungen des Rohres unter 135° (315°). Die Ankopplung des CA-607 an das Testrohr durch das Adaptionselement wird im niederfrequenten Bereich durch den Vergleich des Signalverlaufes je eines der fest adaptierten Beschleunigungsaufnehmer mit der jeweils entsprechenden Meßachse des CA-607 überprüft. Bei ausreichend steifer Ankopplung sind die Signalverläufe annähernd identisch.

Bild 3.11 zeigt die Zeitsignale der Beschleunigungsaufnehmer einer mit 10 kHz abgetasteten Messung, bei der das Testrohr zu einer 34 Hz-Schwingung angeregt wurde. Die sehr hohe Übereinstimmung zwischen den Signalen bei dieser Schwingung resultiert aus der steifen Ankopplung zwischen Rohr und Detektor durch das Adaptionselement.

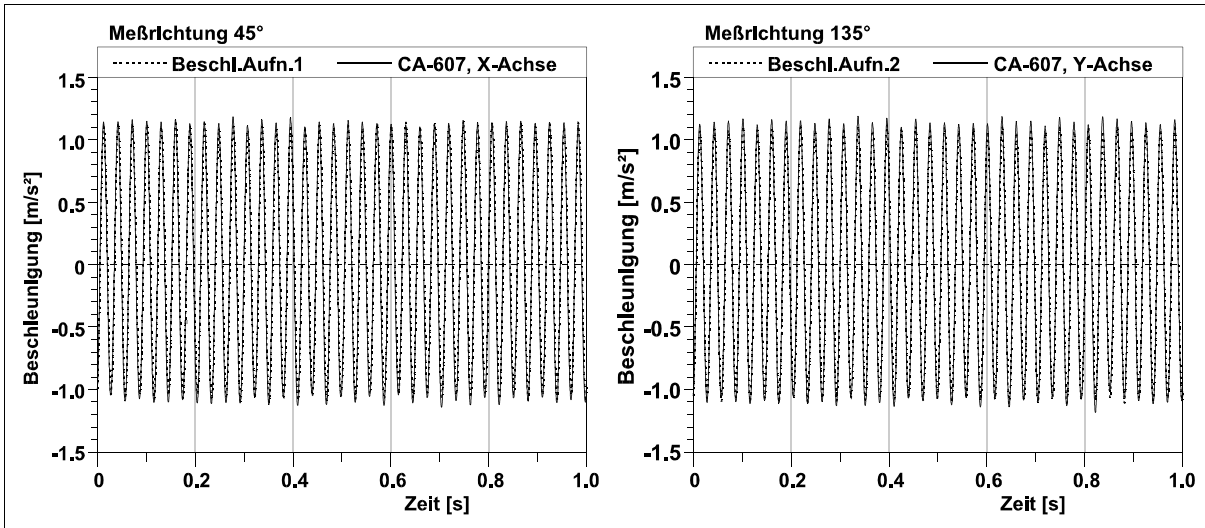


Bild 3.11: Vergleich der außen am Prüfröhr gemessenen Beschleunigungssignale mit den im Fahrkammerrohr gemessenen Signalen

Die Verarbeitung der Zeitsignale zur Berechnung der Schwingungsamplituden zeigt Bild 3.12 am Beispiel des Signals eines der äußeren Beschleunigungsaufnehmer (Bild 3.12.I.) der oben gezeigten Messung.

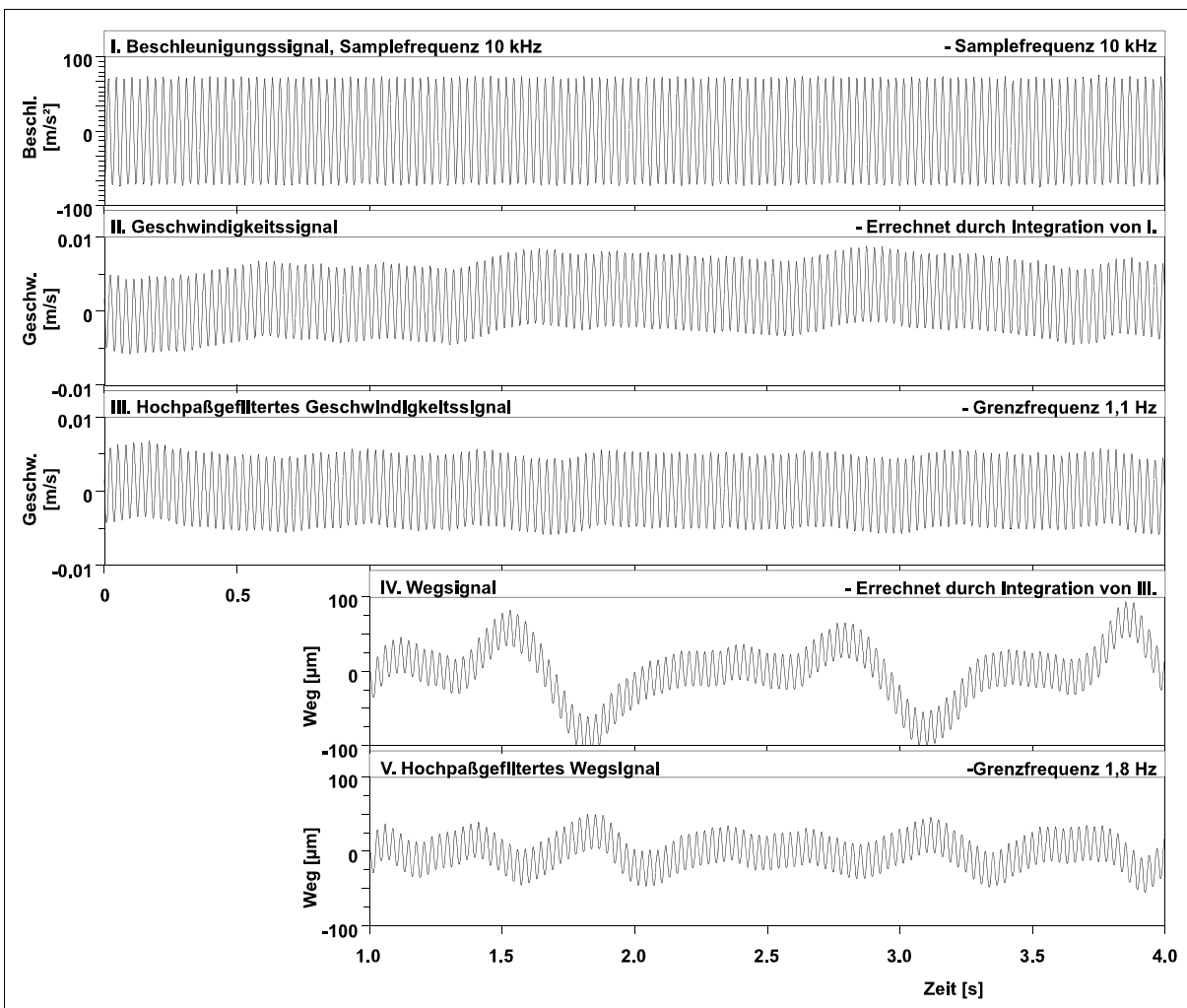


Bild 3.12: Integration eines Beschleunigungszeitsignals zum Wegsignal

Darunter (Bild 3.12.II.) ist der zeitliche Verlauf des Signals nach einmaliger Integration, das Geschwindigkeitssignal, dargestellt. Bedingt durch im Signal enthaltene DC-Anteile, die unbekanntes Integrationsgrenzen sowie die Stufigkeit des gesampelten Signals werden bei der Integration niederfrequente Anteile mit in das Signal eingerechnet. Eine anschließende digitale Hochpaßfilterung, mit einer Grenzfrequenz von 1,1 Hz, reduziert diese niederfrequenten Anteile und führt zu dem in der dritten Zeile wiedergegebenen Geschwindigkeitssignal. Die niederfrequenten Störanteile sind stark abgeschwächt, aber im Bereich von 0 bis 0,5 Sekunden ist der Einschwingvorgang des Filters deutlich zu erkennen.

Ein Vergleich der Amplituden im gefilterten und ungefilterten Signal zeigt bei einer "Peak to Peak"-Betrachtung sehr gute Übereinstimmungen. Um das Einschwingen des Filters nicht mit aufzuintegrieren, wird vor der zweiten Integration der Bereich des Signals von 0-1 Sekunde abgeschnitten. Das so errechnete Wegsignal ist in der vierten Zeile (Bild 3.12, IV) dargestellt. Wie bereits nach der ersten Integration treten auch hier niederfrequente Anteile auf, die im Vergleich zur Amplitude des eigentlichen Signals noch stärker ausfallen als zuvor. Eine Hochpaßfilterung des errechneten Wegsignals mit einer Grenzfrequenz von 1,8 Hz führt zu einem Signalverlauf, wie er unten im Bild dargestellt ist. Die niederfrequenten Anteile sind zwar stark reduziert, treten aber noch deutlich hervor. Um diese zu eliminieren, wären höhere Grenzfrequenzen bei den Hochpaßfilterstufen nach den Integrationen notwendig. Da aber bei Messungen im Kraftwerk Schwingungen ab ca. 2 Hz erwartet werden, würde ein Heraufsetzen der Grenzfrequenzen zu nicht tolerierbaren Verlusten und dadurch zur Verfälschung der Signalinhalte führen.

In Bild 3.13 sind die aus den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer errechneten Schwingwege den von den Relativwegaufnehmern gemessenen Wegen gegenübergestellt. Abgesehen von den überlagerten niederfrequenten Signalanteilen zeigt ein Amplitudenvergleich, jeweils für die Signale einer Meßrichtung, sehr gute Übereinstimmungen.

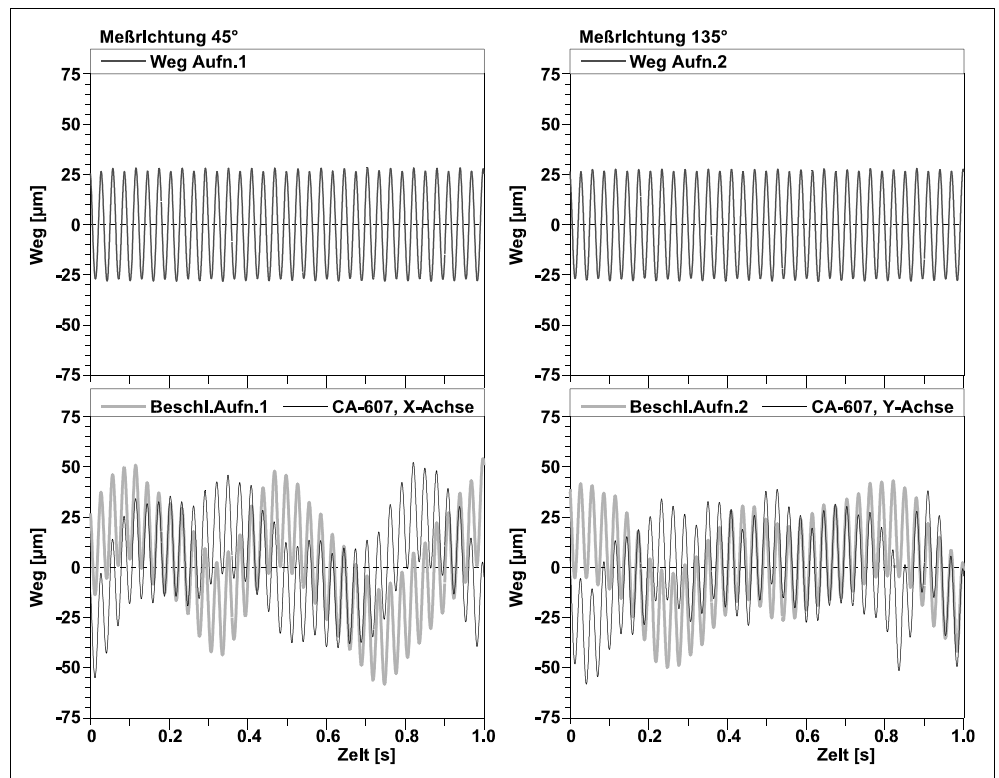


Bild 3.13: Vergleich der gemessenen Schwingwege mit den aus den Beschleunigungssignalen errechneten Wegamplituden

Beschleunigungen, die nicht exakt in Richtung einer Meßrichtung des CA-607 verlaufen, teilen sich auf die Meßachsen des CA-607 auf. Die Schwingungsamplitude muß somit aus beiden Signalen rekombiniert werden. Der Betrag der Gesamtamplitude bei den vorliegenden, paarweise orthogonal zueinander angeordneten Meßachsen der Beschleunigungsaufnehmer, resultiert aus der Vektoraddition der Einzelsignale. Der aus der Betragsbildung resultierende Verlust der Information der Schwingungsausrichtung, relativ zu den Meßachsen des CA-607, ist nur von geringer Bedeutung, da bei den Messungen in den Lanzen die Ausrichtung der Meßachsen des CA-607 nicht bekannt ist. Bild 3.14 stellt die durch die beiden außen auf dem Rohr montierten Beschleunigungsaufnehmer BA1 und BA2 gemessenen Zeitsignale einer 24 Hz-Rohrschwingung den Signalen der X- und Y-Achse des im Rohr positionierten CA-607 gegenüber. Bei einer Peak to Peak Amplitude von 1,15 m/s² für BA1, 1,3 m/s² für BA2, 0,7 m/s² für CAX und 1,6 m/s² für CAY ergeben sich Gesamtamplituden von 1,73 m/s² bzw. 1,74 m/s².

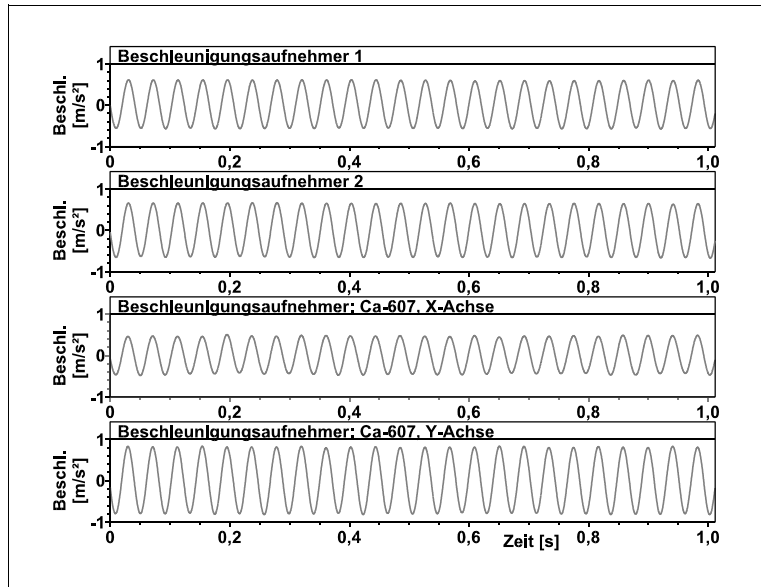


Bild 3.14: Messung mit unterschiedlicher Ausrichtung der Meßachsen der Aufnehmerpaare

Auch bei ungleichmäßigen Schwingungen, die sich jeweils auf die beiden Achsen der Beschleunigungsaufnehmer aufteilen, führt diese Vektoraddition zu korrekten Ergebnissen. In diesem Fall müssen die gesampelten Beschleunigungswerte einzeln vektoriell aufaddiert werden.

Als Ergebnis ergibt sich der unten in Bild 3.15 dargestellte Betrag des Gesamtbeschleunigungssignals, jeweils für die Signa-

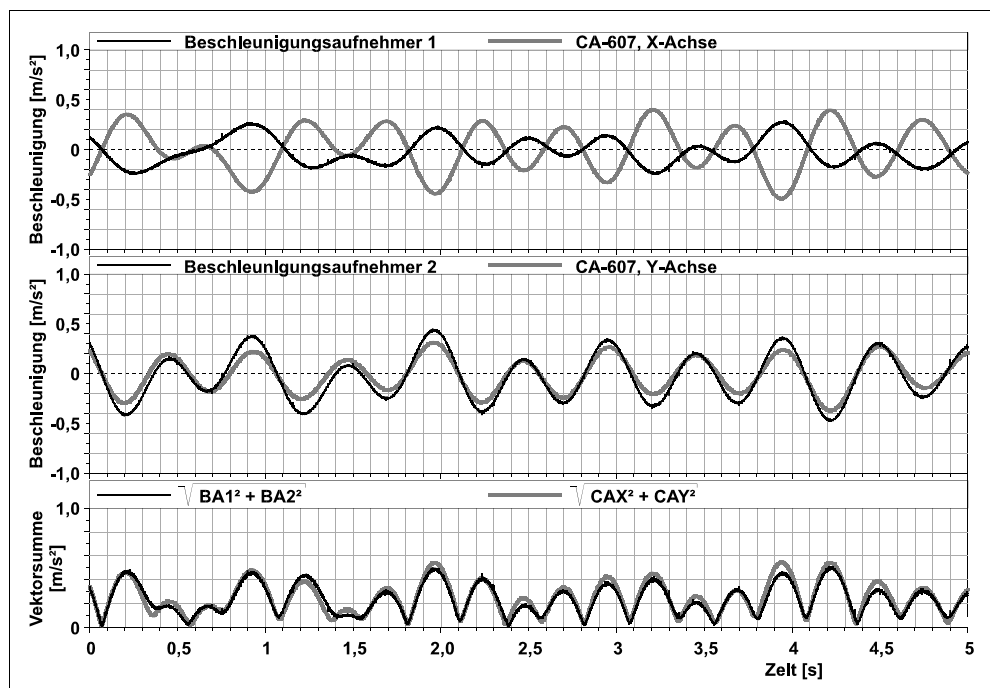


Bild 3.15: Messung einer Rohrschwingung mit unterschiedlicher Ausrichtung der Meßachsen der Beschleunigungsaufnehmerpaare

le des CA-607 und der äußeren Beschleunigungsaufnehmer.

Ebenso läßt sich so die ausreichende Ankopplung des CA-607 bei einer stoßartigen Auslenkung des Fahrkammerrohres, wie sie zum Beispiel bei einem Anschlag zwischen der Lanze und umgebenden Strukturelementen auftreten würde, nachweisen (Bild 3.16)

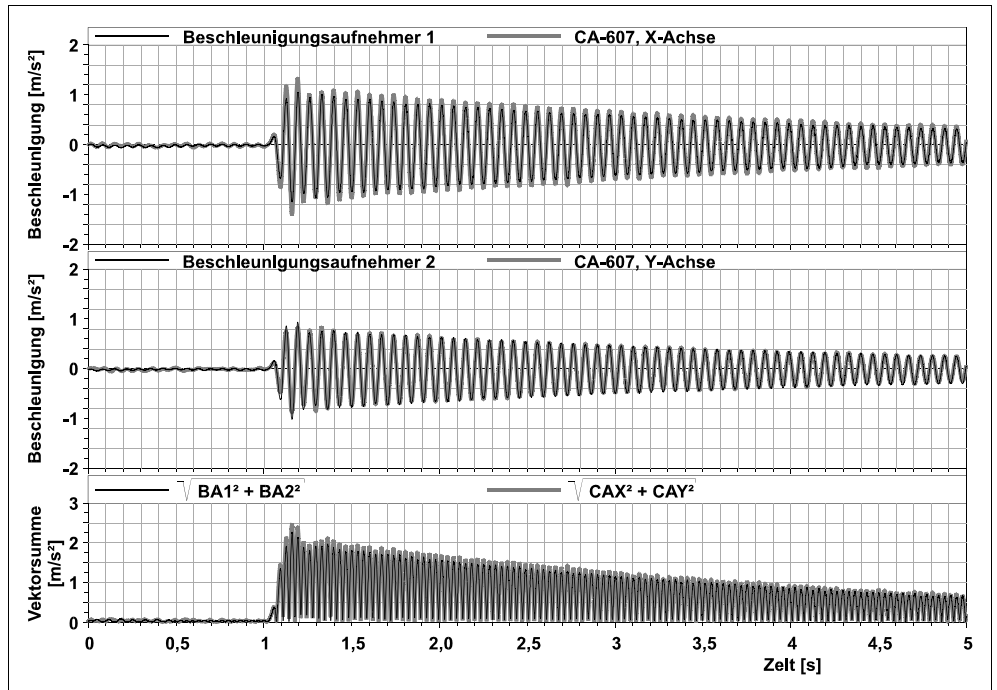


Bild 3.16: Beschleunigungsmessung einer stoßartigen Rohrauslenkung

Bei der Frequenzbereichsanalyse der zuvor untersuchten Rohrschwingung zeigen die ASLD der Signale einer niederfrequent abgetasteten Messung neben der Hauptschwingung bei 34 Hz, zahlreiche weitere Schwingungen

(Bild 3.17). Hierbei handelt es sich um die erste Subharmonische der 34 Hz-Schwingung bei 17 Hz und einige Strukturresonanzen des Versuchstandes, die aber gegenüber der 34 Hz-Schwingung so geringe Amplituden aufweisen, daß sie im Zeitsignal nicht zu erkennen sind.

Das Signal des CA-607 weist über den gesamten untersuchten Frequenzbereich einen Rauschuntergrund nahezu konstanter Amplitude auf. Dagegen

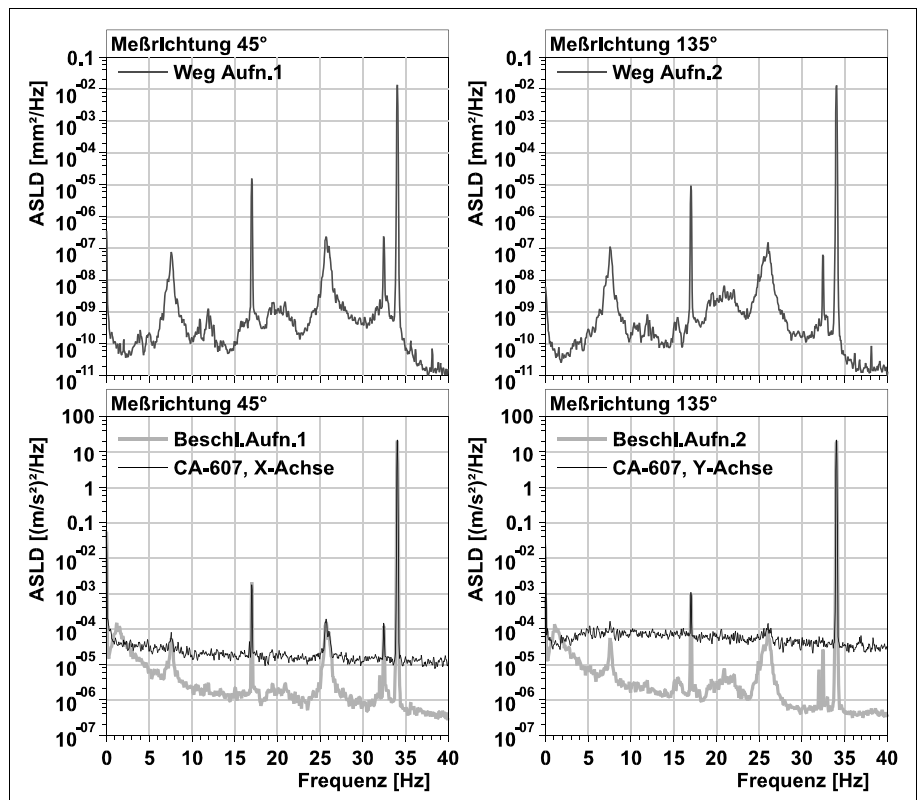


Bild 3.17: ASLD der Weg- und Beschleunigungssignale der Testmessung einer 34 Hz Rohrschwingung

nimmt bei den außen fest adaptierten Beschleunigungsdetektoren der Rauschuntergrund zu höheren Frequenzen hin ab. Insgesamt liegt der Rauschuntergrund der Signale des CA-607, oberhalb einer Frequenz von ca. 1 Hz, über dem der Beschleunigungsaufnehmer 1 und 2. Dies ist auf die kompakte Bauart des Miniaturbeschleunigungsaufnehmers CA-607 zurückzuführen. Die in Relation zu den äußeren Beschleunigungsaufnehmern klein ausgeführte seismische Masse, in Kombination mit ebenfalls kleineren piezoelektrischen Kristallen, führt zu relativ geringen Ladungsverschiebungen im Detektor. Das Nutzsignal des CA-607 ist also bei gleichen Beschleunigungen kleiner als das der äußeren Beschleunigungsaufnehmer. Hieraus resultiert der deutlich geringere Signal-Rausch-Abstand des CA-607. Einige kleinere periodische Signalanteile, die in den Spektren der BA1 und BA2 noch identifiziert werden können, treten in den Spektren der Signale des CA-607 deshalb nicht mehr hervor. Dieser Effekt ist für die Meßrichtung von 135° (Bild 3.17, rechts) bei Frequenzen von 15,7 Hz, 21 Hz und um 32,5 Hz besonders deutlich zu erkennen.

Die ASLD zeigen im Bereich der Schwingung um 34 Hz für beide Meßrichtungen gleiche Peakmaximalamplituden. Um aus der ASLD eines Beschleunigungssignals die einer bestimmten Frequenz zugeordnete Beschleunigungsamplitude $a(f_1)$ (Bild 3.18) zu ermitteln, muß die Fläche unter dem zugehörigen Peak nach Gleichung (30) und (31) aufintegriert werden. Die Berechnung des resultierenden Schwingweges $s(f_1)$ durch doppelte Integration der Beschleunigung erfolgt im Frequenzbereich nach Gleichung (32).

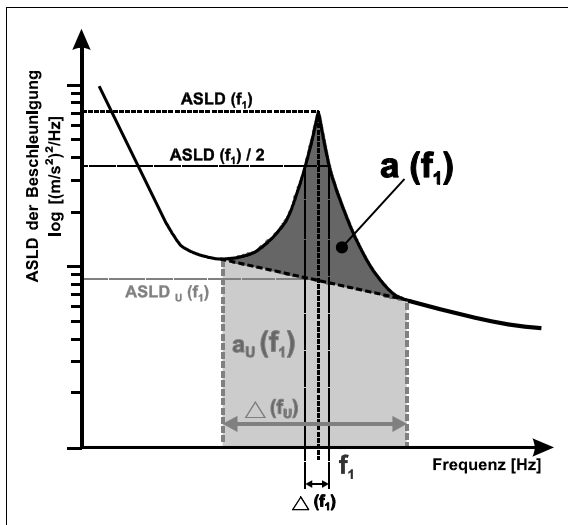


Bild 3.18: Amplitudenbestimmung eines periodischen Signalanteils

$$a(f_1) = \sqrt{\frac{\pi}{2} ASLD(f_1) \Delta(f_1) - a_u(f_1)} \quad (30)$$

$$a_u(f_1) = ASLD_u(f_1) \Delta(f_u) \quad (31)$$

$$s(f_1) = \frac{a(f_1)}{(2\pi f_1)^2} \quad (32)$$

Die errechneten Wegspektren der Signale der vier Beschleunigungsaufnehmer sind in Bild 3.19 den Spektren der Signale der beiden Relativwegaufnehmer gegenübergestellt. Der zu niedrigen Frequenzen hin ansteigende Rauschuntergrund der Beschleunigungsaufnehmer ist durch die Integration begründet, die sich in dem zu verarbeitenden Signal als Tiefpaßfilter mit sehr geringer Flankenteilheit auswirkt [62]. Bei Frequenzen von ca. 12 Hz, um 20 Hz und 26 Hz treten in den Signalen der Relativwegaufnehmer breitbandige, periodische Anteile hervor, die in den Signalen der Be-

schleunigungsaufnehmer vom Untergrundrauschen größtenteils (BA1 und BA2) oder vollständig (CA-607) überlagert werden.

Die Bereiche der Rohrschwingung um 34 Hz und der Subharmonischen um 17 Hz sind in den unteren beiden Achsensystemen vergrößert dargestellt. Bei 17 Hz liegen die Maxima der Detektoren der Meßrichtung von 45° etwas höher als die der anderen drei. Dies ist aber nicht auf die Meßcharakteristik oder die Ankopplung der Detektoren zurückzuführen, sondern auf die Schwingung des Testrohres, welches sich nicht exakt auf der Mittelachse zwischen den Aufnehmern bewegt. Im Frequenzbereich um 34 Hz ergeben sich durch die Flächenberechnung unterhalb der Schwingungspeaks, mit anschließender Vektoraddition der Einzelergebnisse der Aufnehmerpaare, Schwingungsamplituden von $54\mu\text{m}$ für die Relativwegaufnehmer und je $50,1\mu\text{m}$ für die Beschleunigungsaufnehmer.

Diese vektorielle Addition der Maximalamplituden ist nur zulässig, wenn sich eine Schwingung anteilig auf die orthogonal angeordneten Meßachsen aufteilt. Trifft dies zu, müssen die Signale des CA-607 bei der betreffenden Frequenz korreliert und zwischen den Signalen eine Phasenlage 0° oder 180° vorliegen (vgl. Bild 2.7). Bei einer kreisförmigen Pendelbewegung (Phasenlage = 90°) würde die resultierende Gesamtamplitude zu groß berechnet werden.

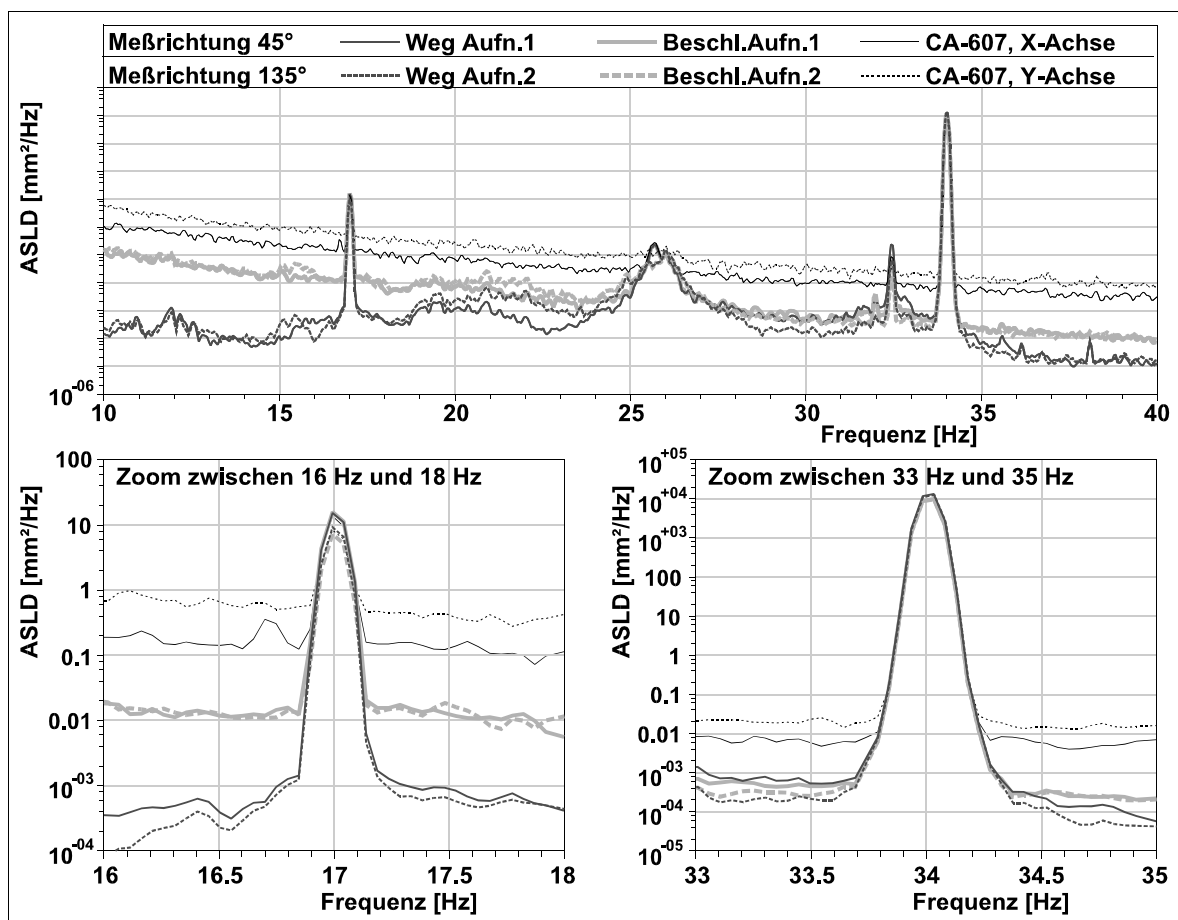


Bild 3.19: Vergleich der ASLD der gemessenen Schwingwege mit den aus den Beschleunigungssignalen errechneten Wegspektren

Um die Ankopplung des CA-607 an das Fahrkammerrohr zu untersuchen, wurden Versuchsreihen durchfahren, bei der die Frequenz der magnetisch angeregten Rohrschwingung im Frequenzbereich unter 50 Hz schrittweise reduziert wurde. Die ermittelten Schwingungsamplituden sind in Bild 3.20 (Reihen I bis III) zusammengefaßt.

Ein Vergleich der von den Relativwegaufnehmern gemessenen Schwingwege mit denen, die aus den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer berechnet wurden, zeigt eine gute Übereinstimmung im gesamten untersuchten Frequenzbereich. Oberhalb von 10 Hz betrug die Abweichung maximal 10 % des mit den Relativwegaufnehmern ermittelten Schwingungsweges (Bild 3.21). Es zeigt sich aber auch, daß sich bei niedrigen Frequenzen aus dem zweifach integrierten Signal der Beschleunigungsaufnehmer tendenziell etwas geringere Schwingwege ergeben, als aus dem Signal der Relativwegaufnehmer. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, daß bei den geringen Auslenkungen des Testrohres bei niedrigen Anregungsfrequenzen nur äußerst geringe Beschleunigungen auftreten, und daß die magnetisch angeregte Schwingung bei den niedrigen Frequenzen immer ruckartiger angeregt und dadurch unharmonischer wird. Zur Untersuchung der Ankopplung im Frequenzbereich unter 6 Hz wurde deshalb die motorgetriebene Schwingungsanregung verwendet (Bild 3.20, IV bis VI).

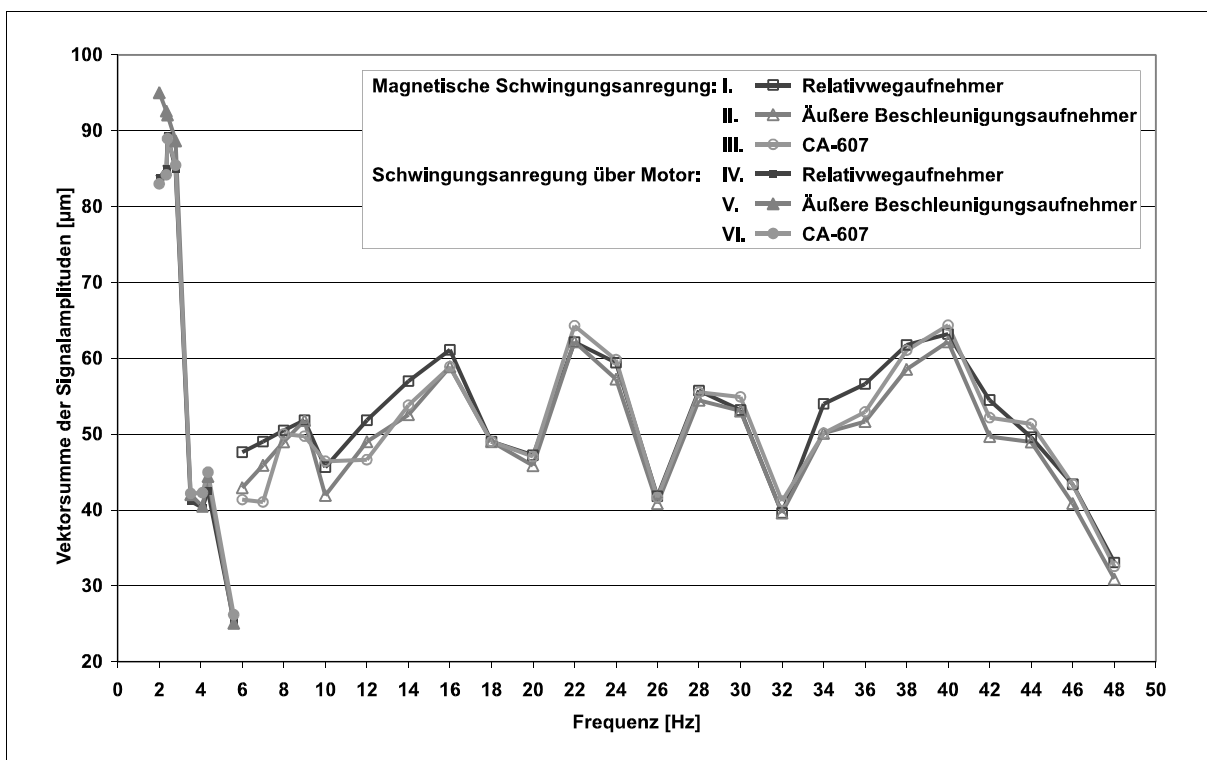


Bild 3.20: Vergleich der aus Signalen der Weg- und Beschleunigungsaufnehmer ermittelten Schwingungsamplituden

In den Signalen der äußeren Beschleunigungsaufnehmer (BA1 und BA2) zeigt sich unterhalb von 4 Hz eine tendenziell ansteigende Abweichung zu den Relativwegaufnehmersignalen, die auf die Unterschreitung des linearen Meßbereiches der Detektoren zurückzuführen ist. Für die aus den Signalen des CA-607 ermittelten Schwingungsamplituden beträgt die Abweichung wiederum weniger als 10 % der Amplituden, die mit den Relativwegaufnehmern gemessen wurde.

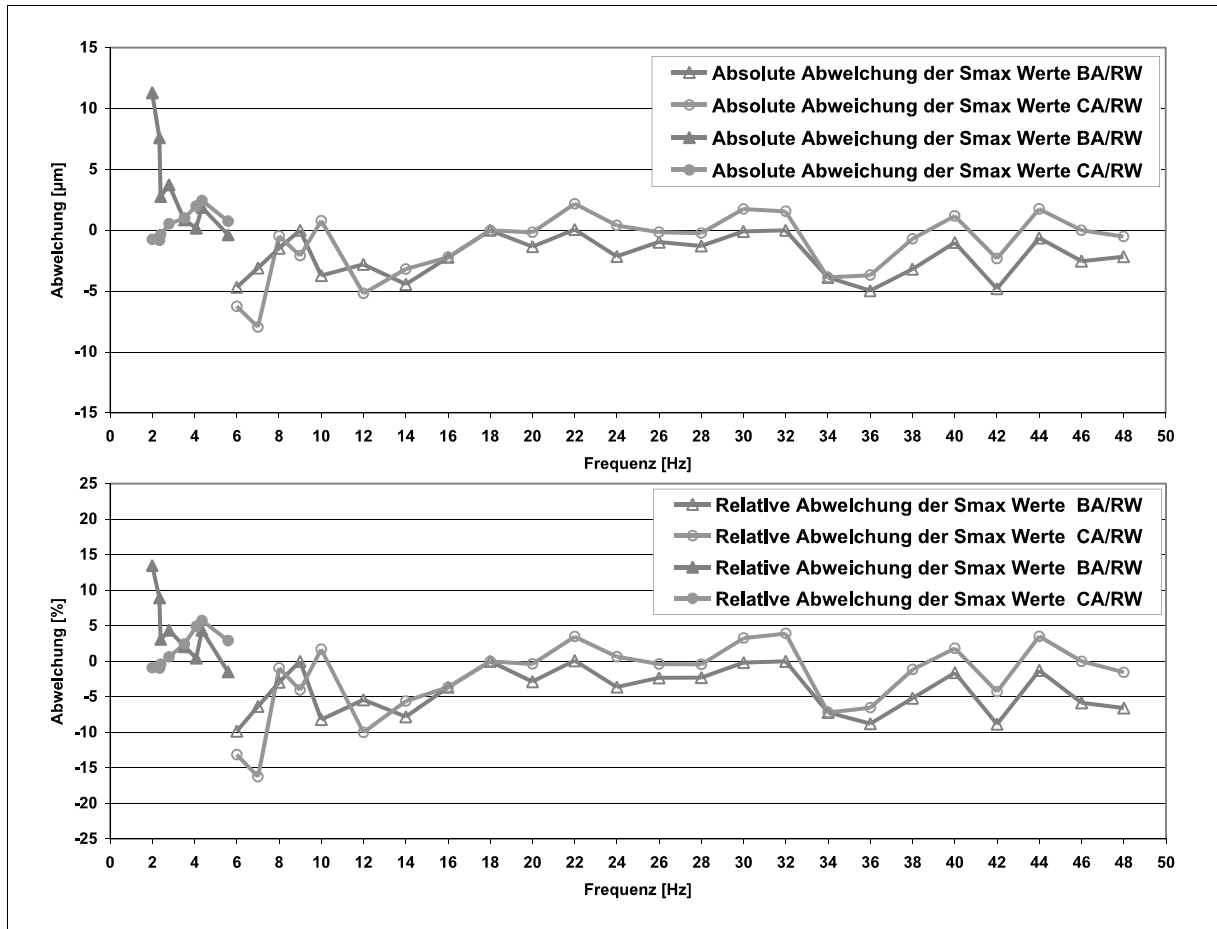


Bild 3.21: Abweichungen der aus Signalen der Beschleunigungsaufnehmer errechneten Schwingungsamplituden von Signalamplituden der Wegaufnehmer

Der Anstieg des Rauschhintergrundes im niederfrequenten Bereich der zweifach integrierten Beschleunigungssignale (vgl. Bild 3.19) bewirkt einen zunehmend geringeren Signal-Rausch-Abstand, der die Auswertung erschwert bzw. über die geringere Ablesegenauigkeit verfälscht. Um die Halbwertbreite (Δf_1) nach Gleichung (30) ablesen zu können, ergibt sich für die Anwendbarkeit des Verfahrens eine Minimalanforderung, für die der Wert der Peakmaximalamplitude den Rauschuntergrund um mindestens das Doppelte übersteigen muß. Die hieraus resultierende untere Nachweisgrenze des Verfahrens bzw. die minimal auswertbare Schwingungsamplitude

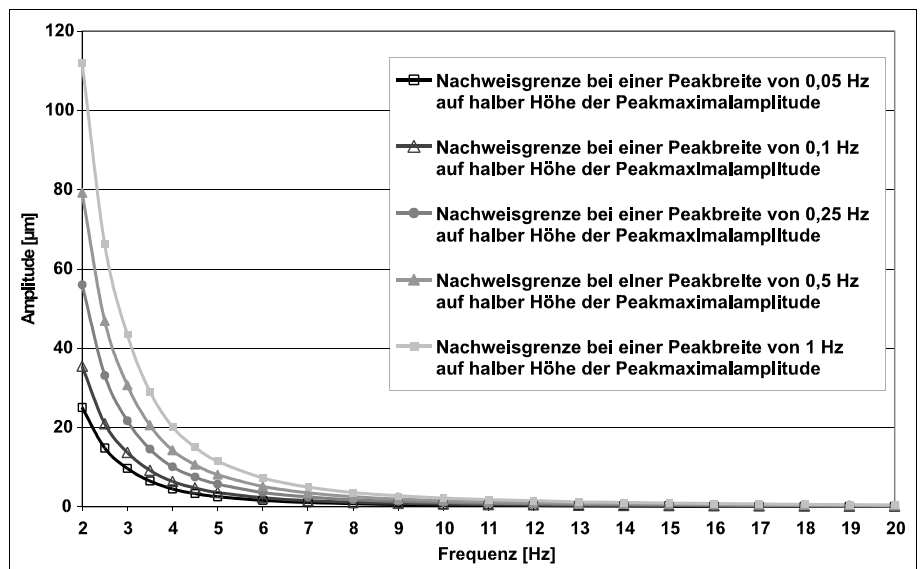


Bild 3.22: Minimale aus den Signalen des CA-607 nach Gleichung 30 auswertbare Schwingungsamplitude

ist in Bild 3.22, in Abhängigkeit der Schwingfrequenz und der Peakbreite auf halber Peakhöhe, dargestellt.

Bei den Messungen in den Instrumentierungslanzen sollen mit dem Beschleunigungsdetektor CA-607 auch eventuelle, auf Anschläge zwischen Bauteilen zurückzuführende, Einzelschallereignisse detektiert werden. Die prinzipielle Eignung des CA-607 für diese Messungen wurde durch Testschläge gegen das Eichrohr des zuvor beschriebenen Versuchsstandes überprüft.

Die Beschleunigungssignale des CA-607 sind bei hochfrequenter Abtastung etwa um den Faktor drei kleiner als die der äußeren Beschleunigungsaufnehmer. Die hochfrequenten Signalanteile der Bursts werden zum einen durch die zusätzliche Tiefpaßfilterstufe bei 600 Hz in der Meßkette des CA-607 ausgefiltert und zum anderen durch die Ankopplung an die Rohrinnenwand mittels Federelement weniger stark auf den Detektor übertragen. Trotz

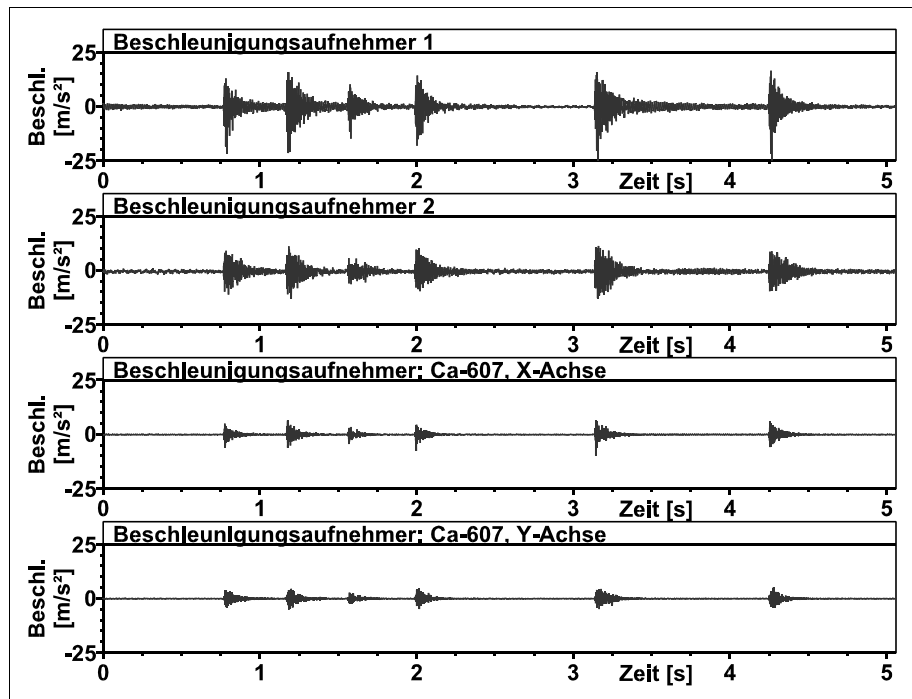


Bild 3.23: Einzelschallereignisse in den Signalen der äußeren Beschleunigungsaufnehmer und des CA-607

dieser Einschränkungen sind die Ergebnisse der Beschleunigungsmessung im Fahrkammerrohr für Körperschalluntersuchungen geeignet, da alle Einzelschallereignisse durch beide Achsen des CA-607 sicher detektiert werden. Eine Unterscheidung der Stärke der Ereignisse ist innerhalb der einzelnen Signalverläufe relativ möglich. Die Körperschallereignisse werden zeitgleich von allen Aufnehmern registriert.

Durch diese Versuchsreihen wurden die Meß- und Analysetechniken der geplanten Messungen in den Fahrkammersystemen von Siedewasserreaktoren überprüft. Das Verfahren wurde, beginnend mit der Eignung des Beschleunigungsdetektors CA-607, über die ausreichend steife Ankopplung des CA-607 an das Fahrkammerrohr, bis hin zur Signalverarbeitung und der Auswertung der Messungen schrittweise überprüft und optimiert.

Die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens wurde ebenfalls in Versuchsaufbauten nachwiesen, und hierbei die Durchführung der Messungen optimiert. Die Isometrien der Fahrkammersysteme der Kernkraftwerke Gundremmingen (KGB) wurden vor Ort aufgenommen. Um die Verschiebbarkeit des Detektors innerhalb der Fahrkammersysteme nachzuweisen und die erforderlichen Verschiebe-

kräfte zu ermitteln, wurden zwei der Fahrkammerrohre im Maßstab 1:1 nachgebaut. Für den Nachbau wurden die beiden Fahrkammerrohrstrecken ausgewählt, die die größte Rohrlänge bzw. die engsten Krümmungsradien aufweisen, und somit hinsichtlich der Verschiebbarkeit des Detektors den schwierigsten Einsatzfall darstellen. Im oberen Bereich der Rohrstrecken wurden Haltevorrichtungen angebracht, die der Aufnahme der Schwingungsanregungs- und Meßeinrichtung des zuvor beschriebenen Versuchsstandes zur Überprüfung der Ankopplung des CA-607 dienen.

Der Nachbau wurde im Kesselhaus eines konventionellen Kraftwerkes an den Kesselbühnen aufgehängt. Bei Kraftwerksbetrieb übertrugen sich dadurch die Schwingungen des Kessels auf den Versuchstand. Die Rohrleitungsstrecke wurde mit dem CA-607 mehrmals komplett durchfahren und dabei die benötigten Verschiebekräfte gemessen. Die Versuche wurden sowohl bei Betrieb als auch bei Stillstand des Kraftwerkes durchgeführt. Bei Kraftwerkstillstand ergaben sich Maximalwerte für das Verschieben des CA-607 von 54 N beim Einschieben in das Fahrkammerrohr und 25 N beim Ausziehen aus dem Fahrkammerrohr. Die benötigten Verschiebekräfte nehmen mit der Länge der Fahrstrecke des Detektors zu, da der Reibungswiderstand durch die mit der abgewickelten Kabellänge ansteigende Zahl von Kontaktstellen zwischen Detektorkabel und Rohrrinnenwand ansteigt. Die deutlich geringere Verschiebekraft zum Ausfahren des Detektors ist darauf zurückzuführen, daß plastische Verformungen des Kabels, die sich beim Einschieben gebildet haben, beim Herausziehen glattgezogen werden, und das Kabel dadurch an weniger Stellen im Fahrkammerrohr anliegt als beim Einschieben.

Bei Messungen während des Kraftwerkbetriebes ergab sich eine maximale Einschubkraft von ca. 28 N. Vermutlich treten in diesem Fall geringere Reibungskräfte auf, da sich das Kabel des Detektors durch die Vibrationen des Fahrkammerrohres entspannt und es dadurch nicht so fest an den Fahrkammerrohrwänden anliegt. Ein Festklemmen des Detektors ist bei keiner Messung aufgetreten. Da die Kräfte zum Ausziehen des Beschleunigungsdetektors aus dem Rohrsystem deutlich geringer als die zum Einschieben benötigten sind, kann die sichere Entnahme des Detektors bei den Messungen im Fahrkammersystem garantiert werden.

Bei diesen Versuchsreihen wurde sowohl die Durchführung der geplanten Messungen vorbereitet, als auch das Verfahren des Detektors im Fahrkammerrohr trainiert. Ebenso wurde die Funktionsüberprüfung der Einschubvorrichtung und der Kabeltrommel inkl. Kabelführung und Längenzähler vorgenommen, und dabei die Bedienung dieser Komponenten geübt.

Mit den genannten Voruntersuchungen konnte die Eignung des Beschleunigungsdetektors CA-607 für den Einsatz im Fahrkammersystem eines Siedewasserreaktors und die Belastbarkeit der Messergebnisse nachgewiesen werden.

4. Untersuchungen zum Schwingungs- und Schallübertragungsverhalten am Modell einer Instrumentierungslanze

Die Beschleunigungsmessungen in den Fahrkammerrohren werden mit dem Ziel durchgeführt, das Schwingungsverhalten der Instrumentierungslanzen zu untersuchen. Die Voruntersuchungen zur Funktionsüberprüfung des Adaptionselementes und zum Nachweis der praktischen Durchführbarkeit des Verfahrens zeigen, daß aus den Schwingungsmessungen im Fahrkammerrohr zuverlässige Ergebnisse zu erwarten sind. Da die Instrumentierungslanzen aber aus mehreren radial angeordneten Einzelrohren bestehen, die nur an wenigen Stellen steif miteinander verbunden sind, muß überprüft werden, inwieweit durch die Analyse der Schwingungen des Fahrkammerrohres Rückschlüsse auf die Schwingungen der äußeren Lanzenrohre bzw. der Gesamtlanze zulässig sind.

Ebenso muß überprüft werden, ob sich Einzelschallereignisse, die z.B. durch eventuelle Anschlagvorgänge in der Steckverbindung zwischen Kernflußmeßgehäuserohr und Abschlußrohr entstehen, auf das Fahrkammerrohr übertragen und inwieweit sich aus den Messungen im Fahrkammerrohr die Position des Anschlagortes sowie die Anschlagintensität beurteilen lassen.

Für diese Untersuchungen wurde eine Instrumentierungslanze in Einbaulage im Maßstab 1:1 nachgebaut (Bild 4.1) [63]. Im Modell wurden konstruktive Vereinfachungen vorgenommen, die jedoch das Schwingungsverhalten und die Schallübertragung zwischen den Einzelrohren im Vergleich zur Originallanze nicht beeinflussen. Massen und Abmessungen, Verbindungen und Lagerungen, Trägheitsmomente (Formen und Wandstärken) und Materialkennwerte der Originallanze wurden im Modell berücksichtigt.

Die Lagerungs- bzw. Kopplungsbedingungen der Lanzenrohre sind von besonderer Bedeutung. Im Bereich der RDB-Bodenkalotte ist das Kernflußmeßgehäuserohr im KFMR-Stutzen und darüber am RDB verschweißt. Das Hüllrohr ist auf Höhe der LVD-Lanzenmanschette im Kernflußmeßgehäuserohr geführt. Ebenso ist das Fahrkammerrohr im Bereich des Zentrierstiftes im oberen Kerngitter mit dem Hüllrohr gekoppelt. An beiden Positionen können die jeweiligen Rohre in radialer Richtung nur gemeinsam Bewegungen ausführen. Das Dichtungssystem am unteren Ende der Lanze verbindet alle drei Rohre (Kernflußmeßgehäuserohr, Hüllrohr und Fahrkammerrohr) steif miteinander. Im Kernbereich sind das Hüllrohr und das FKR zusätzlich durch die zwischenliegenden Miniaturspaltkammern lose gekoppelt, die auf den einzelnen Ebenen um jeweils 90° versetzt um das Fahrkammerrohr angeordnet sind. Die Zwischenräume zwischen KFMR und Hüllrohr und zwischen Hüllrohr und Fahrkammerrohr sind mit Wasser gefüllt.

Das Modell ist an den Lagerungspositionen der Lanzenrohre und den Kopplungsstellen zwischen den Einzelrohren außen mit fest adaptierten Beschleunigungsaufnehmern instrumentiert. Zusätzlich sind, jeweils in der Mitte zwischen den Positionen Dichtsitz und RDB-Bodenkalotte (Knoten 44, -3198 mm) bzw. zwischen Steckverbindung und LVD-Lanzenmanschette (Knoten 29, +2542 mm) und am unteren Ende der Lanze am Fahrkammerrohr, Beschleunigungsaufnehmer angebracht. Die Lage dieser Meßpositionen und die Bezeichnung „Knoten“ wurden aus einer Finite-Elemente-Berechnung der Instrumentierungslanze übernommen. Jeweils zwei Aufnehmer sind pro Instrumentierungsebene unter einem Winkel von 90° über Sockelelemente am Hüllrohr bzw. KFMR montiert. Eine Ausnahme bildet die unterste Meßposition, an der nur ein Detektor außen am Fahrkammerrohr aufgeklebt ist.

Auf Höhe der Steckverbindung zwischen KFMR und Abschlußrohr können, über einen fernbedienten Hammer mit Kugelkopf, Einzelschallereignisse mit variabler Intensität in das KFMR eingeleitet werden. Um die jeweilige Anschlagstärke bestimmen zu können, ist der Hammerkopf gegenüber der Anschlagseite ebenfalls mit einem Beschleunigungsaufnehmer instrumentiert. Für die Messungen wird der CA-607 von unten in das Fahrkammerrohr eingeschoben.

4.1. Schwingungsuntersuchungen

Das Lanzenmodell wurde in einem konventionellen Kraftwerk an den Kesselbühnen über Zwischenträger aufgehängt und dadurch bei Kraftwerkbetrieb über die Vibrationen des

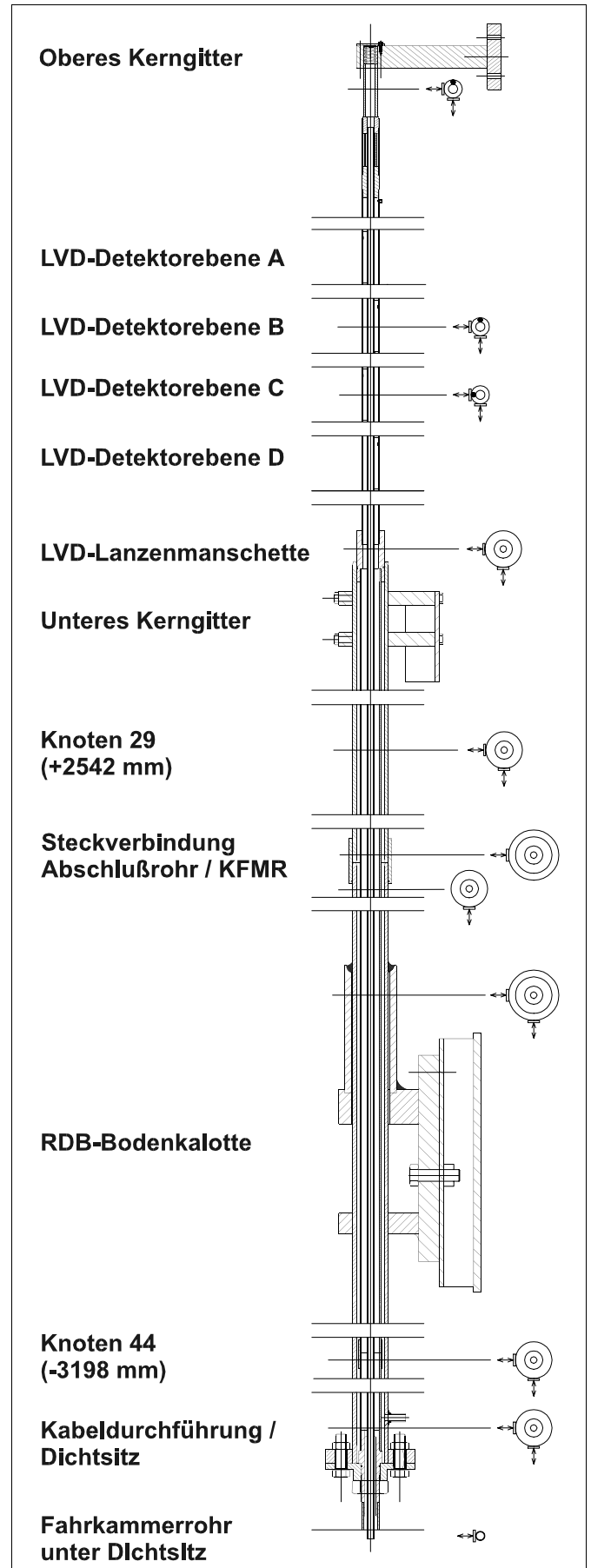


Bild 4.1: Aufbau und Instrumentierung der Modelllanze

Kessels zu Schwingungen angeregt. Für die Untersuchung wurden zunächst Schwingungen vom Kernflußmeßgehäuserohr und vom Hüllrohr durch die Auswertung von Spektren der Signale der außen am Modell angebrachten Aufnehmer analysiert. Anschließend wurden die Schwingungen des Fahrkammerrohres anhand der Beschleunigungssignale des im Fahrkammerrohr positionierten CA-607 ermittelt. Über den Vergleich beider Untersuchungen wurde die Ankopplung des Fahrkammerrohres an das Hüllrohr der LVD-Lanze und das Kernflußmeßgehäuserohr an verschiedenen Positionen der Lanze überprüft.

Dabei hat sich gezeigt, daß die im Fahrkammerrohr gemessenen Beschleunigungssignale die Lanzenschwingungen zwischen oberem und unterem Kerngitter sehr gut wiedergeben. Dies ist auf die hier vorhandene steife Ankopplung zwischen den Lanzenrohren durch die im Ringspalt zwischen Fahrkammerrohr und Hüllrohr fixierten Miniaturspaltkammern zu erklären. Hierdurch findet im Bereich der Miniaturspaltkammern eine Übertragung der Schwingungen des Hüllrohres auf das Fahrkammerrohr statt. Die Schwingungen des Kernflußmeßgehäuserohres bzw. des Hüllrohres werden im Bereich des Abschlußflansches ebenfalls direkt auf das Fahrkammerrohr übertragen. Im Bereich zwischen diesen Koppelstellen ist lediglich eine Ankopplung bzw. Dämpfung über das in den Ringspalten befindliche Wasser vorhanden, und das Fahrkammerrohr kann auch unabhängig von KFMR bzw. Hüllrohr schwingen. Aussagen zum Schwingungsverhalten des mittleren Bereichs des Kernflußmeßgehäuserohres z.B. auf Höhe des Kernflußmeßgehäuserohrstutzens oder der Montageglocke, sind durch Analyse der Signale des CA-607 innerhalb des Fahrkammerrohres deshalb nur eingeschränkt möglich.

4.2. Körperschalluntersuchungen

Bild 4.2 zeigt die Zeitsignale einer mit 25 kHz abgetasteten Messung von zehn, außen an der Lanze montierten, Beschleunigungsaufnehmern und des CA-607, der auf Höhe der LVD-Ebene C positioniert war. Auf Höhe der Steckverbindung wurde dabei mit dem Hammer leicht gegen das KFMR geschlagen. In sämtlichen aufgezeichneten Beschleunigungssignalen können alle eingeleiteten Einzelschallereignisse sicher detektiert werden.

Ein Ziel der Auswertung der Körperschallsignale ist die Lokalisierung des Anschlagortes und, falls möglich, die Bestimmung der Anschlagenergie. Der Anschlagort wird dabei über die Laufzeitdifferenzen zwischen dem Auftreten der Einzelschallereignisse in den Signalen mehrerer Körperschallaufnehmer, die über das zu untersuchende Objekt verteilt montiert sind, errechnet (vgl. Kap. 2.3.2.). Für die Bestimmung der Laufzeiten zwischen den äußeren Detektoren wurden jeweils zehn Einzelschallereignisse aus sieben Meßreihen ausgewertet (Bild 4.3).

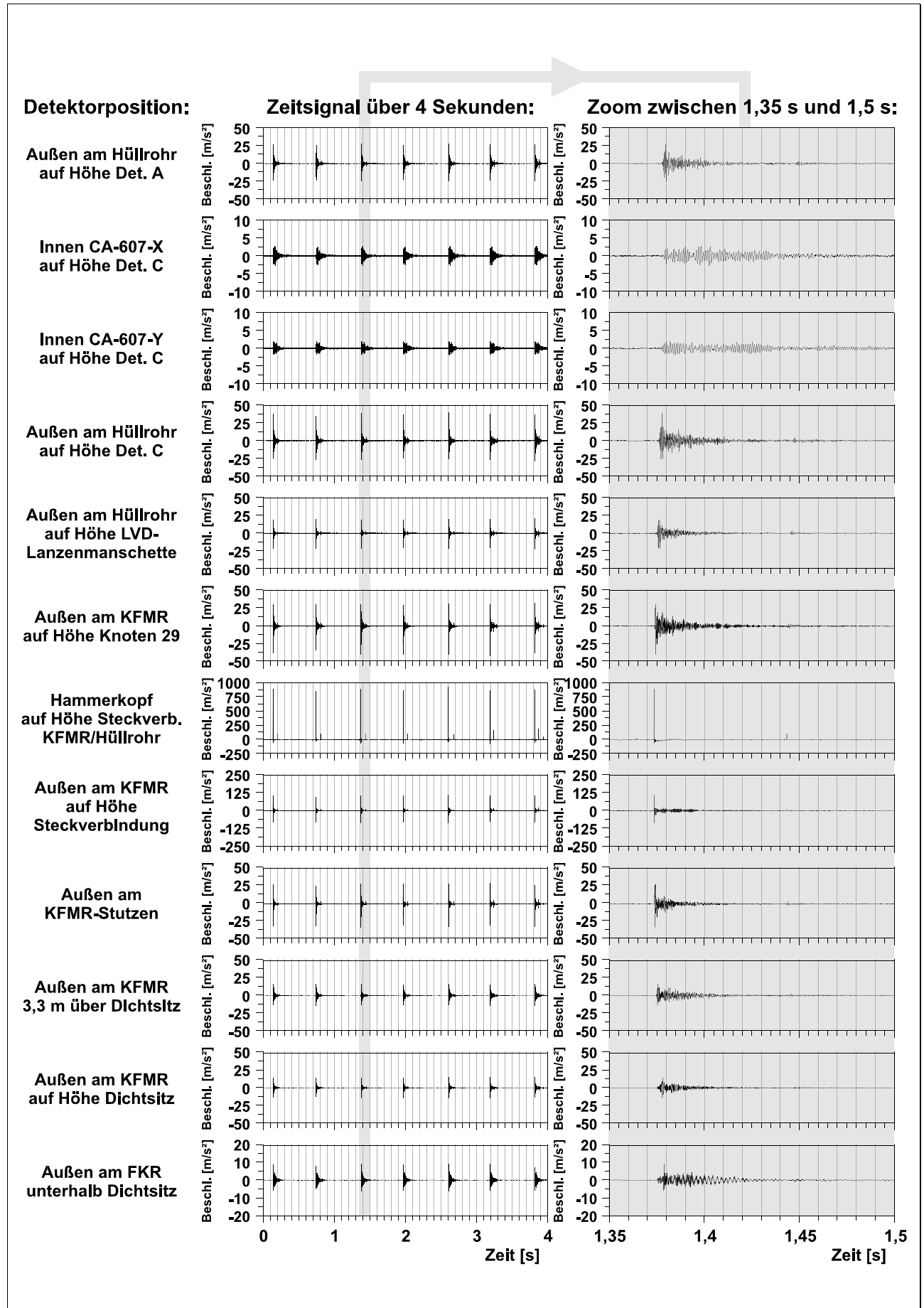


Bild 4.2: Körperschallmessungen an der Modelllanze

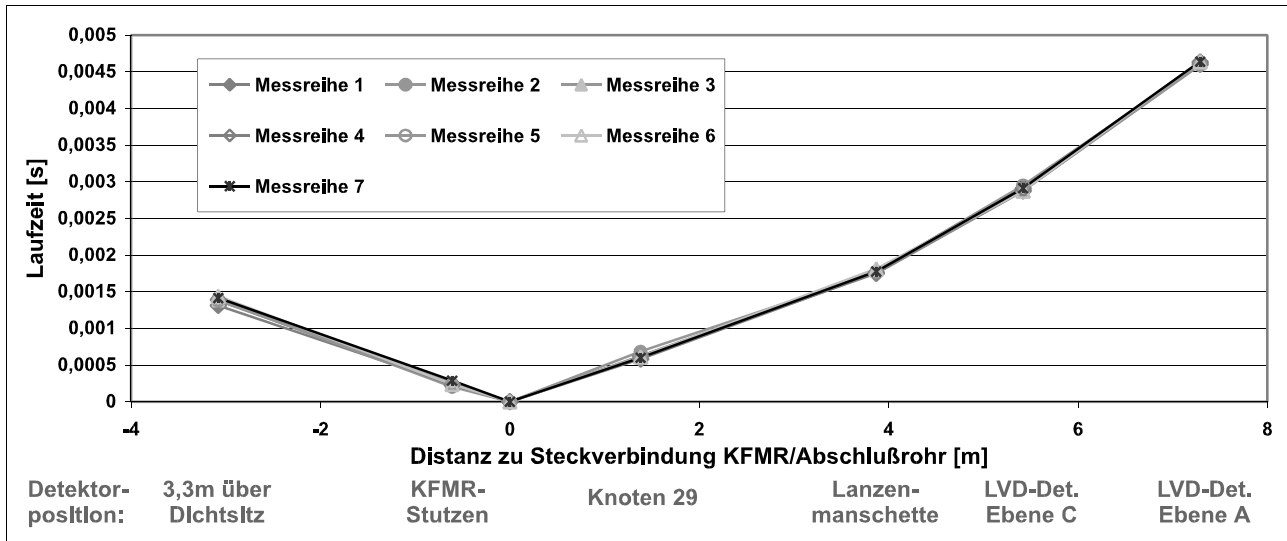


Bild 4.3: Schallausbreitung in der Modellanz

Die gemittelten Laufzeiten einer der Meßreihen stimmen mit einer Abweichung von $\pm 0,0001$ Sekunden relativ gut überein. Die Form der Einzelschallereignisse zeigt jedoch mit zunehmendem Abstand zur Schalleinleitungsstelle immer gedämpftere, d.h. weniger steile Flankenanstiege der Bursts (Bild 4.2), so daß zwischen den sich entsprechenden Laufzeiten einzelner Bursts einer Meßreihe Abweichungen von bis zu 0,001 s auftreten.

Schallausbreitungsstrecke von Steckverbindung nach:	Distanz [m]	Geschwindigkeit [m/s]	Abweichung Meßreihen 1-7 [m/s]	
LVD-Ebene A	7,29	1579	-7	9
LVD-Ebene C	5,42	1866	-30	19
LVD-Lanzenmanschette	3,87	2183	-48	29
Knoten 29	1,38	2238	-219	131
KFM, 3,3m über Dichtsitz	-3,08	2223	-80	123

Tabelle 4: Schallausbreitungsgeschwindigkeiten im Lanzenmodell

Aus den gemessenen Laufzeiten ergeben sich für die verschiedenen Lanzenabschnitte unterschiedliche Schallausbreitungsgeschwindigkeiten. In der Wand des Kernflußmeßgehäuserohres liegen sie bei ca. 2200 m/s (Tabelle 4). Diese für Stahl relativ niedrigen Schallgeschwindigkeiten sind auf die Bauteilgeometrie zurückzuführen. Bei der Schallausbreitung in Rohren dominieren BiegeWellen, die durch die quer zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht zur Rohroberfläche schwingenden Masseteilchen nur eine geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit haben [64]. Bei Übertragungsstrecken, die im Bereich der LVD-Ebenen enden, sinken die ermittelten Schallgeschwindigkeiten auf unter 2000 m/s ab. Vorausgesetzt, daß der Schall vom KFM über die Lanzenmanschette durch das Hüllrohr zu den Detektoren übertragen wird, kann aus den Werten in Tabelle 4 für den Bereich des Hüllrohres eine Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 1100 m/s errechnet werden. Beruht diese unterschiedliche Geschwindigkeit auf den verschiedenen Durchmessern und Wandstärken von Hüllrohr und KFM, so ist auch im Fahrkammerrohr wiederum eine andere Schallausbreitungsgeschwindigkeit zu erwarten. Die Zwischenräume der Rohre sind mit Wasser gefüllt, so daß auch hierüber eine

Schallübertragung zwischen den Rohren gegeben ist. Die Bestimmung der Länge der Schallübertragungsstrecken und dadurch der Lage der Schalleinleitungsstelle, wird durch die Kombination dieser verschiedenen Schallgeschwindigkeiten und Übertragungswege erheblich erschwert.

Durch den Vergleich der Burstmaximalamplituden einzelner Schallereignisse konnte die Intensitätsabnahme zwischen den Detektorpositionen und dadurch die Dämpfung innerhalb der Rohrstrecken ermittelt werden. Bild 4.4 zeigt die Mittelwerte und Abweichungen der abgelesenen Burstmaximalamplituden von zehn Schallereignissen einer Meßreihe.

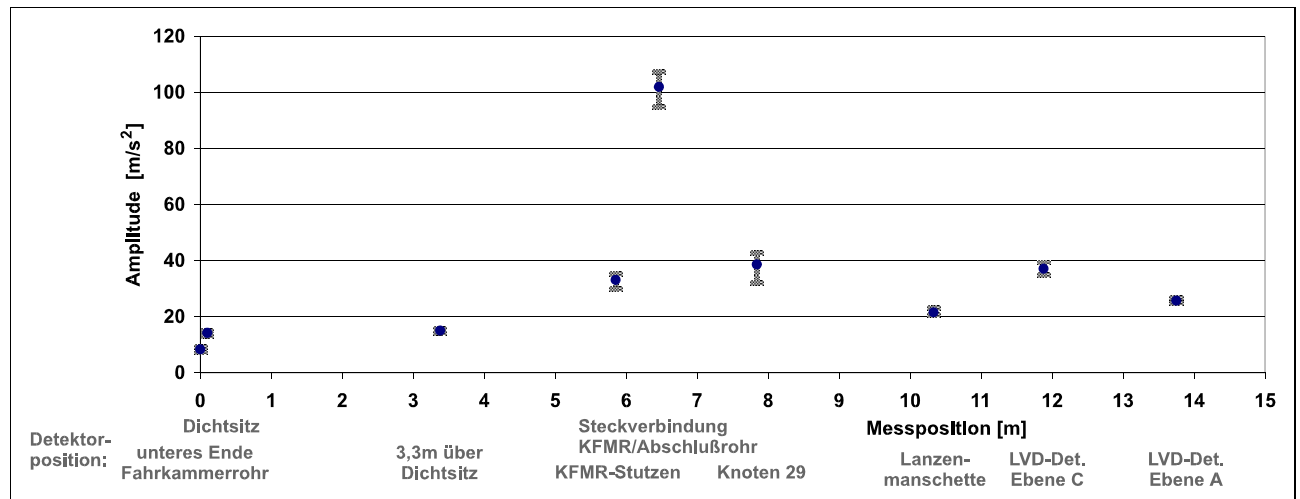


Bild 4.4: Burstmaximalamplituden in den Signalen der Instrumentierung der Modellanzie

Die Steckverbindung ist hierbei klar als Ort der Schalleinleitung zu erkennen. Das Dämpfungsverhalten in Rohren kann in Form einer abklingenden e-Funktion charakterisiert werden [15]. Im Widerspruch dazu fällt bei den Messungen an der Instrumentierungslanze auf, daß der Detektor im Bereich des Knoten 29 mit einem Abstand von 1,4 m zur Anschlagstelle und der 4 m höher gelegene Detektor an der Meßposition LVD-Ebene C annähernd gleich hohe Burstmaximalamplituden registrieren. Das Signal des Detektors, der an der dazwischenliegenden Lanzenmanschette montiert ist, weist dagegen nur halb so große Amplituden auf. Die Burstamplituden, die 6,4 m unter der Anschlagstelle auf der Position Dichtsitz gemessen werden, entsprechen denen, die 3,3 m höher am KFMR auftreten. Diese Ergebnisse wurden bei der Auswertung anderer Meßreihen wiederholt bestätigt.

Insgesamt ergibt sich hieraus ein nicht homogenes Dämpfungsverhalten über der Höhe der Instrumentierungslanze. Der Schall breitet sich auf verschiedenen Übertragungswegen mit jeweils unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit, einer ungleichmäßigen Dämpfung und unterschiedlichen Wellenformen aus. Die Auswirkung dieser komplexen Schallübertragung ist besonders deutlich in den Signalen des Ca-607 zu erkennen. Das Zusammenwirken der genannten Faktoren mit der Aufnehmerresonanz bei 1,5 kHz und der Tiefpaßfilterung der Beschleunigungssignale bei 600 Hz, führt dazu, daß sich in den Beschleunigungssignalen der Messungen im Fahrkammerrohr der Zeitpunkt des Signalanstiegs zu Beginn eines Bursts nicht eindeutig ermitteln läßt (Bild 4.2, rechts).

Durch die hieraus resultierende Ableseungenauigkeit ist die Bestimmung der exakten Laufzeitdifferenz eines Einzerschallereignisses, zwischen den Signalen des CA-607 und eines Beschleunigungsdetektors der außen am KFMR montiert ist, nicht möglich. Die Fehlerbreiten liegen mit einigen Metern in der Größenordnung der Gesamtlänge der Instrumentierungslanze.

Der Beschleunigungsdetektor Ca-607 kann innerhalb des Fahrkammerrohres der Instrumentierungslanze an jede beliebige Position geschoben werden. Die Schallübertragung von den äußeren Lanzenrohren auf das Fahrkammerrohr kann direkt über das zwischenliegende Wasser stattfinden oder aber als Schalleitung im Material des äußeren Rohres bis zu einer Kontaktstelle mit dem FKR erfolgen. Vorausgesetzt, daß die Intensität der Schallereignisse im Fahrkammerrohr auf Höhe der Anschlagposition am größten ist, kann diese Stelle über den Vergleich von, an verschiedenen Höhenpositionen gemessenen, Beschleunigungssignalen iterativ bestimmt werden. Die Position, an der die Burstmaximalamplitude innerhalb des Fahrkammerrohres gemessen wird, wäre demnach die Position, an der die Lanze an umgebende Strukturen anschlägt. In Bild 4.5 sind die Burstmaximalamplituden der

Signale der beiden Achsen des CA-607 und die resultierende Vektorsumme von verschiedenen Meßpositionen vergleichend dargestellt. Während dieser Messungen wurde über den Hammer gleichbleibend stark gegen die Steckverbindung zwischen KFMR und Abschlußrohr geschlagen. Da hier keine direkte Kopplungsstelle zwischen

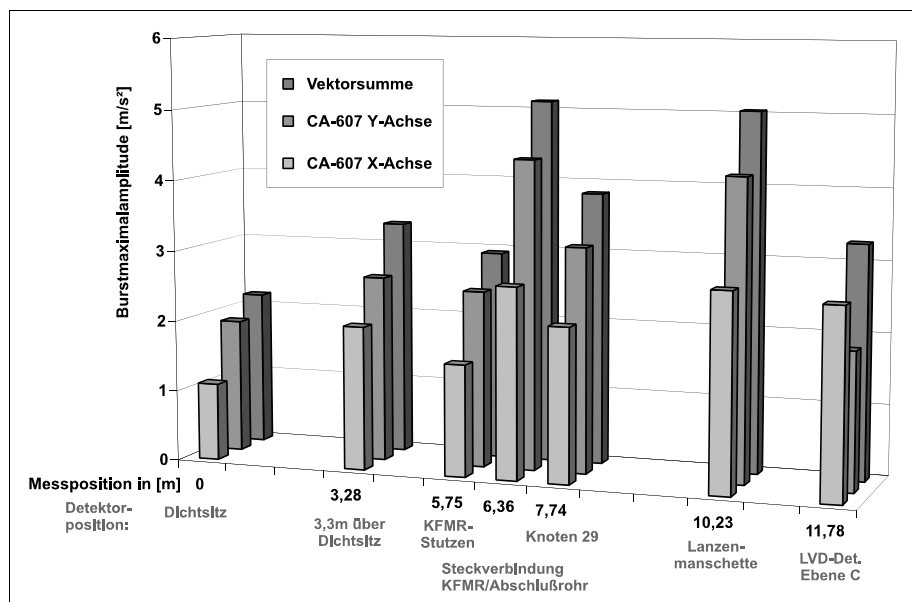


Bild 4.5: Burstmaximalamplituden in den Signalen des CA-607 in Abhängigkeit von der Meßposition im Fahrkammerrohr

Schall in Strukturteilen nur über den Dichtsitz oder über die Lanzenmanschette in das Hüllrohr und von dort über einen der LVD oder die Lanzenspitze in das Fahrkammerrohr übertragen werden. Auf der dazwischenliegenden Strecke von 10 Metern besteht nur die Ankopplung über das Wasser. In den Signalen des CA-607 ist ein deutliches Intensitätsmaximum im Bereich der Anschlagposition zu erkennen. Auf den darunterliegenden Positionen fällt die Intensität der Einzerschallereignisse zum Dichtsitz hin ab. Oberhalb der Anschlagposition sinken die Burstmaximalamplituden in den Signalen zunächst auf Höhe des Knoten 29 ebenfalls ab, steigen dann aber auf Höhe der Lanzenmanschette an und fallen auf den Detektorpositionen zur Lanzenspitze hin wieder ab. Auch hier wirkt sich wiederum der komplexe Mechanismus von Schallübertragung und Schalldämpfung innerhalb der Instrumentierungslanze aus. Dieser Zusammenhang spiegelt sich auch in den statistischen Kennwerten

Standardabweichung und Kurtosis der Signale des CA-607 wieder (Bild 4.6).

Bei der Nullmessung ohne Anschläge liegen alle Standardabweichungen unter 0,1 und die Werte der Kurtosis liegen auf allen Meßpositionen um 3. Bei Anschlägen des Hammers steigt die Standardabweichung und Kurtosis auf allen Positionen stark an. Besonders hohe Standardabweichungen weisen die Meßpositionen der Steckverbindung, des Knoten 29 und als Maximalwert die Position der Lanzenmanschette auf. Dagegen treten die höchsten Kurtosiswerte in den Signalen der Position Steckverbindung und der zwei darunterliegenden Meßpositionen auf.

Für die Beurteilung der mittleren Amplitudenhöhe in Kombination mit der Form von Körperschallsignalen eignet sich das Produkt aus dimensionsbehafteter Standardabweichung und dimensionslosem Kurtosiswert. Der so errechnete Kennwert

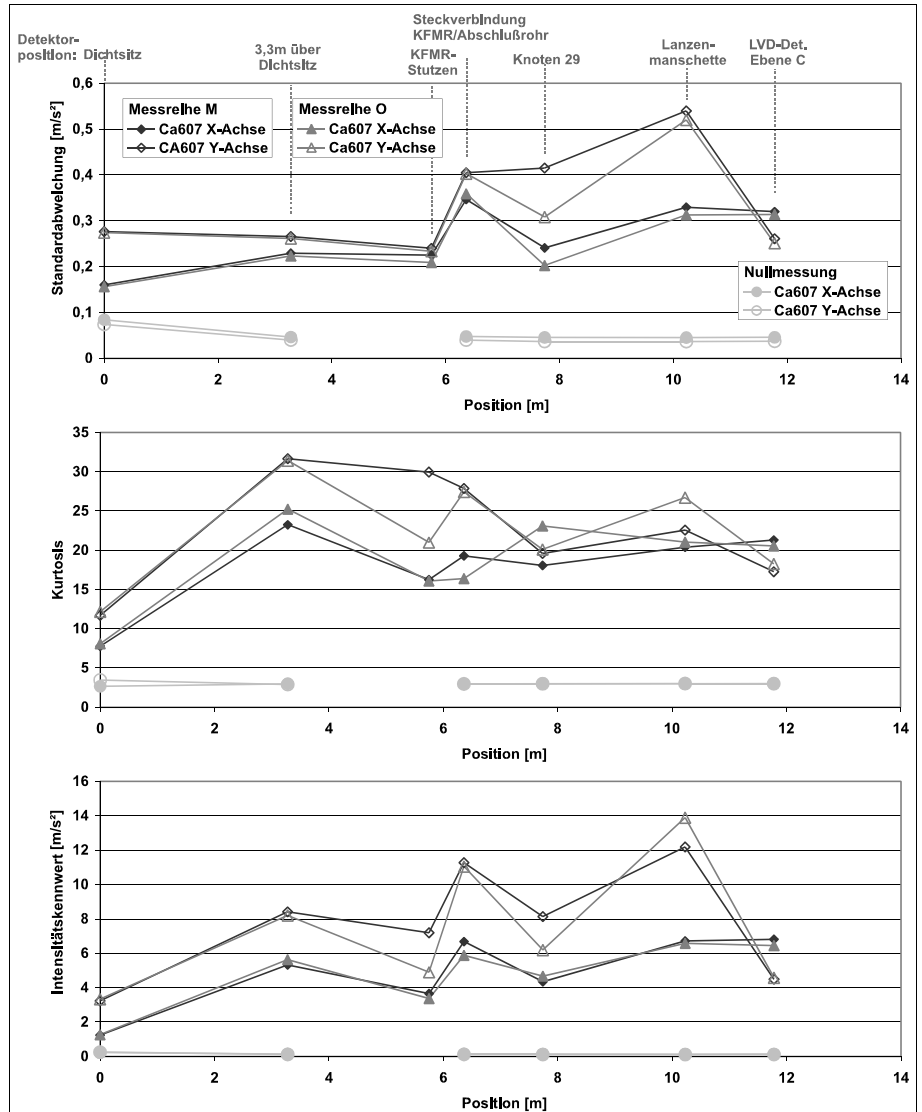


Bild 4.6: Signalkennwerte der Signale des CA-607 in Abhängigkeit von der Meßposition im Fahrkammerrohr

wird hier als „Intensitätskennwert“ definiert und dient zur gemeinsamen Bewertung der Signalamplitude und der Burstenteile und damit zur Einordnung der Stärke der in einem Signal enthaltenen Anschlagereignisse. Aus den Produkten von Standardabweichung und Kurtosis ergibt sich der in Bild 4.6 im unteren Achsensystem dargestellte Verlauf des Intensitätskennwertes für die einzelnen Meßpositionen. Die Auswertungen der Nullmessung ohne Anschlagereignisse ergeben für alle Signale niedrige Intensitätskennwerte um 0,1. Bei den Messungen mit Anschlägen an das KFMR auf Höhe der Steckverbindung sind die Intensitätskennwerte auf allen Meßpositionen um mindestens den Faktor 10 größer. Im Bereich der Steckverbindung sind die Werte bis zu 100-fach höher als ohne Anschlagereignisse. Wiederum bilden sich zwei relative Maxima im Intensitätskennwert aus: Eines auf der Position Steckverbindung und eines auf Höhe der LVD-Lanzenmanschette. Somit ist eine eindeutige Ortung der Schalleinleitungsstelle

allein durch Beschleunigungsmessungen auf verschiedenen Höhenpositionen im Fahrkammerrohr nicht möglich.

4.3. Schlußfolgerungen zur Interpretation der Messungen aus dem Kraftwerk

Die im Fahrkammerrohr gemessenen Beschleunigungssignale geben die Schwingungen der Instrumentierungslanzen im Kernbereich sehr exakt wieder. Dies ist auf die Schwingungsankopplung zwischen Hüll- und Fahrkammerrohr durch den oberen Verriegelungsstift und die im Ringspalt zwischen beiden Rohren positionierten Miniaturspaltkammern zurückzuführen. Unterhalb des Kerns liegt eine derart feste Ankopplung nur im Bereich des Dichtsitzes der Lanze vor. Dazwischen kann das Fahrkammerrohr, weitestgehend unabhängig von den anderen Rohren der Lanze, nur durch das umgebende Wasser gedämpft, Schwingungen ausführen.

Auftretende Körperschallsignaturen konnten auf allen Meßpositionen sicher erkannt werden. Die Schalleinleitungsstelle läßt sich im Modell nicht durch Ermittlung von Laufzeitunterschieden zwischen den Signalen des Beschleunigungsaufnehmers im Fahrkammerrohr und den außen fest montierten Beschleunigungsaufnehmern bestimmen. Die Signale der Messungen, die im Bereich um die Schalleinleitungsstelle durchgeführt werden, zeichnen sich zwar durch erhöhte Burstmaximalamplituden im Fahrkammerrohr gegenüber denen weiter entfernter Meßpositionen aus, aber eine exakte, iterative Ortung der Schalleinleitungsstelle ist hierdurch nicht möglich. Unter Berücksichtigung des konstruktiven Aufbaus der Lanze läßt sich die Anschlagposition eingrenzen.

5. Beschleunigungsmessungen mit dem Detektorprototyp in Siedewasserreaktoren

Die Beschleunigungsmessungen in den Fahrkammersystemen hatten das Ziel, die Schwingungen der Instrumentierungslanzen zu analysieren und die Lanzen im Hinblick auf Anzeichen für Anschläge zwischen den Einzelrohren der Lanze bzw. der Lanze an umgebende Strukturteile zu untersuchen [65]. Um ein detailliertes Schwingungsbild einer Lanze ableiten zu können, wurden auf einigen Kernpositionen bis zu zwölf Beschleunigungsmessungen auf verschiedenen Höhenpositionen durchgeführt. Die an die zu erwartenden Schwingfrequenzen (bis 15 Hz) angepaßten niedrigen Abtastfrequenzen erfordern hierbei eine Meßzeit von 15 min bis 30 min pro Messung, um für die Korrelationsanalyse eine hinreichende statistische Genauigkeit zu erzielen (vgl. Kap. 2.3.3.).

Die Suche nach eventuellen Anschlagvorgängen erfolgt durch Analyse der Beschleunigungssignale im Zeitbereich (z.B. durch Abhören). Bei den hier untersuchten Instrumentierungslanzen lassen sich erfahrungsgemäß bereits mit einer relativ kurzen Meßzeit von einigen Sekunden eventuell vorhandene Anschläge identifizieren. Dies ermöglicht die Untersuchung aller Kernpositionen in Form einer Reihenuntersuchung.

Die Zielsetzungen der Schwingungs- und Körperschallanalysen erfordern unterschiedliche Vorgehensweisen in Messung und Auswertung. Deshalb werden die Schwingungs- und die Körperschallanalysen der LVD-Instrumentierungslanzen im folgenden getrennt behandelt.

5.1. Vorbereitung der Fahrkammersysteme

Zwischen den zur Kalibrierung der Signale der LVD-Detektoren durchgeführten Fahrkammermessungen liegt die Fahrkammer auf Höhe der Bleiendlagenschalter innerhalb der Bleiabschirmung (Bild 2.4). Hierdurch wird sowohl die Fahrkammer als auch ca. 5 m des Fahrkammerkabels abgeschirmt. Der Fahrkammerantrieb ist über die Wählvorrichtung mit der Leitung, die zur Entsorgungseinrichtung führt, verbunden, wodurch alle übrigen Fahrkammerrohrleitungen, die in den RDB münden, durch die Wählvorrichtung gegenüber dem Antriebsraum abgedichtet sind. Zusätzlich wird der Fahrkammerantriebsraum durch Feuchtefühler und Scherventil gegen eventuelle Leckagen, durch die Primärkreiswasser in das Fahrkammersystem gelangen könnte, abgesichert.

Zur Vorbereitung der Messungen muß, anstelle der Fahrkammer, der Beschleunigungsdetektor in das Fahrkammersystem eingebracht werden. Hierfür wird der Fahrkammerantrieb mechanisch am Antriebsritzel freigeschaltet und das Fahrkammerkabel per Handrad komplett auf die Fahrkammerantriebsstrommel aufgewickelt. Zur Entnahme der Fahrkammer wird das Fahrkammerrohr mittels der Verschraubung am Antriebsgehäuse geöffnet und die Fahrkammer mit einer ca. 2 cm starken Bleiabschirmung umschlossen und im Antriebsgehäuse abgelegt. Anschließend wird das gesamte Antriebsgehäuse mit Bleimatten abgehängt (Bild 5.1). Die verbleibende Ortsdosisleistung ist hauptsächlich von der Aktivität der Fahrkammer und des Metallmantelkabels und damit von der Abklingzeit seit dem letzten Fahrkammerlauf abhängig.

Die Kabeltrommel des CA-607 wird neben oder zwischen den Fahrkammerantrieben aufgestellt, der Detektor aus seiner Bleiabschirmung entnommen und ca. 6 m in das geöffnete Fahrkammerrohr bis zur Bleiendlage eingeschoben. Der gesamte Umbau kann von zwei Personen in ca. 2 Stunden durchgeführt werden. Da beim Öffnen des Fahrkammerrohres und beim Ausfahren der Fahrkammer bzw. bei Ein- und Ausfahren des Beschleunigungsaufnehmers eventuell aktivierte Partikel aus dem Fahrkammerrohr freigesetzt werden können, ist bei diesen Arbeitsschritten Atemschutz zu tragen. In regelmäßigen Abständen wird die Ortsdosisleistung und eine eventuell auftretende Kontamination durch einen Strahlenschutzmitarbeiter überprüft.



Bild 5.1: Aufbau für Beschleunigungsmessungen, CA-607 im Fahrkammersystem

Für die Messungen wird das Fahrkammerrohr der zu untersuchenden Kernposition über die Wählvorrichtung mit der Leitung zum Fahrkammerantrieb verbunden. Der Detektor wird mittels der Einschubvorrichtung von Hand in das Fahrkammerrohr eingeschoben. Je nach Kernposition beträgt die Fahrstrecke bis zum Dichtsitz der Lanze 17 m bis 22 m. Die Signalaufzeichnung erfolgt im Wartennebenraum, da dort auch die Signale der Standardinstrumentierung mit aufgezeichnet werden können. Nach durchgeführter Messung kann entweder eine andere Position innerhalb derselben Lanzen angefahren oder der Beschleunigungsdetektor bis zum Bleiendlagenschalter zurückgezogen werden, um eine andere Kernposition mittels der Wählvorrichtung anzusteuern.

Nach Abschluß der Messungen verbleibt der Detektor zunächst zum Abklingen in der Bleiabschirmung des Fahrkammersystems. Die Abklingzeit hängt hierbei wesentlich von der Zeit ab, die der Detektor der Neutronenstrahlung innerhalb des Reaktorkerns ausgesetzt war. Erfahrungsgemäß ist die Aktivität des Detektors nach einer Messreihe im Reaktorkern bereits am folgenden Tag soweit abgeklungen, daß er in ein anderes Fahrkammersystem umgesetzt werden kann. Zur Minimierung der aufgenommenen Dosisleistung ist eine möglichst lange Abklingzeit anzustreben. Durch die Abklingzeiten der Fahrkammer vor dem Umbau und des Beschleunigungsaufnehmers vor dem Rückbau des Systems, ergibt sich der optimale Zeitpunkt für die Durchführung der Beschleuni-

gungsmessungen ungefähr in Mitte zwischen zwei Fahrkammerläufen.

Bei den Messungen wurden in den Instrumentierungslanzen zwölf unterschiedliche Meßpositionen innerhalb und außerhalb des Reaktorkerns angefahren. Die Lage der einzelnen Positionen innerhalb des Reaktors zeigt Bild 5.2.

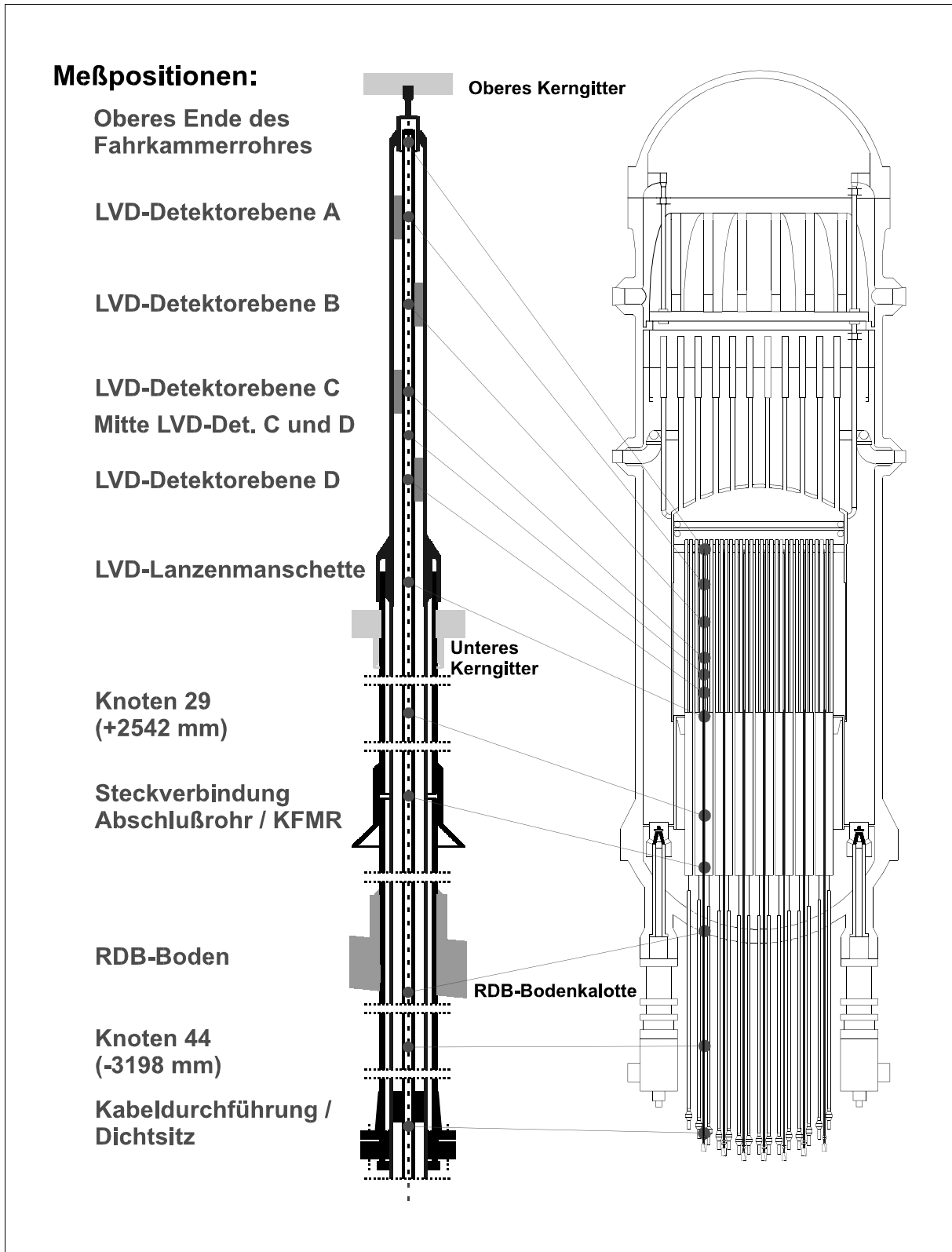


Bild 5.2: Meßpositionen im Fahrkammerrohr der Instrumentierungslanzen

5.2. Schwingungsuntersuchungen der Instrumentierungslanzen

Beim ersten Meßeinsatz im Kernkraftwerk wurde der Prototyp-Beschleunigungsdetektor über zwei Fahrkammersysteme in fünf Instrumentierungslanzen des Block C eingebracht. Die Auswahl erfolgte aufgrund der Ergebnisse von Rauschanalysen der Neutronenflußsignale. Drei der ausgewählten Lanzen wiesen dabei ein durchschnittliches Schwingungsverhalten auf (Nr. 15 KP.: 16/37, Nr.16 KP.: 24/37 und Nr.44 KP.: 40/05, Bild 2.2). Weitere zwei Lanzen wurden wegen eines besonderen Schwingungsverhaltens ausgewählt. Dabei sollten durch Messungen im FKR das ausgeprägte Schwingungsverhalten der Lanze 26 (48/29) sowie das Schwingungsverhalten der Lanze 43 (KP.: 32/05) untersucht werden.

5.2.1 Instrumentierungslanzen mit ausgeprägter Eigenschwingung

Im folgenden werden die Ergebnisse der Schwingungsuntersuchung der Instrumentierungslanze 26 aus Block C dargestellt. Diese werden den Resultaten der Rauschanalyse der Neutronenflußsignale (vgl. Kap 2.4.) gegenübergestellt.

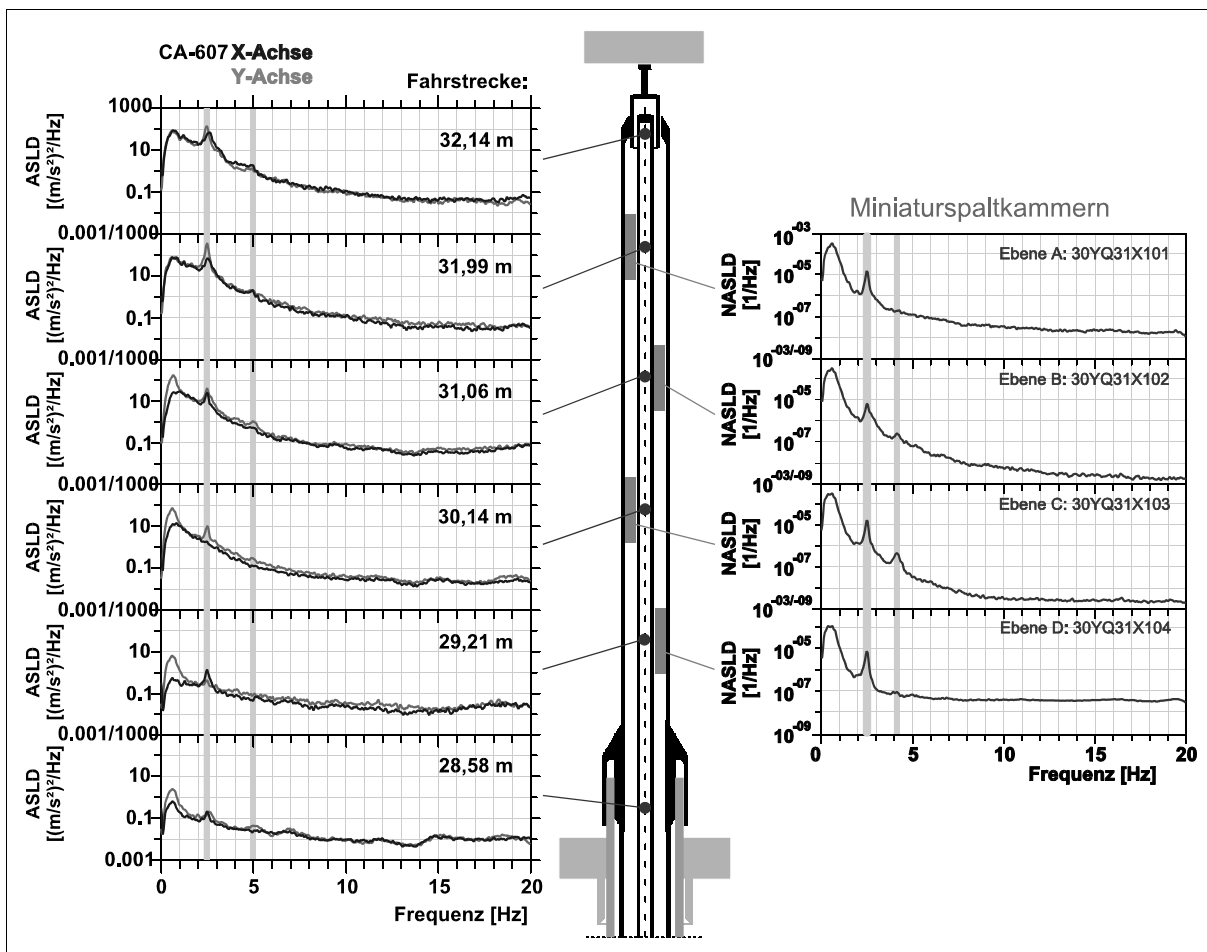


Bild 5.3: ASLD der Signale der Beschleunigungsmessungen im Fahrkammerrohr und der Signale der Miniaturspaltkammern der LVD-Lanze C-26 (KP.:48/29)

Innerhalb der Instrumentierungslanze 26 wurde der Beschleunigungsaufnehmer im Bereich des Reaktorkerns auf den Höhenpositionen der LVD-Lanzenmanschette, der vier LVD-Ebenen und am oberen Ende des Fahrkammerrohres, nahe des oberen Kerngitters, positioniert. Auf allen Meßpositionen ist meist in beiden, aber zumindest im Signal einer Meßachse des CA-607, ein Peak um 2,5 Hz in der ASLD zu erkennen (Bild 5.3, links). Es handelt sich hierbei um die „freie“ Lanzenschwingung um 2,5 Hz, die bereits in Kapitel 2.3. beschrieben wurde. Die Schwingung wird auf den sechs Meßpositionen, durch die Meßachsen des Beschleunigungsaufnehmers, jeweils in unterschiedlichen Anteilen gemessen. Dieses Signalverhalten resultiert vermutlich aus den verschiedenen Winkellagen, auf denen die LVD-Detektoren im Ringspalt zwischen Fahrkammerrohr und Hüllrohr positioniert sind. Hierdurch liegt in den einzelnen Meßpositionen im Bereich des Reaktorkerns eine jeweils andere Ausrichtung der Ankopplung zwischen dem Hüllrohr und dem Fahrkammerrohr vor. Die Ursache könnte auch eine geringe Verwindung des Signalkabels des CA-607 während des Verfahrens im Fahrkammerrohr sein.

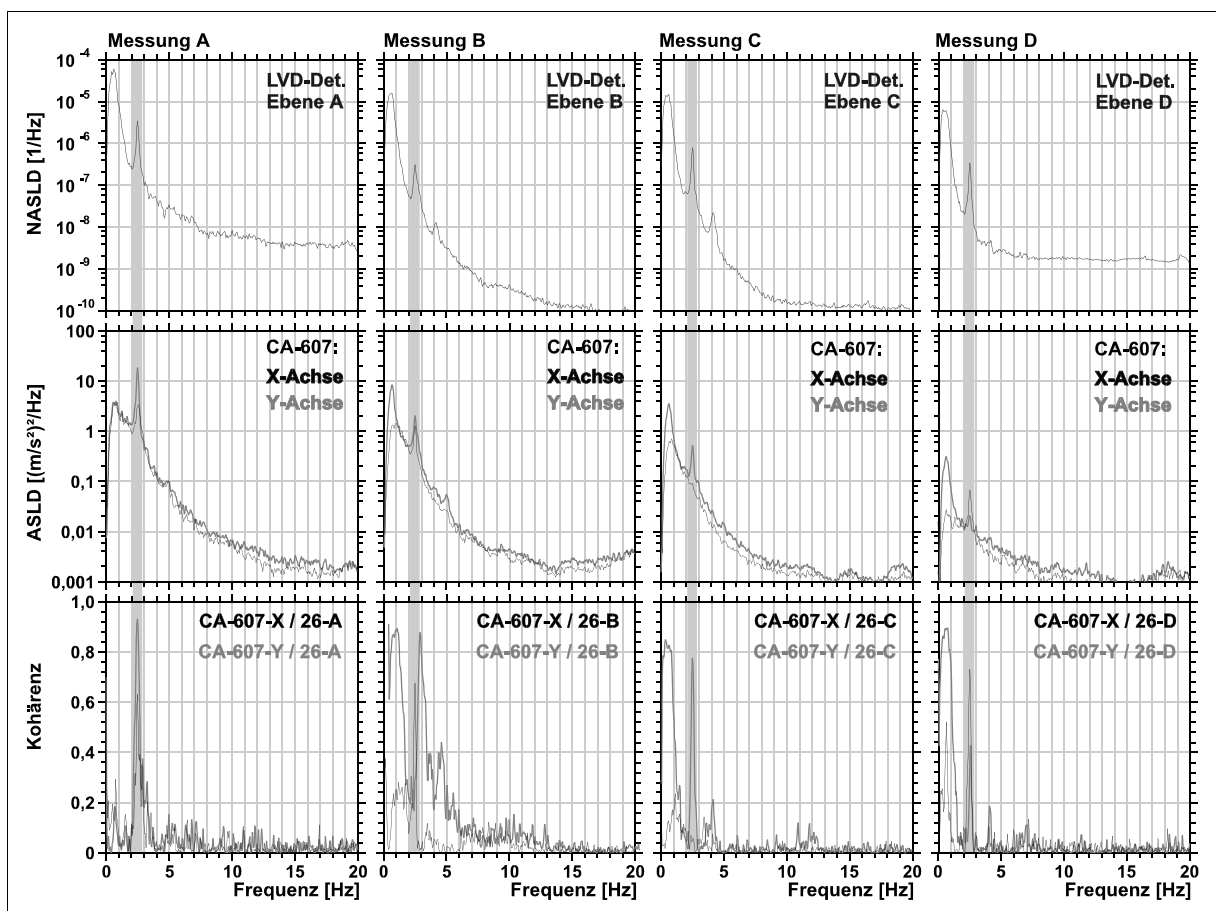


Bild 5.4: ASLD der Signale der Beschleunigungsmessungen im Fahrkammerrohr und der LVD-Detektoren der LVD-Lanze C-26 (KP.:48/29) und Korrelation zwischen den Signalen jeweils gleicher Meßpositionen

Aus der Korrelation ergeben sich schmalbandige Peaks in den Kohärenzen zwischen den Signalen des CA-607 und des bei der jeweiligen Messung auf gleicher Höhe positionierten Neutronenflußdetektors (Bild 5.4). Auch hier zeigt sich die Richtungsabhängigkeit der Schwingung, die von

den beiden Meßachsen des CA-607 unterschiedlich stark registriert wird. Korrelationen zu Signalen anderer Aufnehmer der Standardreaktorinstrumentierung liegen nicht vor.

Bei den Messungen zwischen oberem und unterem Kerngitter tritt in den Signalen des CA-607 ein deutlicher frequenzabhängiger Anstieg der gemessenen Beschleunigungsamplituden auf (s. Kap 5.2.6.). Die Auswirkung dieses Effektes muß bei der Berechnung der Schwingungsamplituden von Signalen, bei deren Messung der Detektor oberhalb des unteren Kerngitters positioniert ist, durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Die aus den Beschleunigungssignalen berechneten Schwingungsamplituden sind in Bild 5.5 dargestellt.

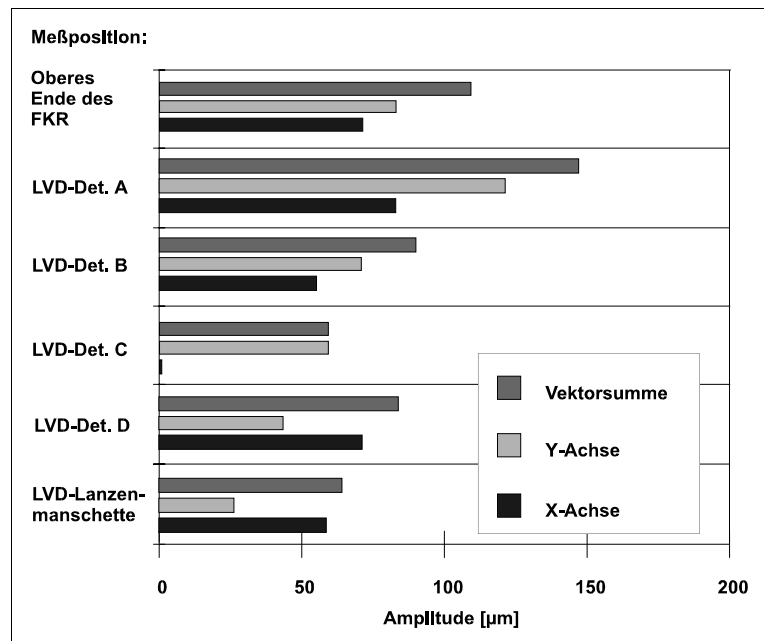


Bild 5.5: Gemessene Amplituden der 2,5 Hz Schwingung der LVD-Lanze C-26

Bei allen Messungen, bei denen der CA-607 innerhalb der Lanze 26 positioniert war, wurden neben den Beschleunigungssignalen auch die Signale der LVD-Detektoren dieser Lanze mit aufgezeichnet (vgl. Bild 5.4). Entsprechend Kapitel 2.3. wurde die jeweils vorliegende Schwingungsform der Lanze aus den relativen Phasenlagen zwischen den Neutronflußsignalen rekonstruiert. Die Position des CA-607 innerhalb der Lanze hat keinen Einfluß auf die Schwingfrequenz oder die Form der Lanzenschwingung. Die Kombination der ermittelten Schwingungsform, mit den zuvor aus den Beschleunigungsmessungen berechneten Schwingungsamplituden, führt zu der in Bild 5.6 dargestellten 2,5-Hz-Schwingung der Instrumentierungslanze zwischen oberem und unterem Kerngitter.

Auf den unterschiedlichen Meßpositionen innerhalb der Instrumentierungslanzen wurde auch jeweils eine Messung mit einer hochfrequenten Abtastrate von 2,5 kHz aufgezeichnet. Diese Messungen wurden auf eventuelle Einzelschallereignisse hin untersucht. Die Auswertung zeigt in den Signalen der Messungen aus Lanze 26 keine Anzeichen für ein Anschlagen der Lanze an benachbarte Strukturen oder zwischen den einzelnen Lanzenrohren.

Wie bereits dargestellt (vgl. Kap 2.4.), bildet sich in den Signalen der Spaltkammern der Lanze 26 auch die Schwingung eines benachbarten Brennelementes/BE-Kastens ab. In der ASLD des Beschleunigungsdetektors ist diese Schwingung nicht zu erkennen. Allenfalls das Beschleunigungssignal der Meßposition LVD-Ebene B korreliert bei dieser Frequenz mit dem Signal des LVD-Detektors 26B. Die anderen Kombinationen der Signale des CA-607 mit den Signalen des LVD der jeweils entsprechenden Höhenlage ergeben maximale Übereinstimmungen von 20 % bei dieser Frequenz. Dies bestätigt die zuvor getroffene Annahme einer Schwingung um 4 Hz, die sich im wesentlichen nicht als Schwingung auf die Lanze überträgt, sondern als periodische Neutronenflußschwankung in den Signalen der Spaltkammern abbildet.

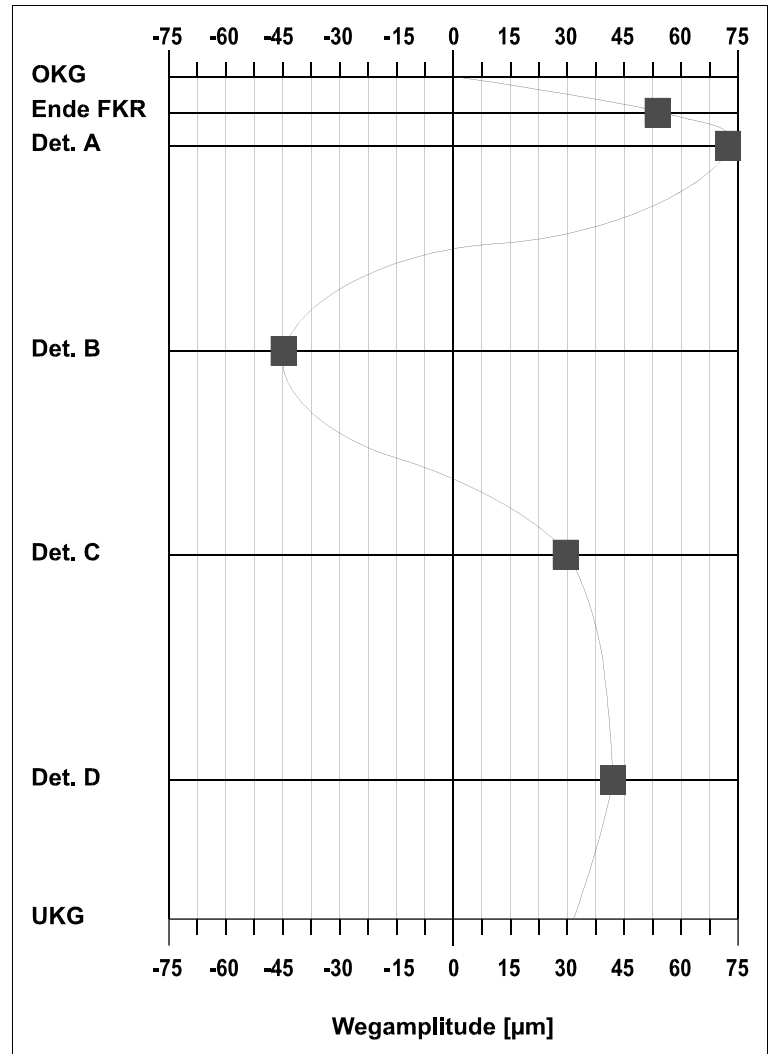


Bild 5.6: Schwingung der LVD-Lanze 26 um 2,5 Hz

Um 5,0 Hz sind in den Signalen des CA-607 schwach ausgeprägte periodische Anteile zu erkennen, die sich nicht in der ASLD und auch durch Korrelationsanalyse kaum in den Signalen der Neutronenflußdetektoren nachweisen lassen. Die Betrachtung aller Signale der Positionen, auf denen innerhalb der Lanze 26 Beschleunigungsmessungen durchgeführt wurden, zeigt, daß es sich dabei um eine Schwingung handelt, die im Bereich unterhalb des Reaktorkerns deutlich stärker ausgeprägt ist, und die sich von dort in den Kern fortpflanzt (Bild 5.7). Es handelt sich dabei um eine Schwingung des Fahrkammerrohres, die hauptsächlich im Bereich zwischen unterem Kerngitter und dem Dichtsitz der Instrumentierlanze auftritt. Im Dichtsitz wird diese Schwingung über die steife Verbindung aller drei Rohre und durch die in Relation zum Fahrkammerrohr großen Massen der äußeren Lanzenrohre so stark gedämpft, daß sie an dieser Meßposition im Fahrkammerrohr nicht mehr feststellbar ist. Im Kernbereich wird die Bewegung durch die im Ringspalt zwischen Hüllrohr und Fahrkammerrohr positionierten Detektoren ebenfalls stark gedämpft.

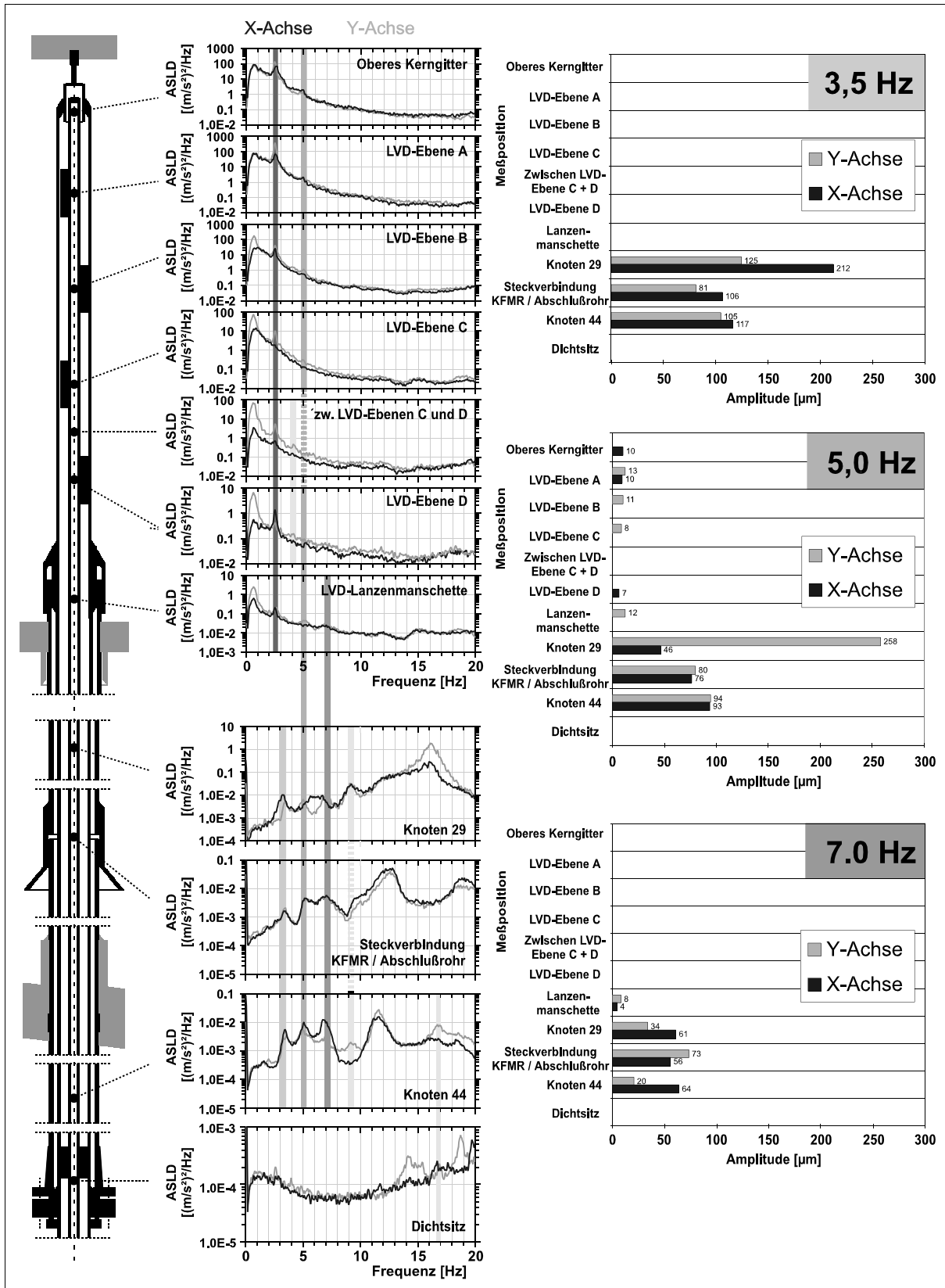


Bild 5.7: Schwingungen der Instrumentierungslanze C-26 in den ASLD der Signale der innerhalb der Lanze durchgeführten Beschleunigungsmessungen

Unterhalb des unteren Kerngitters wurden weitere Schwingungen der Instrumentierungslanze nachgewiesen. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Schwingungen des Fahrkammerrohres,

deren Amplituden sich nicht auf das umgebende Hüllrohr übertragen, da an diesen Positionen nur über das im Ringspalt enthaltene Wasser eine Schwingungsankopplung zwischen den Rohren gegeben ist. Die Schwingungen, die sich dabei im Fahrkammerrohr über mehrere Meßpositionen erstrecken, sind in Bild 5.7 markiert, und die resultierenden Schwingungsamplituden sind als Balkendiagramm angegeben.

Die Ergebnisse bestätigen das Resultat der Rauschanalyse der Neutronenflußsignale der Lanze 26 (vgl. Kap 2.4.). Zusätzlich ergänzen sie diese durch die absoluten Schwingungsamplituden und durch die Untersuchung der Schwingungen, die unterhalb des Reaktorkerns vorliegen. Die Auswertung der hochfrequenten Messungen ergab keine Anzeichen für ein Anschlagen zwischen den Lanzenrohren oder für ein Anschlagen der Lanze gegen an sie angrenzende Bauteile.

5.2.2. Kombinierte Lanzen/Brennelementschwingungen

Die Neutronenflußsignale der Instrumentierungslanzen 15 (KP.: 16/37) und 16 (KP.: 24/37) enthalten periodische Anteile, die auf Schwingungen der Kerneinbauten zurückzuführen sind. Die Schwingungen dieser Lanzen können als typische Beispiele für das Schwingungsverhalten der meisten Instrumentierungslanzen angesehen werden. Sie wurden für Messungen mit dem Beschleunigungsdetektor CA-607 ausgewählt, da die Schwingungsanteile in den Neutronenflußsignalen der beiden Lanzen deutlich ausgeprägt sind.

In den ASLD der Detektorsignale der Lanze 15 ist besonders in den Spektren der unteren Detektorebenen im Bereich um 4 Hz ein markanter Schwingungspeak zu erkennen (Bild 5.8). Die Signale der unteren drei Neutronenflußdetektoren sind in diesem Frequenzbereich zu 80 % korreliert und phasengleich. Daneben sind im Signal der Ebene D um ca. 2,2 Hz und um 6 Hz periodische Signalanteile zu erkennen, bei denen aber keine Kohärenz zwischen diesem Signal und den anderen Detektorsignalen der LVD-Lanze besteht.

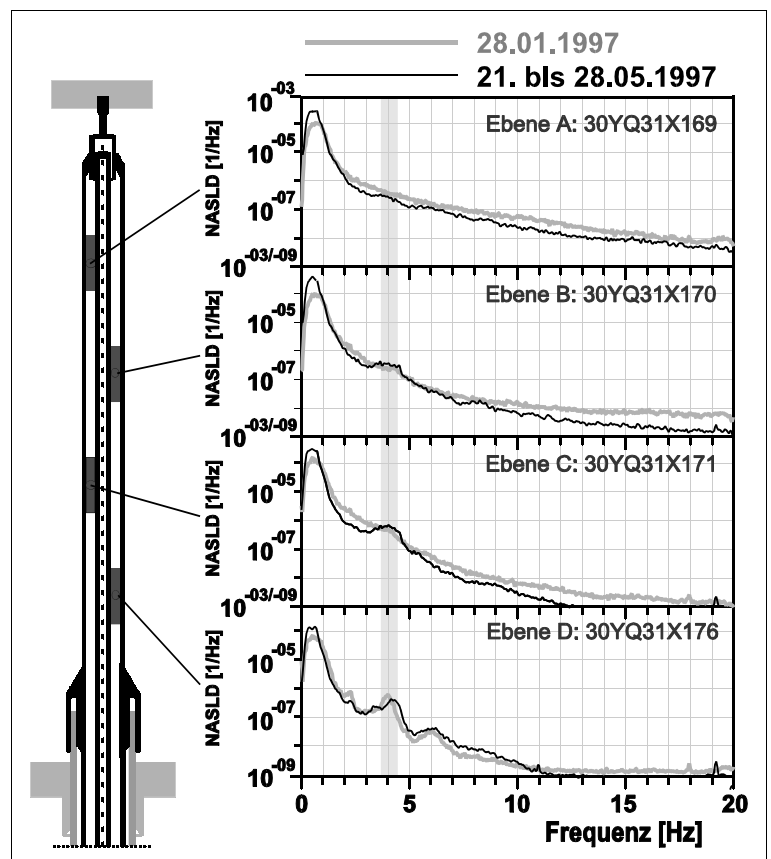


Bild 5.8: ASLD der Signale der Miniaturspaltkammern der LVD-Lanze C-15 (KP.:16/37)

Innerhalb dieser Instrumentierungslanze wurden an zehn Meßpositionen mit dem CA-607 Beschleunigungsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Meßreihen sind in Bild 5.9 zusammengefaßt.

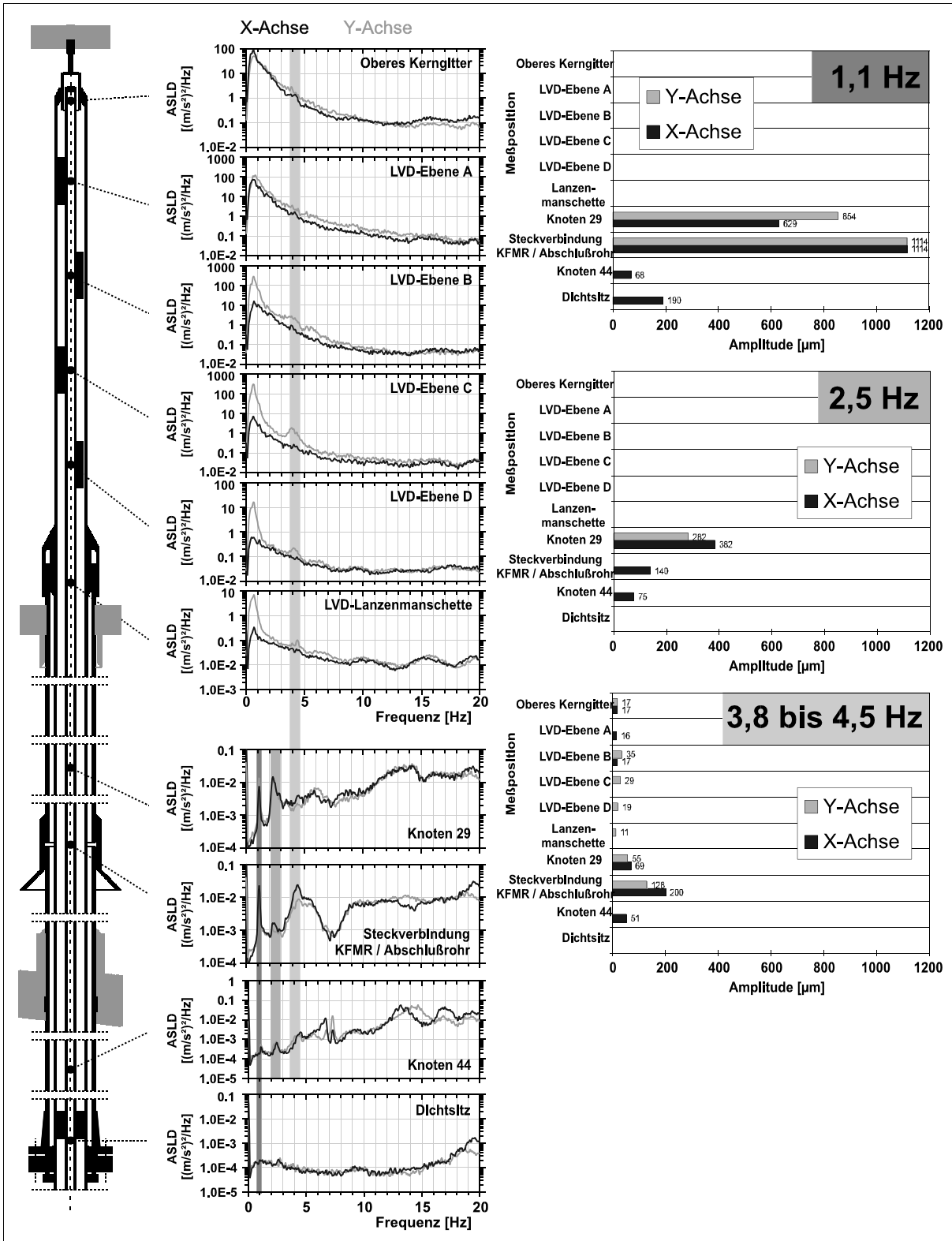


Bild 5.9: Schwingungen der Instrumentierungslanze C-15 in den ASLD der Signale der innerhalb der Lanze durchgeführten Beschleunigungsmessungen

Bei 2,5 Hz wird auf allen Meßpositionen unterhalb des unteren Kerngitters, mit Ausnahme des Dichtsitzes, eine Schwingung gemessen. Die Schwingung des Fahrkammerrohres wird im Dichtsitz über die steife Verbindung aller drei Rohre stark gedämpft und ist deshalb dort nicht mehr feststellbar. Bei 1,1 Hz tritt im Bereich unterhalb des unteren Kerngitters eine schmalbandige Schwingung auf. Da die Schwingung auch auf der Position des Dichtsitzes gemessen wird, liegt hier eine gemeinsame Schwingung der Lanzenrohre und des Abschlußrohres vor. Beide Schwingungen setzen sich über das Fahrkammerrohr in den Kernbereich fort, wo sie an der ersten Kontaktstelle zwischen dem Fahrkammerrohr und dem Hüllrohr auf Höhe der Detektorebene D stark gedämpft werden und oberhalb dieser Position nicht mehr feststellbar sind.

Zwischen 3,8 und 4,5 Hz wird durch den Beschleunigungsaufnehmer eine Schwingung der LVD-Lanze im Reaktorkern gemessen, die sich über das Fahrkammerrohr nach unten hin fortsetzt und dadurch auf allen Meßpositionen innerhalb der Lanze 15, mit Ausnahme der des Dichtsitzes, auftritt. Im Kernbereich weist die Schwingung auf Höhe der Detektorebenen B und C die größten Amplituden auf. Die hohe Korrelation zwischen Beschleunigungs- und Neutronenflußsignalen bei dieser Frequenz zeigt, daß es sich um dieselbe Schwingung handelt, die sich auch in den Signalen der Miniaturspaltkammern abbildet. Es handelt sich hierbei vermutlich um die Schwingung eines der Lanze benachbarten Brennelementes, die sich mechanisch auf die Lanze überträgt und diese zu Schwingungen anregt. Die Übertragung geschieht nicht über die Lagerungsstellen der Lanze, da bei dieser Frequenz durch die nicht vorhandene Kohärenz zwischen den Neutronenflußsignalen benachbarter LVD-Lanzen eine Schwingung der Kerngitter ausgeschlossen werden kann. Der mechanische Übertragungsweg vom Brennelement zur Instrumentierungslanze ist wahrscheinlich durch ein Anliegen der Instrumentierungslanze an einem oder an zwei der Lanze benachbarten Brennelementen/BE-Kästen gegeben.

Das Schwingungsverhalten der Lanze 16 (KP.: 24/37) ist dem der zuvor beschriebenen Lanze 15 sehr ähnlich. Die Analyse der Neutronenflußsignale der Detektoren dieser Lanze und der Signale des Beschleunigungsaufnehmers im Fahrkammerrohr zeigt um 4 Hz eine Schwingung eines der Lanze benachbarten Brennelementes, die sich mechanisch auf die Lanze überträgt (Bild 5.10). Die Amplitude dieser Schwingung ist hier aber geringer als bei der Lanze 15.

Die Kernposition 24/37 ist mit einer Lanze vom Typ NA-300 (GE/Reuter-Stokes) instrumentiert. Obwohl die 4-Hz-Schwingung in den Signalen der Beschleunigungsmessung im Fahrkammerrohr auf Höhe der Detektorebene A deutlich hervortritt, ist sie im Neutronenflußsignal des Detektors dieser Ebene nicht festzustellen. Allenfalls in der Korrelation zwischen diesen Signalen ergibt sich eine 20-prozentige Übereinstimmung bei dieser Frequenz. Es bestätigt sich hierdurch, daß der in Kapitel 2.4. beschriebene lanzentypabhängige Effekt nicht auf ein besonderes Schwingungsverhalten dieser Lanzen zurückzuführen ist. Durch den höheren Dampfblasenanteil im oberen Bereich des Hüllrohres überdeckt ein breitbandiges Rauschen eventuelle Schwingungsanteile in den Signalen der oberen Detektorebenen dieses Lanzentyps.

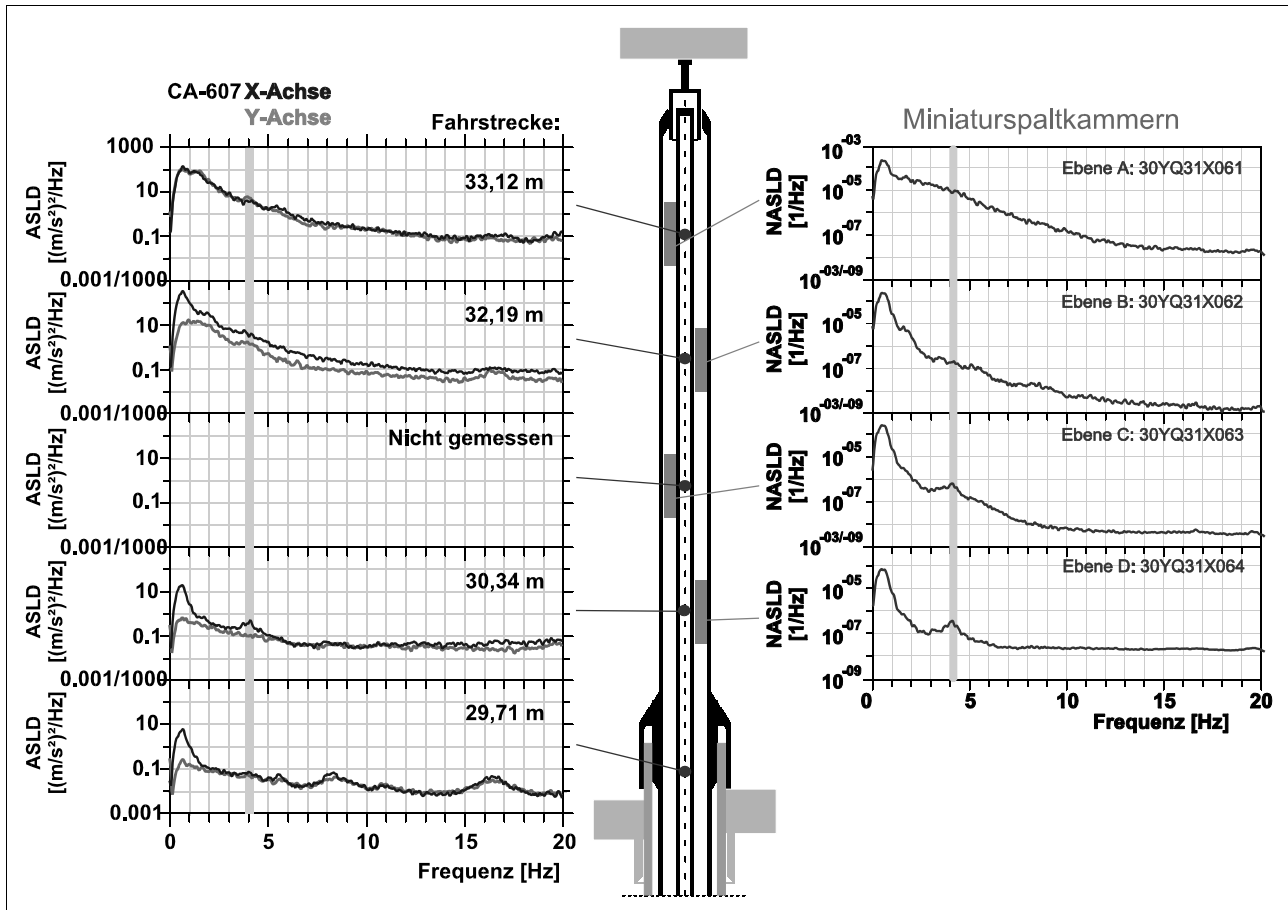


Bild 5.10: ASLD der Signale der Beschleunigungsmessungen im Fahrkammerrohr und der Signale der Miniaturspaltkammern der LVD-Lanze C-16 (KP.:24/37)

5.2.3. Instrumentierungslanzen mit auffälligem Schwingungsverhalten

Bei der Rauschanalyse der Signale der Detektoren der LVD-Lanze 43 (KP.: 32/05) ist eine Schwingung im oberen Bereich der Instrumentierungslanze um 1,6 Hz festgestellt worden, die bei der ersten Messung im betreffenden Brennelementzyklus nicht vorhanden war (Bild 5.11, Messungen 1 und 2). Hauptsächlich trat die Schwingung in den Signalen der oberen drei Neutronenflußdetektoren als schmalbandiger Peak hervor. Alle vier Signale waren bei dieser Frequenz korreliert. Durch die Auswertung der relativen Phasenlagen zwischen den Signalen wurde die dargestellte Schwingungsform der Lanze rekonstruiert.

Aufgrund der Veränderung der Schwingung zwischen der ersten und der zweiten Rauschmessung des BEZ wurden innerhalb dieser Lanze, zeitgleich mit der in Bild 5.11 dargestellten dritten Rauschmessung, Messungen mit dem Beschleunigungsdetektor durchgeführt.

Die im Neutronenfluß identifizierte Schwingung im Frequenzbereich um 1,6 Hz wurde auf allen Meßpositionen, mit Ausnahme des Dichtsitzes und der Lanzenmanschette, auch in den Signalen der Beschleunigungsmessungen im Fahrkammerrohr festgestellt. Die Amplitude war auf Höhe der Detektorebene A am größten (Bild 5.12). Die Schwingungsamplituden, die auf Höhe der Detektorebenen B und C bei dieser Frequenz ermittelt wurden, sind nur eingeschränkt be-

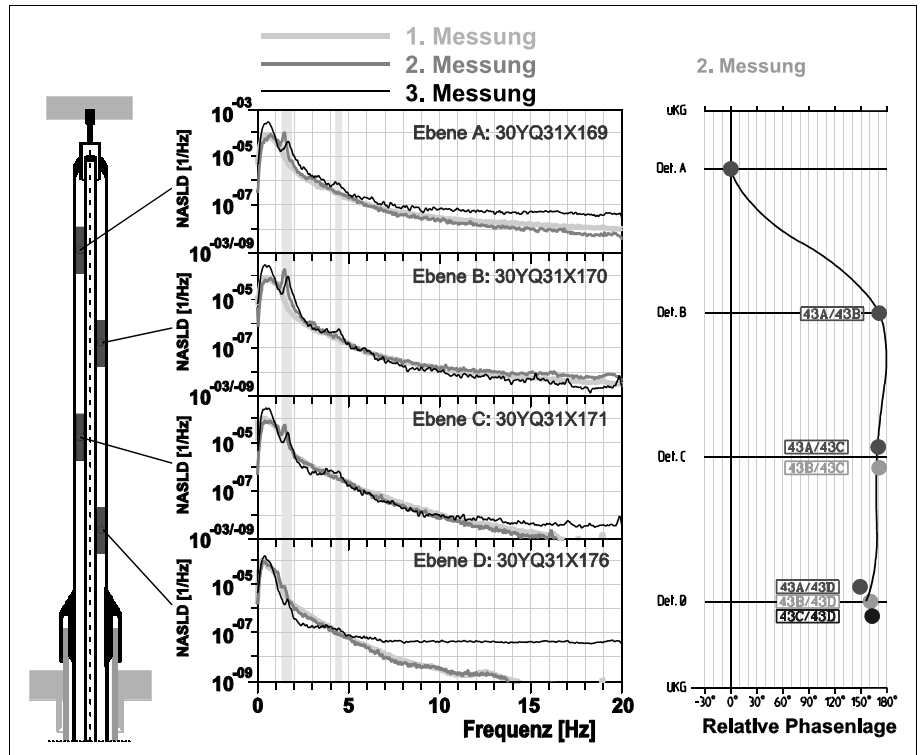


Bild 5.11: ASLD der Signale der LVD-Lanze C-43 (32/05) und aus den relativen Phasenlagen resultierendes Schwingungsbild

lastbar, da hier das Peakmaximum nicht die in Kapitel 3.4. festgelegte, für die Anwendung der Gleichung (30) erforderliche, Mindestamplitude zur Bestimmung der Peakfläche erreicht.

Die Signale des CA-607 und der Neutronenflußdetektoren sind bei den Messungen im Kernbereich bei dieser Frequenz deutlich korreliert. Die Schwingung setzt sich im Bereich unter dem unteren Kerngitter fort. Auf der Position des Dichtsitzes ist sie nicht mehr feststellbar. Vermutlich wird sie dort über die steife Verbindung zwischen den Rohren durch die relativ hohe Masse der äußeren Lanzenrohre stark gedämpft. Im Bereich der Lanzenmanschette deutet die kaum vorhandene Schwingungsamplitude auf einen Schwingungsknoten in diesem Bereich. Anzeichen für eventuelle Anschlagvorgänge wurden nicht gefunden.

Auch bei der Lanze 43 bildet sich in den Neutronenflußsignalen, neben der beschriebenen Lanzenschwingung, im Bereich zwischen 4 Hz und 5 Hz die Schwingung eines Brennelementes bzw. BE-Kastens ab. Diese Schwingung, die in den Signalen der Ebenen B und C am stärksten hervortritt, ist auch bei den Beschleunigungsmessungen im Fahrkammerrohr auf Höhe der LVD-Ebenen gemessen worden (Bild 5.12). Die höchsten Korrelationen zwischen den Beschleunigungs- und den Neutronenflußsignalen treten bei der Messung des CA-607 im Bereich der Ebene C auf. Die Schwingung eines der Lanze benachbarten Brennelementes überträgt sich vermutlich mechanisch auf die Instrumentierungslanze. Dies könnte der Grund für das, gegenüber der LVD-Lanze 26 abweichende Schwingungsverhalten der Lanze 43 sein. Ein Anliegen der Lanze an einem benachbarten Brennelementkasten im Bereich der unteren Detektorebenen führt wahrscheinlich zu den Abweichungen der Schwingung in Frequenz und Form, gegenüber einer „freien“ Grundschwingung im Kernbereich.

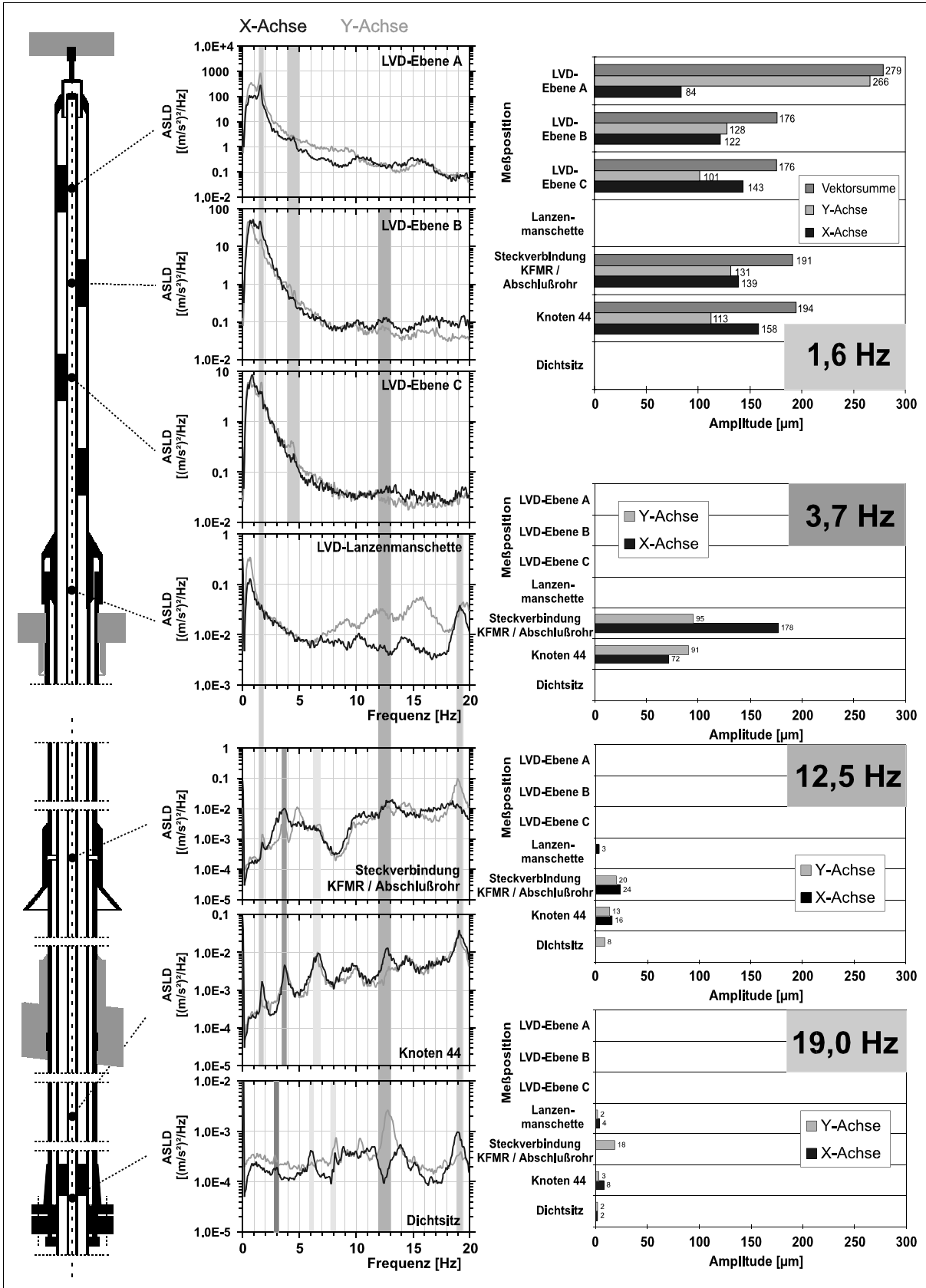


Bild 5.12: Schwingungen der Instrumentierungslanze C-43 in den ASLD der Signale der innerhalb der Lanze durchgeführten Beschleunigungsmessungen

Weitere Schwingungen des Fahrkammerrohres, die unterhalb des unteren Kerngitters gemessen wurden, sind in Bild 5.12 markiert. Die Schwingungen bei 12,5 Hz und 19 Hz erstrecken sich vom Dichtsitz der Lanze bis zum Kernbereich. Bei 12,5 Hz sind auch periodische Anteile in den Signalen der Beschleunigungsmessungen, die auf den Positionen der LVD-Ebenen C und B gemessen wurden, vorhanden. Eine Amplitudenbestimmung ist aus diesen Signalanteilen nicht möglich, da sie gegenüber dem Untergrundrauschen nicht genügend hervortreten. Obwohl sich die Schwingung bei 12,5 Hz auch in den Bereich der Montagepositionen der Neutronenflußdetektoren C und B fortsetzt, ist sie nicht in den ASLD der LVD-Signale zu erkennen. Dies ist zum einen auf den zu höheren Frequenzen hin stark abfallenden Frequenzgang der Neutronenflußdetektoren zurückzuführen, zum anderen bewirkt die Schwingung nur eine relativ kleine periodische Neutronenflußveränderung, da die Amplitude einer Schwingung bei gleichbleibender Beschleunigung exponentiell mit der Schwingfrequenz absinkt. Daß sich die Schwingung auch im Neutronenfluß abbildet, läßt sich anhand der Kohärenzen zwischen den Beschleunigungssignalen und den LVD-Signalen erkennen.

5.2.4. Schwingungsübertragung zwischen den Instrumentierungslanzen

Während der Messungen in der LVD-Lanze 43 waren die Kernflußmeßgehäuserohre der Kernpositionen 24/05 und 40/05, ca. 50 cm oberhalb des Dichtsitzes, außen mit je zwei Beschleunigungsaufnehmern instrumentiert (KP.: 24/05: BA1 und BA2, KP.: 40/05: BA4 und BA5). Hierdurch war es möglich, die Schwingungen der KFMR der Positionen 24/05, 32/05 und 40/05 zeitgleich zu messen. Bild 5.13 zeigt die ASLD der Signale der äußeren Beschleunigungsaufnehmer, die ASLD der Signale der Messungen mit dem CA-607 in den Lanzen 43 und 44 auf Höhe der Dichtsitze und die Korrelationen der einzelnen Signalkombinationen. Im Bild sind die Ergebnisse von zwei Messungen kombiniert dargestellt.

Im Frequenzbereich zwischen 2,7 Hz und 3 Hz ist in den Korrelationsergebnissen eine gemeinsame Schwingung der KFMR der drei Kernpositionen zu erkennen, die auf Kernposition 24/05 am stärksten ausgeprägt ist. Weitere gemeinsame Schwingungen der Lanzenrohre unterhalb des RDB wurden nicht festgestellt.

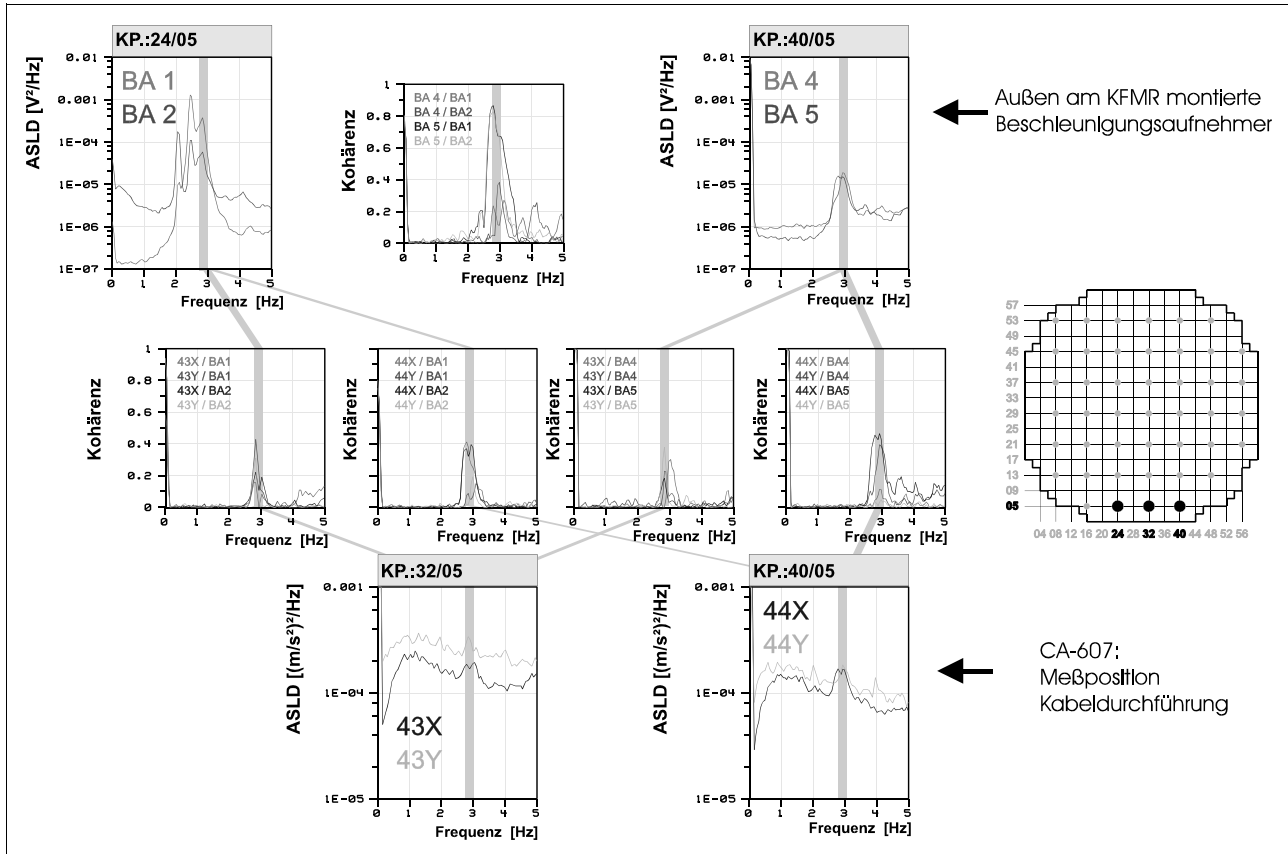


Bild 5.13: Gemeinsame Schwingungen der Kernflußmeßgehäuserohre der Kernpositionen 24/05 bis 40/05

5.2.5. Übertragungsfaktoren zur Quantifizierung von Schwingungsamplituden aus Signalen der Neutronenflußinstrumentierung

Die Schwingungen der Instrumentierungslanzen bewirken eine Verlagerung der LVD-Detektoren im Neutronenflußgradienten des Kerns. Auch die Schwingungen von Brennelementen/BE-Kästen können eine Verlagerung der LVD-Detektoren bewirken, falls sie sich durch ein Anliegen der Lanze an den Brennelementkästen mechanisch auf die Lanze übertragen.

Bei den Beschleunigungsmessungen innerhalb der Instrumentierungslanzen wurden zeitgleich sowohl die Schwingungsamplitude als auch die periodische Schwankung im Neutronenflußsignal aufgezeichnet. Werden diese beiden Größen in Beziehung gesetzt, so läßt sich ein empirischer Übertragungsfaktor ermitteln. Diese neutronenphysikalisch/mechanische Übertragungsgröße ermöglicht die Abschätzung der Schwingwege von Instrumentierungslanzen allein aus den Rauschanteilen der LVD-Detektorsignale. Entsprechend Bild 3.18 läßt sich die Amplitude der Neutronenflußschwankung RMS_n bei der Frequenz f_l nach Gleichung (33) errechnen.

$$RMS_n(f_1) = \sqrt{\frac{\pi}{2} ASLD(f_1) \Delta(f_1) - ASLD_u(f_1) \Delta(f_u)} \quad (33)$$

mit $ASLD(f_i)$ Peakamplitude bei der Frequenz (f_i)
 $\Delta(f_i)$ Peakbreite auf halber Höhe der Maximalamplitude
 $ASLD_u(f_i)$ Untergrundhöhe
 $\Delta(f_u)$ Peakbreite auf Untergrundhöhe

Der Übertragungs- oder Skalierungsfaktor (SF) für die X- und die Y-Richtung ergibt sich aus dem Quotienten der Amplitude der Neutronenflußschwankung ($RMS_N(f_i)$) und den, aus den Signalen des Beschleunigungsaufnehmers errechneten Schwingwegen ($s(f_i) = RMS_{X,Y}(f_i)$) (34).

$$SF_{(x,y)}(f_1) = \frac{\text{Neutronenflußschwankung}}{\text{Schwingungsamplitude}} = \frac{RMS_n(f_1)}{RMS_{(x,y)}(f_1)} \quad (34)$$

Der Skalierungsfaktor wird pro Messung jeweils für den Neutronenflußdetektor berechnet, auf dessen Höhe der CA-607 im Fahrkammerrohr positioniert ist. Voraussetzung für die Berechnung ist, daß beide Signale bei der entsprechenden Frequenz korreliert sind. Teilt sich die Schwingung zwischen den Meßachsen des CA-607 auf, so ist nach erfolgter vektorieller Addition der Signale beider Meßrichtungen des CA-607 der Übertragungsfaktor zur Gesamtamplitude zu ermitteln.

Frequenz	Kernpos. (LA.Nr.)	Meß- position	Schwingungsamplitude [μm]			RMS_{Neutron}	Skalierungsfaktor [$1/\mu\text{m}$]		
			Meßachse CA-607		Vektor- summe		Meßachse CA-607		Vektor- summe
			X	Y			X	Y	
1,6 Hz	32/05 (43)	Det. A	83,6	265,9	278,7	0,00359	4,3E-5	1,4E-5	1,29E-5
		Det. B	121,6	127,7	176,3	0,00441	3,6E-5	3,5E-5	2,50E-5
		Det. C	143,9	101,3	176,0	0,00213	1,5E-5	2,1E-5	1,21E-5
2,5 Hz	48/29 (26)	Det. A	82,8	121,3	146,8	0,00172	2,1E-5	1,4E-5	1,17E-5
		Det. B	55,3	70,6	89,7	0,00104	1,9E-5	1,5E-5	1,16E-5
		Det. C		59,0		0,00146		2,5E-5	
		Det. D	71,4	43,6	83,7	0,00119	1,7E-5	2,7E-5	1,42E-5
4,0 Hz	16/37 (15)	Det. C		28,9		0,00080		2,8E-05	
4,2 Hz		Det. D		18,8		0,00058		3,1E-05	
4,0 Hz	24/37 (16)	Det. D		22,8		0,00064		2,8E-05	

Tabelle 5: Übertragungsfaktoren zwischen Neutronenflußschwankung und zugrundeliegender Schwingungsamplitude der untersuchten Lanzenschwingungen

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Neben der Schwingfrequenz und der untersuchten Detektorposition sind zunächst die ermittelten Schwingungsamplituden, nach Meßachsen getrennt und falls möglich vektoraddiert, aufgelistet. Daneben sind die Amplituden der Neutronenflußschwankung und die resultierenden Übertragungsfaktoren aufgelistet. Die Werte der Übertragungsfaktoren steigen zu höheren Frequenzen hin an. Dies ist vermutlich auf das Absinken der RMS_n -Werte proportional zur frequenzabhängigen Antwortfunktion der Neutronenflußdetektoren zurückzuführen. Für Schwingungen der Instrumentierungslanzen ergeben sich im Frequenzbereich zwischen 1,5 Hz und 2,5 Hz, bei fünf Messungen, Faktoren zwischen $1,17E-5 [1/\mu m]$ und $1,42E-5 [1/\mu m]$. Abweichend ergeben sich aber auch zwei Werte von ca. $2,5E-5 [1/\mu m]$. Dies ist zum einen der Skalierungsfaktor, der aus der Messung auf Höhe der LVD-Ebene B innerhalb der Lanze 43 resultiert, für die schon bei der Amplitudenermittlung einschränkend angeführt wurde, daß der Abstand zwischen periodischem Signalanteil und dem Rauschuntergrund sehr gering ist. Zum anderen weicht der Skalierungsfaktor, der aus der Messung, die auf Höhe der Detektorebene C innerhalb der Lanze 26 durchgeführt wurde, ab. Bei dieser Messung war die Schwingung nur im Signal der Y-Achse des CA-607 festzustellen. Möglich ist, daß die Vorzugsrichtung der Schwingung zwischen den Meßachsen des CA-607 verlief, aber der Schwingungsanteil im Signal der X-Achse durch stochastische Rauschanteile überlagert wurde. Die aus nur einem Signal ermittelte Amplitude ist in diesem Fall geringer als die tatsächliche Gesamtamplitude, und demzufolge ergibt die Berechnung einen zu großen Übertragungsfaktor.

Für kombinierte Lanzen/Brennelementschwingungen im Frequenzbereich zwischen 4,0 Hz und 4,2 Hz ergibt sich zwischen den Übertragungsfaktoren aus unterschiedlichen Messungen eine Abweichung von maximal 10%. Bei allen drei Messungen war die Schwingung aber nur im Signal einer Achse des CA-607 nachzuweisen. Aus dem gleichen Grund, der wahrscheinlich bei der Auswertung der Messung der Ebene C innerhalb der Lanze 26 zu einem zu groß berechneten Skalierungsfaktor geführt hat, ist es trotz der geringen Abweichung zwischen den drei unabhängig voneinander ermittelten Übertragungsfaktoren möglich, daß alle drei etwas zu hohe Werte aufweisen.

Die ermittelten Übertragungsfaktoren sind zunächst als Anhaltswert für die Bestimmung der Schwingungsamplituden anzusehen. Da nur einige wenige LVD-Lanzen im Kernbereich niederfrequent untersucht worden sind, ist die vorhandene Datenbasis zu gering, um eventuelle Veränderungen der Übertragungsfaktoren in Abhängigkeit der Betriebsparameter des Reaktors abzuleiten. Der Einfluß der Kernposition des untersuchten LVD, der Kernbeladung, dem Abbrandzustand, der thermischen Reaktorleistung oder dem Dampfblasenanteil im Moderator, ist somit nicht berücksichtigt. Dennoch lassen sich mit den vorliegenden Übertragungsfaktoren die Amplituden der Schwingungen der Instrumentierungslanzen im Kernbereich aus der alleinigen Messung der Signale der Neutronenflußdetektoren, ohne Zusatzinstrumentierung, abschätzen.

5.2.6. Verhalten des Detektors im direkten Strahlungsfeld des Kerns

Bei Messungen im Bereich des Reaktorkerns ist der Detektor direkt der dort vorherrschenden Strahlung ausgesetzt. Durch die Einwirkung der Gamma- und Neutronenstrahlung wird die Gitterstruktur des Piezo-Kristalls des Beschleunigungsdetektors geschädigt. Dies bewirkt langfristig ein Absinken der Empfindlichkeit und führt letztlich zum Ausfall des Detektors. Die Funktionstüchtigkeit des Detektors wurde deshalb jeweils nach einer Meßreihe im Reaktorkern durch eine Messung auf Höhe des Dichtsitzes der Lanze überprüft. Hierzu wurden die Ergebnisse dieser Messung mit denen einer Messung verglichen, die jeweils vor dem Einfahren in den Reaktorkern an derselben Position durchgeführt worden ist.

Der Detektorprototyp befand sich insgesamt über einen Zeitraum von ca. 30 Stunden innerhalb des Reaktorkerns. Eine meßbare Schädigung des Detektors ist bisher nicht eingetreten.

Bei allen Messungen, bei denen sich der Beschleunigungsaufnehmer CA-607 im direkten Strahlungsfeld des Reaktorkerns befand, trat ein reversibler frequenzabhängiger, strahlungsphysikalischer Effekt auf. In den Spektren der im Kern gemessenen Beschleunigungssignale ist ein deutlicher Anstieg der Signalamplitude zu erkennen (Bild 5.14). Dieser Effekt wird nicht durch besondere Schwingungen der Instrumentierungslanze im Reaktorkern hervorgerufen. Für die Ermittlung der Schwingungsamplituden der LVD-Lanzen mußte deshalb ein zusätzlicher Korrekturfaktor verwendet werden, der diesen Effekt berücksichtigt.

Der Anstieg der Signalamplitude bewirkt eine Erhöhung des Rauschuntergrundes und der darüber liegenden periodischen, auf Schwingungen zurückzuführenden, Signalanteile und verhält sich somit wie eine frequenzabhängige Erhöhung der Detektorempfindlichkeit. Vermutlich werden durch die Gamma- und Neutronenstrahlung die Ladungsverschiebungen des piezoelektrischen Effektes begünstigt, was zu einer reversiblen Erhöhung der Empfindlichkeit des Beschleunigungsdetektors führt. Mögliche Ursachen können dabei z.B. eine elektrische Aufladung des piezoelektrischen Kristalls oder eine angeregte Kristallgitterschwingung sein.

Die Auswirkung der frequenz- und strahlungsabhängigen Signalveränderung entspricht einem Faktor, der sich aus dem Quotienten der Empfindlichkeit des CA-607 mit Strahlungseinflüssen und ohne diese Einflüsse ergibt. Näherungsweise wird dieser Faktor durch den Quotienten aus der Amplitude des Untergrundrauschens der jeweiligen Messung und der Amplitude des Untergrundrauschens ohne Strahlungseinfluß und ohne nennenswerten Schwingungseinfluß gebildet. Für die frequenzabhängige Amplitude des Rauschuntergrundes ohne Strahlungseinfluß wurden die Leistungsdichten der Beschleunigungssignale, die auf den Positionen der Kabeldurchführungen der einzelnen Lanzen gemessen worden sind, gemittelt. Alle in dieser Arbeit aufgeführten Schwingungsamplituden, die aus Messungen ermittelt worden sind, bei denen sich der Detektor innerhalb des Reaktorkerns befand, wurden unter Verwendung dieses Korrekturverfahrens berechnet.

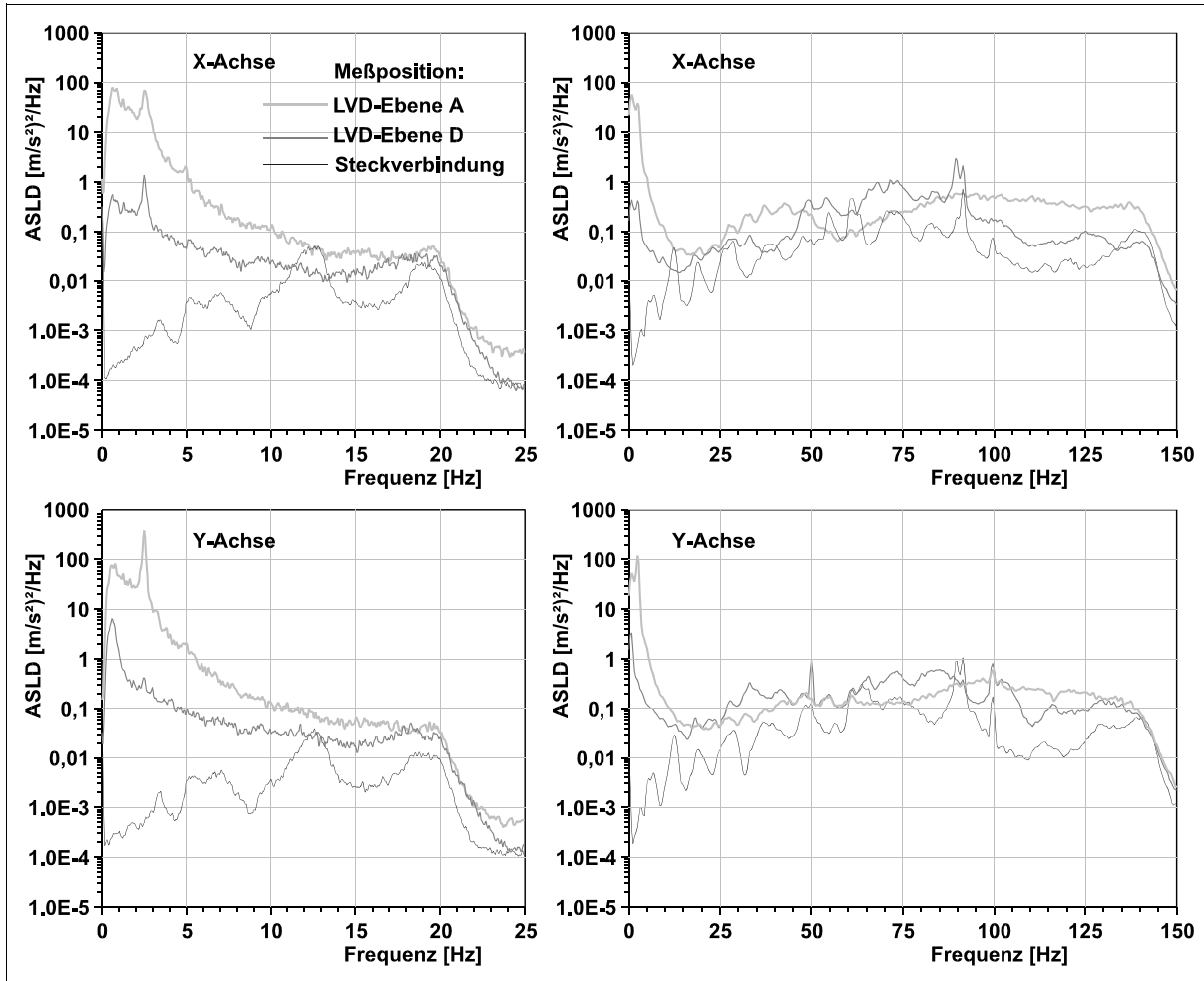


Bild 5.14: Vergleich der ASLD von Beschleunigungssignalen die im Fahrkammerrohr einer Instrumentierungslanze unterhalb und innerhalb des Reaktorkerns gemessen wurden

Die Ursache dieses reversiblen, frequenz- und strahlungsabhängigen Effektes ist nicht ausreichend geklärt. Weitere Untersuchungen sollen mit anderen piezoelektrischen Materialien im Einsatz, unter hohen Temperaturen, im direkten Strahlungsfeld des Kerns durchgeführt werden, um diesen Effekt im niederfrequenten Bereich zu minimieren [66].

5.3. Körperschallmessungen in Instrumentierungslanzen

Die Körperschallmessungen wurden zunächst in Form einer Reihenuntersuchung an jeweils zwei Meßpositionen pro Instrumentierungslanze durchgeführt. Ziel war es, Einzelschallereignisse zu detektieren, um eventuell vorhandene Anschlagvorgänge zu lokalisieren und Referenzmeßwerte für zukünftige Untersuchungen zu erhalten. Instrumentierungslanzen, bei denen sich durch die Ergebnisse der Reihenuntersuchungen Hinweise auf eventuelle Anschlagereignisse der Lanze bzw. im Umfeld der Lanze ergaben, wurden durch zusätzliche Messungen auf weiteren Höhenpositionen detailliert untersucht. Im Block C sollten darüber hinaus auffällige Einzelschallereignisse, die durch Körperschalldetektoren am Dichtsitz der LVD-Instrumentierungslanze 13 (KP.: 56/45) festgestellt worden sind, untersucht werden.

5.3.1. Zusammenstellung der Ergebnisse von Körperschallmessungen in den Instrumentierungslanzen eines Reaktorblockes

Als erste Meßposition wurde bei allen Lanzen der Dichtsitz angefahren, da hier durch die Kabeldurchführung eine feste Koppelstelle als Schallübertragungsweg zwischen Fahrkammerrohr, Lanzenhüllrohr und Kernflußmeßgehäuserohr gegeben ist. Als zweite Meßposition wurde die Steckverbindung zwischen Kernflußmeßgehäuserohr und Abschlußrohr innerhalb des Reaktordruckbehälters ausgewählt, da in der Kontaktstelle zwischen beiden Rohren des Kernflußmeßgehäuserohres Anschlagvorgänge möglich sind (vgl. Kap 2.4.).

Bild 5.15 zeigt Ausschnitte von je fünf Sekunden Länge aus den Zeitsignalen der Beschleunigungsmessungen, die innerhalb des Reaktordruckbehälters in den Fahrkammerrohren auf Höhe der Steckverbindung durchgeführt wurden. Die Zeitsignale sind im Bild entsprechend den Kernpositionen der untersuchten Instrumentierungslanzen angeordnet. In allen Signalen ist ein Grundrauschen zu erkennen, das auf die Kühlmittelströmung und die Schwingungen der Instrumentierungslanzen zurückzuführen ist. In den Beschleunigungssignalen einiger Kernpositionen sind dem Grundrauschen kleinere Bursts überlagert. Dies ist, aufgrund der Konstruktion der Lanzen, eine normale Situation. Angeregt durch die Kühlmittelströmung kann es zwischen den einzelnen Bauteilen der Lanze zu Berührungen kommen, die diese Einzelschallereignisse mit geringer Amplitude verursachen. Deutlich größere Einzelschallereignisse sind in den Signalen der Messungen, die in den Fahrkammerrohren der Kernpositionen 56/45 (Lanze Nr.13) und 56/29 (Lanze Nr.27) und der dazwischen positionierten LVD-Lanze 20 (KP.: 56/37) durchgeführt wurden, zu erkennen.

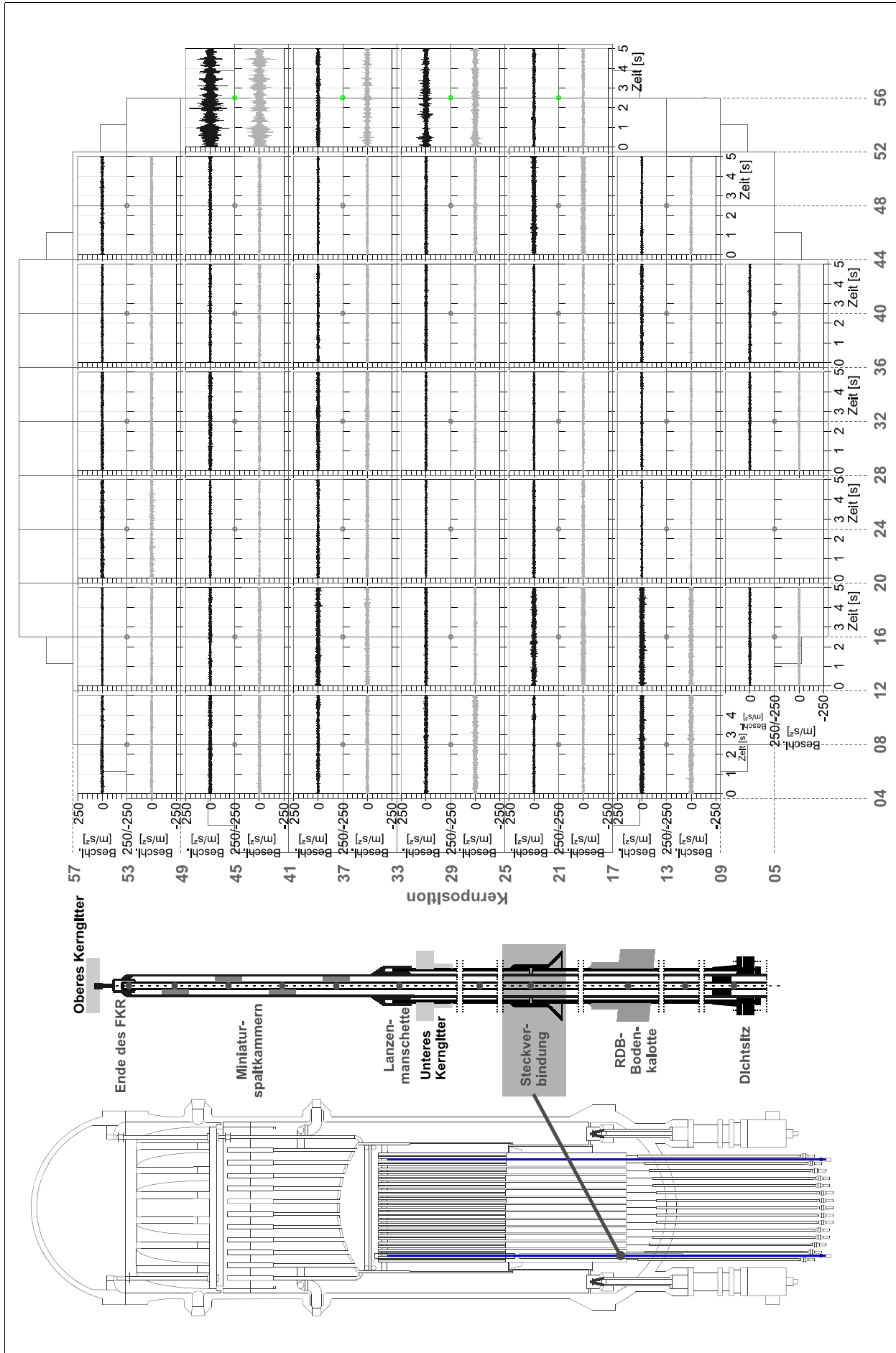


Bild 5.15: Beschleunigungssignale der Messungen auf Höhe der Steckverbindung zwischen KFMR und Abschlussrohr in allen LVD-Lanzen des Block C

In der Zusammenstellung der in Kapitel 2.2.1. aufgeführten statistischen Kennwerte, sind in den Standardabweichungen die Unterschiede in den Amplituden des Grundrauschens und in den Kurtosisfaktoren die Auswirkungen der zum Teil enthaltenen Einzelschallereignisse auf den einzelnen Kernpositionen gut zu erkennen (Bild 5.16). Dabei zeigen die Kennwerten der Signale von Messungen der Kernpositionen 56/45 und 56/29 gegenüber den Messungen der anderen Kernpositionen deutlich erhöhte Werte.

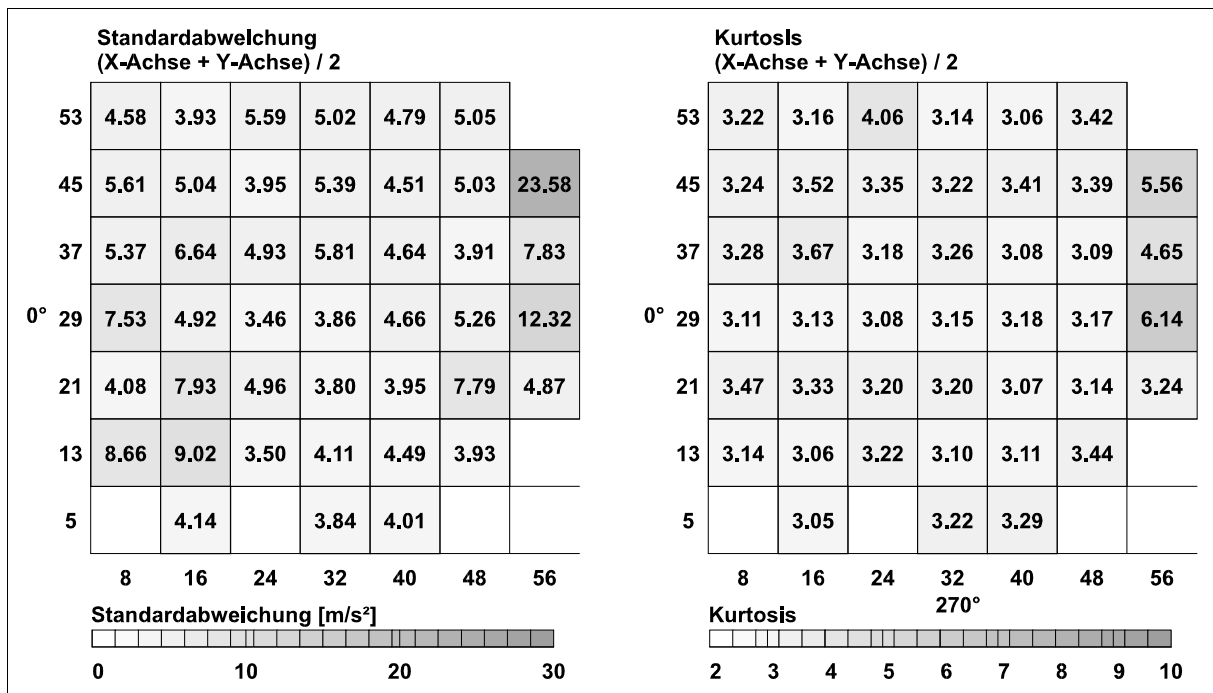


Bild 5.16: Standardabweichungen und Kurtosiswerte der Zeitsignale der Beschleunigungsmessungen der Meßposition Steckverbindung innerhalb aller LVD-Lanzen des Block C

Dies wird insbesondere bei der Betrachtung der, als Produkt aus Standardabweichung und Kurtosis definierten, Intensitätskennwerte deutlich. Bild 5.17 faßt die Beschleunigungsmessungen beider Meßpositionen aller Instrumentierungslanzen in Form der errechneten Intensitätskennwerte zusammen. Die beiden auffälligen Kernpositionen heben sich in ihren Signalintensitäten auf beiden Meßpositionen von den Instrumentierungslanzen der anderen Kernpositionen ab. Dabei weisen die Signale der Kernpositionen 56/29 und 58/45 gegenüber den übrigen Signalen einen um ca. den Faktor 5 bis 8 erhöhten Intensitätskennwert auf.

LVD-Lanzen, in denen bei der Reihenuntersuchung überdurchschnittlich intensive Burstenteile festgestellt worden sind, wurden durch zusätzliche Messungen auf weiteren Höhenpositionen detailliert untersucht. Hierbei wurde überprüft, ob es sich bei denen auf Höhe der Steckverbindung detektierten Einzelschallereignissen mit kleinerer Intensität eventuell um die stark gedämpften Auswirkungen stärkerer Anschlagvorgänge handelt, die z.B. aus dem Bereich der Lanzen spitze in den unteren Bereich der Lanzen übertragen werden.

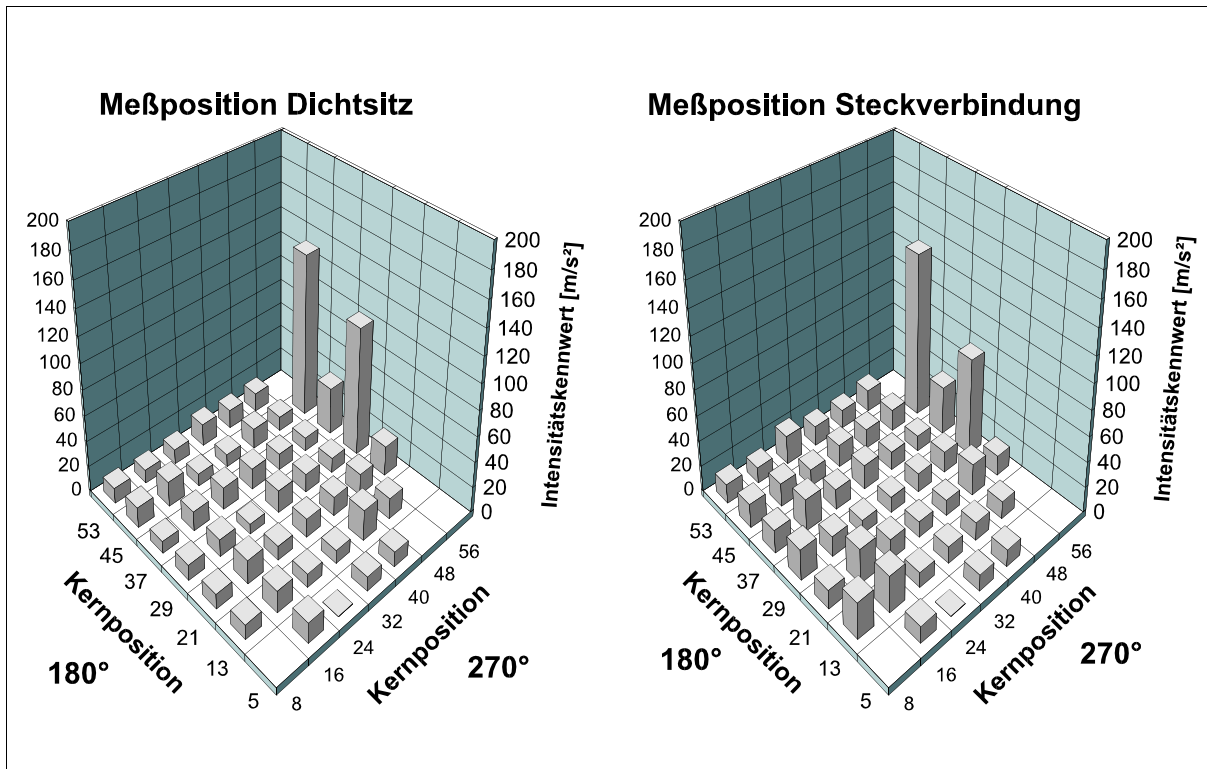


Bild 5.17: Intensitätskennwerte der Zeitsignale der Beschleunigungsmessungen der Meßpositionen Dichtsitz und Steckverbindung innerhalb aller LVD-Lanzen des Block C

5.3.2. Detaillierte Untersuchung einzelner Instrumentierungslanzen

Bild 5.18 zeigt die Zeitsignale von neun verschiedenen Meßpositionen, die innerhalb der LVD-Lanze 13 angefahren wurden. Auf allen Meßpositionen sind deutliche, durch Anschlagvorgänge hervorgerufene Einzelschallereignisse in den Signalen zu erkennen. Ein eindeutiges Maximum der Burstintensität ist hierbei nicht zu erkennen. So zeigen die Meßpositionen der LVD-Detektoren und der Lanzenspitze annähernd gleich große Burstamplituden, wie sie auf Höhe der Steckverbindung oder des Knoten 29 gemessen wurden.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Vorversuche, die in einer Modelllanze durchgeführt wurden (vgl. Kap. 4.2.), erklären sich die relativ großen Burstamplituden im Kernbereich durch die gute Schallkopplung des Hüllrohres an das Fahrkammerrohr, über die zwischen den Rohren positionierten LVD-Detektoren und über den Verriegelungsstift der Lanzenspitze (vgl. Kap.4.2.). Befände sich die Schalleinleitungsstelle in diesem Bereich, so wäre hier ein eindeutiges Maximum zu erkennen und die Burstintensität würde nach unten hin stark abnehmen. Demgegenüber wird die Schallübertragung bei einer Schalleinleitung im Lanzenbereich unterhalb des Kerns, auf der 4 m bis 6 m langen Strecke über das KFMR, die Lanzenmanschette und die LVD-Detektoren zur Meßposition der LVD-Detektoren einerseits oder auf der nur wenige Zentimeter langen Strecke über das zwischen den Rohren enthaltene Wasser andererseits, auf dem Weg zur Meßposition Steckverbindung, ungefähr gleich stark gedämpft.

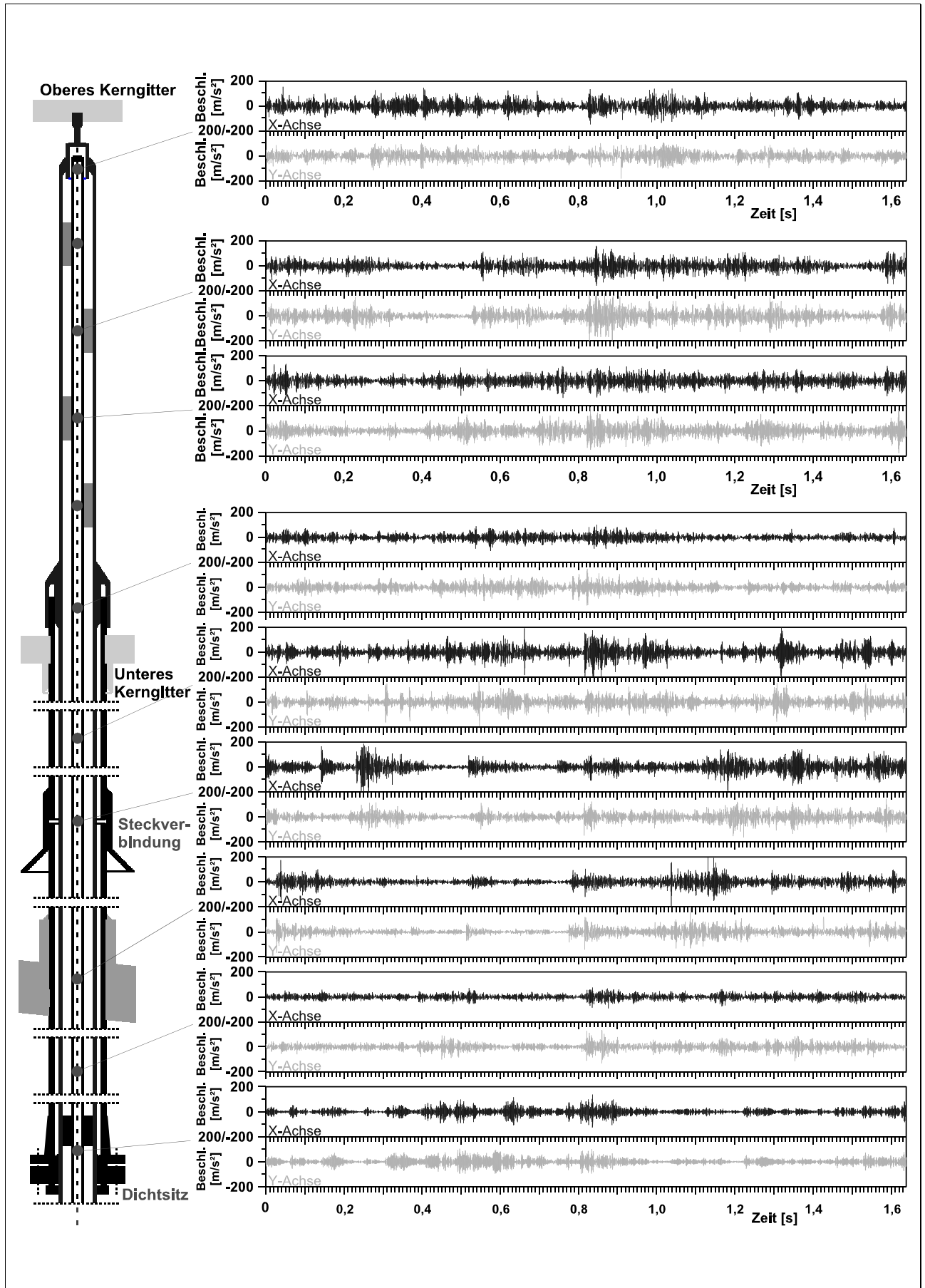


Bild 5.18: Zeitsignale der Beschleunigungsmessungen unterschiedlicher Höhenpositionen innerhalb des Fahrkammerrohres der Lanze C-13

Da dieser Sachverhalt den hier vorliegenden Meßergebnissen entspricht, ließ sich zunächst folgern, daß sich die Schalleinleitungsstelle und damit die Position des anschlagenden Bauteils im Bereich unterhalb des unteren Kerngiters befand.

Die statistischen Kennwerte der Beschleunigungssignale der Messungen, die im Bereich unterhalb des Kerns durchgeführt wurden, zeigen je ein lokales Maximum der Intensitätswerte auf der Meßposition direkt über und direkt unter der Steckverbindung (Bild 5.19).

Unter Berücksichtigung der konstruktiven Gegebenheiten resultierte als Ergebnis der Untersuchung die Vermutung, daß auf der Kernposition 56/45 Anschlagvorgänge zwischen dem Abschlußrohr und dem Kernflußmeßgehäuserohr durch ein vergrößertes Spiel innerhalb der Steckverbindung auftraten.

Die Beschleunigungsmessungen, die zur Untersuchung der Anschlagereignisse, die innerhalb der Lanze 27 festgestellt worden waren, führten ebenfalls zu dem Verdacht eines vergrößerten Spiels in der Steckverbindung.

Um die Anschlagvorgänge zwischen den Lanzenrohren zu vermeiden, hat Siemens KWU ein Verfahren zur Versteifung der Steckverbindung durch eine Einsteckmuffe (Sleeve) zwischen Abschlußrohr und Kernflußmeßgehäuserohr entwickelt. Die Steckverbindungen beider auffälliger Kernpositionen wurden während der folgenden Revision mittels dieser Einsteckmuffen versteift.

5.3.3. Nachweis der Wirksamkeit von Instandhaltungsmaßnahmen

Zur Überprüfung der Instandhaltungsmaßnahmen wurden nach dem Wiederaufstart des Reaktors erneut mit dem Beschleunigungsdetektor CA-607 Körperschallmessungen in den Instrumentierungslanzen durchgeführt. Hierbei konnte nachgewiesen werden, daß die Anschlagereignisse und damit die Einzelschallereignisse innerhalb der Lanze 13 durch die Versteifung drastisch reduziert werden konnten (Bild 5.20).

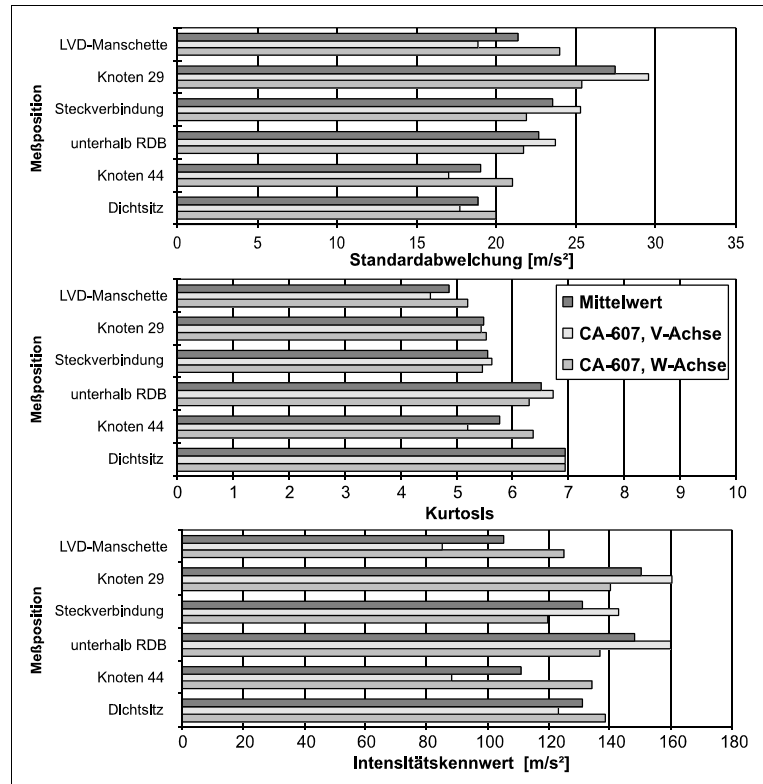


Bild 5.19: Kennwerte der Zeitsignale der Beschleunigungsmessungen im Fahrkammerrohr der Lanze C-13

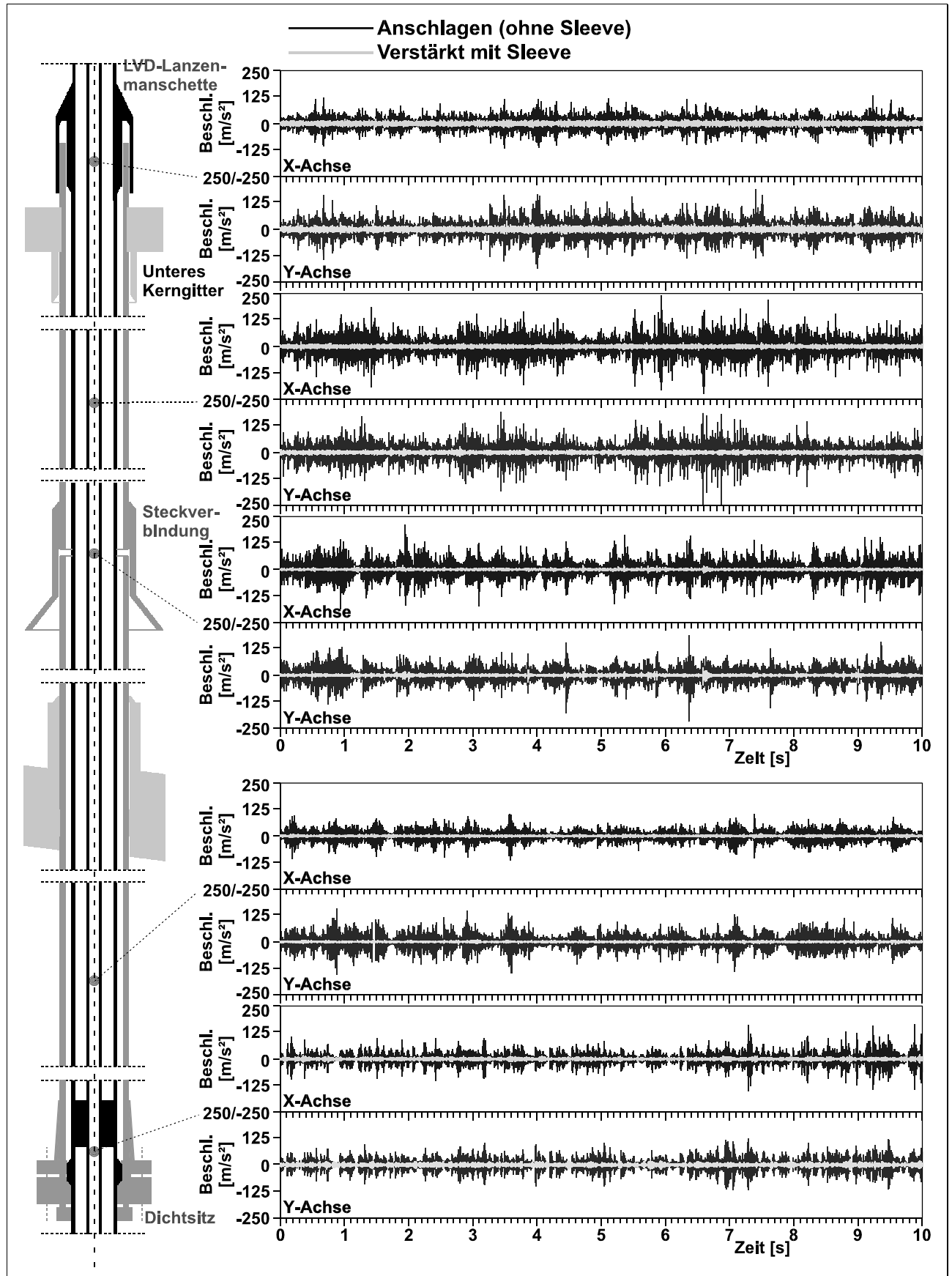


Bild 5.20: Vergleich der Zeitsignale der Beschleunigungsmessungen von verschiedenen Höhenpositionen im Fahrkammerrohr der Lanze C-13 vor und nach der Verstärkung der Steckverbindung

In den statistischen Kennwerten der Beschleunigungssignale ist der Erfolg der Instandhaltungsmaßnahme deutlich ablesbar (Bild 5.21). Die Kurtosiswerte der Signale aus Messungen, die nach der Versteifung der Steckverbindung durchgeführt wurden, zeigen zwar weiterhin durch vorhandene, relativ kleine Einzelschallereignisse ein Maximum im Bereich der Steckverbindung, aber der insgesamt starke Rückgang der Kennwerte dokumentiert die Reduzierung der Anschlagereignisse.

Die Intensitätskennwerte der Beschleunigungsmessungen, die auf Höhe der Steckverbindung in allen Instrumentierungsplanen eines Blockes vor und nach der Revision durchgeführt wurden, sind in Bild 5.22 gegenübergestellt.

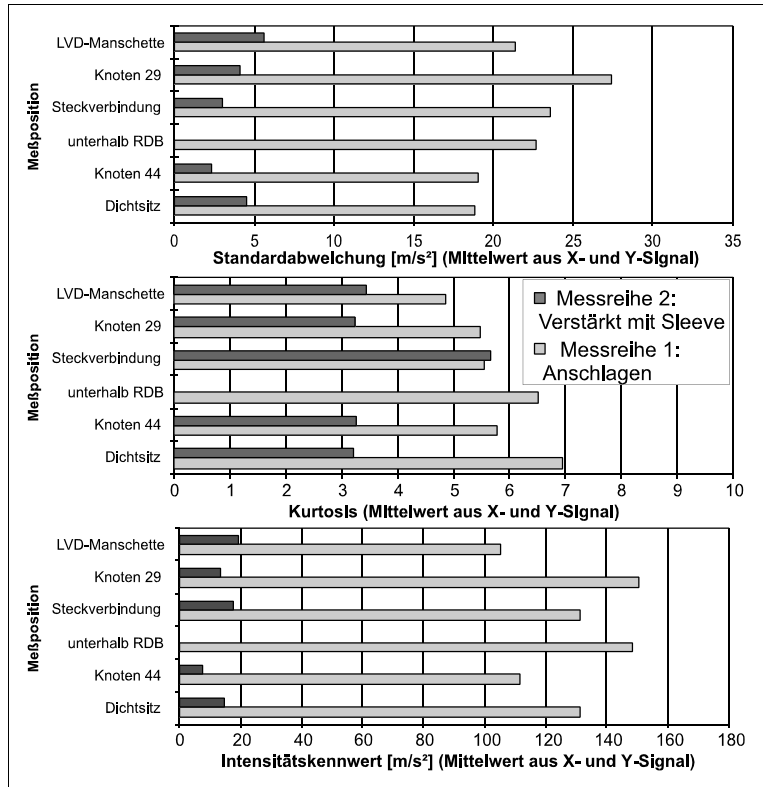


Bild 5.21: Vergleich der Intensitätskennwerte der von Beschleunigungssignalen aus Lanze C-13 vor und nach der Versteifung der Steckverbindung

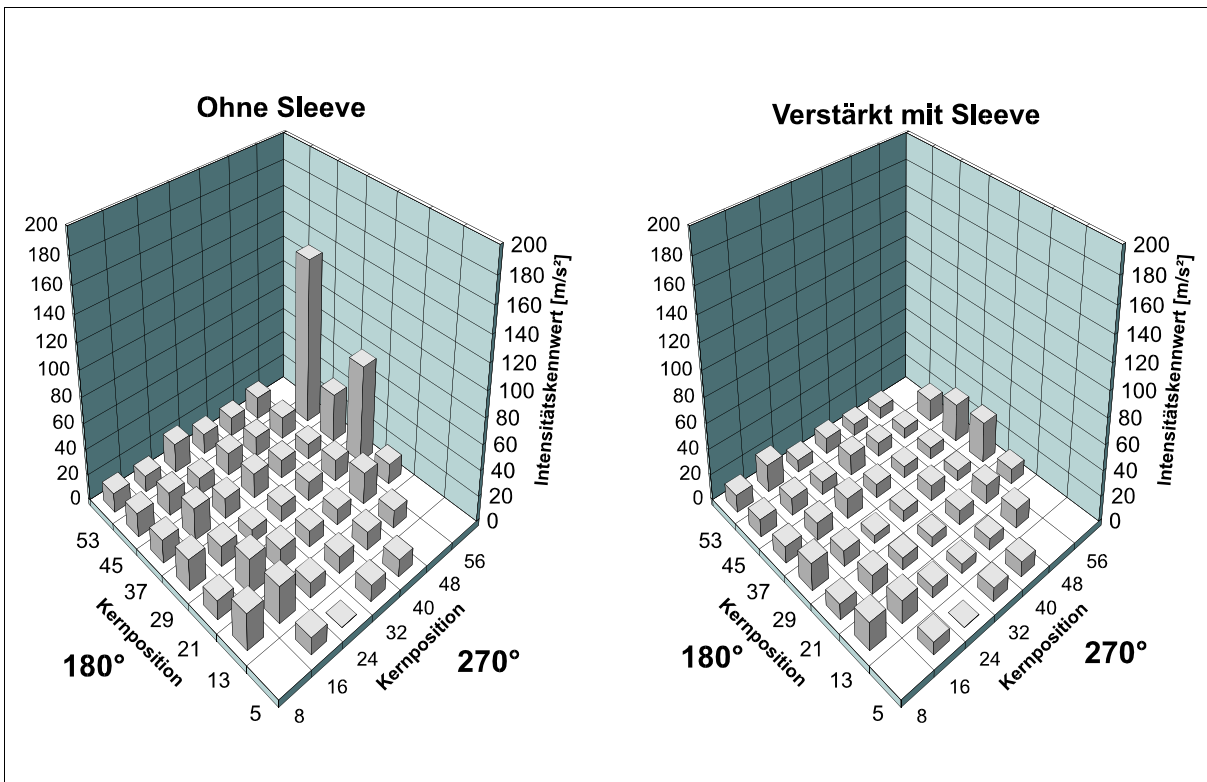


Bild 5.22: Intensitätskennwerte der Beschleunigungssignale der Meßposition auf Höhe der Steckverbindung aller LVD-Lanzen des Block C vor und nach der Versteifung der Steckverbindungen zweier Kernpositionen

Die beiden Positionen, welche in der Revision über einen Sleeve versteift wurden, sind anhand der sehr hohen Intensitätskennwerte vor und den deutlich reduzierten Intensitäten nach der Revision zu erkennen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Reihenuntersuchung nach dem BE-Wechsel, daß an keiner Position, für die zuvor geringe Intensitätskennwerte ermittelt wurden, ein Intensitätsanstieg aufgetreten ist.

5.4. Erfahrungen aus dem Einsatz des Verfahrens

Der Detektorprototyp wurde in beiden Kraftwerkblöcken in allen Instrumentierungslanzen teilweise wiederholt eingesetzt. Dabei wurde er insgesamt ca. 150 mal in LVD-Lanzen eingefahren, wobei er ca. 15 mal bis in den Kernbereich geschoben wurde. Damit ist der Zustand aller LVD-Lanzen zum Zeitpunkt der Messungen dokumentiert. Veränderungen des Zustandes können durch den Vergleich mit Wiederholungsmessungen erkannt werden.

Der Detektor wurde über einen akkumulierten Zeitraum von ca. 30 Stunden direkt der im Reaktorkern vorherrschenden Strahlung ausgesetzt. Nach Messungen im Reaktorkern wurde zur Funktionsüberprüfung des Detektors eine Wiederholungsmessung auf der Position der Steckverbindung durchgeführt und die Meßwerte mit denen einer vor dem Einfahren in den Reaktorkern, an gleicher Position durchgeführten Messung, verglichen. Bisher ist keine Schädigung des Detektors erkennbar. Bezüglich der Standfestigkeit des CA-607 gegenüber thermischem Neutronenfluß (vgl. Kap. 3.2.) wurde damit die Fluenzangabe des Herstellers bereits ca. 10-fach überschritten.

Beim Einfahren des Detektors in das Fahrkammersystem wird das Kabel beim Durchfahren der Rohrbögen plastisch verformt. Obwohl die Verformung beim Herausziehen des Detektors größtenteils rückgängig gemacht wird, verbleiben leichte wellenförmige Bögen im Kabel, wodurch die Zahl der Positionen steigt, an denen das Kabel beim erneuten Einschieben in das Fahrkammerrohr an der Rohrwand anliegt. Dies vergrößert den Reibungswiderstand und führt zu einer Erhöhung der benötigten Einschubkraft. Wird der Reibungswiderstand zu groß, muß das Kabel vor erneutem Einschieben geglättet werden. Das Zurückziehen des Detektors wird durch die plastischen Verformungen nicht beeinträchtigt, da die Bögen durch die Zugkraft beim Ausfahren größtenteils glattgezogen werden.

Nach einer mehrstündigen Meßreihe im Reaktorkern mit einer anschließenden ca. einstündigen Abklingzeit wird außen, auf Kontakt zum Fahrkammerrohr, an der Position, an der sich der am CA-607 im Fahrkammerrohr befindet, eine Dosisleistung zwischen 2 und 3 Sv/h gemessen. Die Abklingzeit ergibt sich durch die Dauer der Wiederholungsmessung auf Höhe des Dichtsitzes und die Zeit, die zum Ausfahren des Detektors benötigt wird. Binnen der ersten 7 Tage klingt die Strahlungsleistung auf ca. 1/20 ab. In den folgenden 4 Tagen reduziert sich die Dosisleistung noch einmal um 80%. Die Bleiabschirmung des Fahrkammersystems schirmt rund 99,9% der auftretenden Strahlungsleistung ab.

Die gemessenen Dosiswerte sind deutlich geringer als die zuvor berechneten Werte (vgl. Kap. 3.3.). Dies ist zum einen auf die Abschirmung des Detektors durch das umgebende Fahrkammerrohr bei den Messungen der Dosisleistung zurückzuführen. Diese wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Zum anderen wurde die Berechnung grundsätzlich als Abschätzung nach oben ausgelegt. Die nach einer einwöchigen Abklingzeit, in einem halben Meter Abstand zum Detektor im Fahrkammerrohr, gemessene Dosisleistung ist ca. 50-fach geringer als die zuvor berechnete Dosisleistung für diesen Zeitpunkt.

Beim Umsetzen des Detektorprototyps zwischen zwei Fahrkammersystemen beträgt nach einwöchigem Abklingen die durch das Bedienpersonal aufgenommene Personendosis erfahrungsgemäß ca. $200 \mu\text{Sv}$ bis $300 \mu\text{Sv}$. Darin ist auch die Dosis, die beim Rückbau bzw. bei der Wiederinbetriebnahme des Fahrkammersystems aufgenommen wird, enthalten. Bei der Durchführung der Messungen wird vom Bedienpersonal pro Tag eine Personendosis von ca. $200 \mu\text{Sv}$ aufgenommen. Diese ist aber nicht auf die Aktivierung der Materialien des Beschleunigungsdetektors, sondern auf die Strahlung der zur Vorbereitung der Messungen auf den Fahrkammerantrieb aufgewickelten Fahrkammer zurückzuführen (vgl. Kap. 5.1.).

Beim Ausfahren des CA-607 aus dem Fahrkammerrohr ist es möglich, daß aktivierte Partikel mit aus dem Fahrkammerrohr herausgezogen werden. Wegen der möglichen resultierenden Kontamination der Raumluft ist hierbei vom Bedienpersonal Atemschutz zu tragen. Aus dem gleichen Grund ist eine mögliche Kontamination des Bodens unterhalb der Einschubstelle des CA-607 zu berücksichtigen.

6. Entwicklungspotential des Verfahrens

Aus den Erfahrungen der Messungen mit dem Detektorprototyp CA-607 ergeben sich zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten, die den zukünftigen Einsatz des Verfahrens erheblich vereinfachen können.

Die Beschleunigungsdetektoren sollten im Hinblick auf eine minimale Strahlungsleistung, nach erfolgter Aktivierung im Reaktorkern, optimiert werden. Hierzu sollten die Materialien, die einen wesentlichen Beitrag zur Strahlungsleistung der aktivierten Detektormaterialien haben, vermieden werden (vgl. Kap. 3.3.). Das Signalkabel mit Inconelmantel sollte durch ein Kabel mit Titanmantel ersetzt werden, welches bessere Gleit- und elastischere Biegeeigenschaften aufweist. Die plastische Verformung des Kabels in den Rohrbögen des Fahrkammersystems könnte vermindert und dadurch die Einschubkraft für das Einfahren des CA-607 reduziert werden.

Der unter Einwirkung der Strahlung bei den Messungen im Reaktorkern aufgetretene reversible, frequenz- und strahlungsabhängige Effekt soll durch den Einsatz anderer piezoelektrischer Materialien im Detektor minimiert werden.

Zur Minimierung der durch das Bedienpersonal aufgenommenen Strahlungsdosis ergibt sich bei der Durchführung der Messungen ein erhebliches Verbesserungspotential. Durch Einsatz einer motorgetriebenen Kabeltrommel mit Kabelführung und Drehmomentüberwachung kann der Detektor halbautomatisch ein- und ausgefahren werden. Die Aufenthaltsdauer des Bedienpersonals im Bereich der Kabeltrommel des Beschleunigungsdetektors und der aufgewickelten Fahrkammern kann hierdurch verkürzt werden. Zusätzlich würde das gleichmäßigere Ein- bzw. Ausfahren die Belastung und somit die plastische Verformung des Kabel vermindern.

Langfristig wäre auch die Entwicklung eines automatischen Systems möglich, durch das ein Beschleunigungsdetektor ohne Vorbereitungs- oder Umbaumaßnahmen in Fahrkammersystemen eingesetzt werden kann.

Der Einsatzbereich des Verfahrens ist nicht nur auf Fahrkammersysteme von Siedewasserreaktoren beschränkt. Druckwasserreaktoren, welche mit Fahrkammersystemen zur Neutronenflußmessung ausgestattet sind, können nach einer Anpassung des Detektors an die jeweiligen geometrischen Gegebenheiten vor Ort, mit dem CA-607 befahren werden. So kann der Detektor durch Einsatz anderer Adaptionselemente, falls nötig, an größere Rohrdurchmesser (> 7 mm) angepaßt werden. Prinzipiell kann der Beschleunigungsdetektor CA-607 in beliebige Rohrleitungen eingeschoben werden, um im Verlauf der Rohrstrecke Schwingungs- oder Körperschallmessungen durchzuführen. Damit sind für das Verfahren sehr variable Einsatzmöglichkeiten innerhalb von Rohrleitungen, speziell auch unter extremen Umgebungsbedingungen, möglich.

7. Zusammenfassung

Durch die Rauschanalyse von Signalen der Standardreaktorinstrumentierung, lassen sich während des Betriebes der Anlage Veränderungen im Schwingungsverhalten der Kerneinbauten erkennen. Eventuell notwendige Reparaturmaßnahmen können frühzeitig eingeleitet und Folgeschäden vermieden werden. Die absoluten Amplituden der analysierten Schwingungen bzw. die Intensität und Häufigkeit detektierter Anschlagvorgänge lassen sich hierdurch nicht bestimmen. Diese Informationen sind aber zur Bewertung einer ungewöhnlichen Bauteilschwingung und damit zur Einschätzung der Dringlichkeit der eventuell einzuleitenden Reparaturmaßnahmen erforderlich.

Zur Erweiterung der Möglichkeiten der Schwingungs- und Körperschallanalyse der Kerneinbauten von Siedewassereaktoren wurde ein Verfahren entwickelt, um einen Beschleunigungsdetektor kurzzeitig innerhalb des Reaktordruckbehälters zu positionieren. Aufbauend auf einem bestehenden biaxialen Miniaturbeschleunigungsaufnehmer wurde ein Beschleunigungsaufnehmer entwickelt, der bei Leistungsbetrieb temporär über die Fahrkammersysteme in den Druckbehälter eines Siedewasserreaktors eingebracht werden kann. Hierdurch ist es möglich, in den LVD-Instrumentierungslanzen (44 Kernpositionen), an jeder beliebigen Höhenposition innerhalb und unterhalb des Reaktorkerns Beschleunigungsmessungen im Reaktordruckbehälter durchzuführen. Der Detektor wird am Signalkabel in das Fahrkammersystem eingeschoben und nach erfolgter Messung wieder herausgezogen. Er wird über ein Adaptionselement an die Rohrwand gedrückt, welches einerseits beim Verschieben des Detektors im Fahrkammersystem genügend Raum zum Passieren der Rohrbögen freigibt und andererseits den Detektor während der Messungen steif an das Fahrkammerrohr ankoppelt.

Die Einsatzfähigkeit des Verfahrens wurde im Vorfeld der Messungen in Versuchsaufbauten nachgewiesen. Dabei wurden die Verschieblichkeit des Detektors innerhalb des Fahrkammersystems und die ausreichend steife Ankopplung des Detektors an das Fahrkammerrohr nachgewiesen. Die Funktion der eingesetzten Signalverarbeitung und Analysesoftware wurde überprüft. Zur Interpretation der Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen wurde in einem Nachbau einer Instrumentierungslanze das Schwingungs- und Schallübertragungsverhalten der LVD-Lanzen untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, daß sich die gemessenen Schwingungen des Fahrkammerrohres nicht an allen Meßpositionen auf die Schwingungen der äußeren Lanzenrohre übertragen lassen. Daneben wurde überprüft, inwieweit sich bei Einzelschallereignissen, die auf Anschlagvorgänge an den äußeren Lanzenrohren zurückzuführen sind, die Anschlagposition und Anschlagintensität aus den Messungen im Fahrkammerrohr bestimmen lassen.

Der Detektorprototyp wurde, ohne Einschränkung des laufenden Kraftwerkbetriebes, in allen Instrumentierungslanzen zweier Siedewasserreaktoren teilweise wiederholt eingesetzt. Durch Beschleunigungsmessungen, die mit dem Detektorprototyp im Reaktordruckbehälter innerhalb der Fahrkammersysteme durchgeführt wurden, konnten zusätzliche Informationen über Schwingungen der Kerneinbauten gewonnen werden. Das Verfahren bietet zahlreiche neue Möglichkeiten zur

Zustandsdiagnose der Reaktoreinbauten.

Die Schwingungen der Instrumentierungslanzen wurden im Reaktorkern gemessen. Übertragungsfaktoren zur Abschätzung der Schwingungsamplituden der Kerneinbauten wurden zwischen Frequenzanteilen der Wegsignale, die aus den Beschleunigungssignalen errechnet wurden, und den entsprechenden Schwankungen in den Neutronenflußsignalen ermittelt. Diese Übertragungsfaktoren ermöglichen eine Abschätzung der Schwingungsamplituden von Reaktoreinbauten allein durch Analyse der Neutronenflußsignale.

Bei den Messungen im Reaktorkern werden die Materialien des Beschleunigungsdetektors und Teile des Signalkabels aktiviert. Dies ist bei der Durchführung der Messungen durch das Einhalten ausreichender Abklingzeiten vor dem Umbau in ein anderes Fahrkammersystem und durch den Einsatz geeigneter Abschirmungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Unter Einwirkung des direkten Strahlungsfeldes des Reaktorkerns tritt ein deutlicher Anstieg der gemessenen Beschleunigungsamplituden auf. Die Ursache dieses reversiblen, frequenz- und strahlungsabhängigen Effektes ist nicht vollständig geklärt. Trotzdem muß die Auswirkung dieses Anstieges bei der Berechnung der Schwingungsamplituden berücksichtigt werden.

Einzelschallereignisse, die z.B. durch Fretting oder leichtes Anschlagen zwischen den Einzelrohren der Instrumentierungslanzen oder anderer Strukturteile entstehen, können mit dem Beschleunigungsdetektor innerhalb des Fahrkammersystems detektiert und ihr Entstehungsort innerhalb des Reaktor-druckbehälters in radialer und axialer Richtung eingegrenzt werden. Die Verwendung statistischer Kennwerte, speziell der Standardabweichung, des Kurtosisfaktors und eines Intensitätskennwertes, definiert als Produkt beider Werte, ermöglicht eine einfache Auswertung und Interpretation der Beschleunigungsmessungen.

Das Verfahren hat bezüglich der Detektion von Einzelschallereignissen eine hohe Empfindlichkeit und Ortsauflösung. Hierdurch ist auch ein gezielter Wirksamkeitsnachweis und die Langzeitüberwachung durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen möglich.

Durch Beschleunigungsmessungen in den Fahrkammersystemen ist der Zustand aller LVD-Lanzen zum Zeitpunkt der Messungen dokumentiert. Veränderungen des Zustandes können durch den Vergleich mit Wiederholungsmessungen erkannt werden.

Der Einsatz des Detektorprototyps innerhalb zweier Reaktorblöcke dokumentiert die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens, welches die Möglichkeiten zur Schwingungs- und Körperschallüberwachung in Siedewasserreaktoren erweitert. Die Methode liefert sowohl am Modell wie auch im Kraftwerkeinsatz reproduzierbare, belastbare Ergebnisse und kann inzwischen, trotz des in einigen Punkten bestehenden Verbesserungspotentials (siehe Kap. 6.), als betriebsbewährt eingestuft werden. Somit steht das Verfahren für den Einsatz von Beschleunigungsaufnehmern in Fahrkammersystemen von Siede- oder Druckwasserreaktoren bzw. in ähnlich aufgebauten Rohrleitungen anderer technischer Anlagen zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- [1] Haußmann, H., Gaßner, K.-H., Frisch, J., Kuhne, H. : *Das Kernkraftwerk Gundremmingen B und C*, Atomwirtschaft, Vol. 29, 12 (1984), S. 616-628
- [2] *Kernkraftwerk Gundremmingen Block B und C*, Siemens Druckschrift A19100-U51-A231-V1, 1991
- [3] Merz, L. : *Regelung und Instrumentierung von Kernreaktoren*, Oldenbourg-Verlag, München, 1961
- [4] Kaiser, G. : *Reaktorinstrumentierung*, VDE-Verlag, Berlin 1983
- [5] *Neutronenmeßsystem für Siedewasserreaktoren*, KWU Druckschrift A96000-D1684
- [6] Sickert, M., Eckert, R. : *Fachhefte für den Kraftwerksbetrieb, Aufbau von Kernkraftwerken (Siedewasserreaktoren)*, VGB-Kraftwerkstechnik, Nr. 27, Essen 1994
- [7] Schlittgen, R., Streitberg, H.J. : *Zeitreihenanalyse*, R. Oldenbourg Verlag, München, 1999
- [8] Hock, F. : *Vorlesungsskript Signalverarbeitung*, Institut für Meßtechnik im Maschinenbau, Universität Hannover, 1991
- [9] Bendat, J.S., Piersol, A.G. : *Random Data* , 2nd Edition, Wiley Interscience, 1986
- [10] Thie, J.A. : *Power Reaktor Noise*, American Nuclear Society, 1981
- [11] Sturm, A., Förster, R. : *Maschinen und Anlagendiagnostik*, BG Teubner Stuttgart, 1990
- [12] DIN 55 350 : *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik*, 1989
- [13] Runkel, J. : *Rauschanalyse in Druckwasserreaktoren*, Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 1987
- [14] DIN 25475, Teil 1 : *Kerntechnische Anlagen, Überwachungssysteme*, 1983
- [15] Olma, B., Wach, D. : *Körperschallüberwachung in Leichtwasserreaktoren*, GRS-Bericht A-990, Garching, 1984
- [16] Wach, D., Sunder, R., Weingarten, J. : *Überwachungssysteme und Diagnosetechniken zur Schadenfrüherkennung in Kernkraftwerken*, VGB Kraftwerkstechnik, 64 Jhg., 1984, Heft 2, S.83ff
- [17] Schrüfer, E. : *Signalverarbeitung*, Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [18] Schrüfer, E. (Hrsg.) : *Meß- und Automatisierungstechnik*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [19] Liewers, P. : *Rauschdiagnostik*, Akademie-Verlag, Berlin, 1985

-
- [20] Natke, H.G. : *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modularanalyse*, Vieweg, 3., überarbeitete Auflage, Wiesbaden, 1992
- [21] Myers, D.G. : *Digital signal processing*, Prentice Hall of Australia Pty Ltd, 1990
- [22] Jackson, L.B. : *Signals, Systems and Transforms*, Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1991
- [23] Conner, F.R. : *Rauschen*, Fr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1987
- [24] Gebureck, P., Stegemann, D., Ceelen, D. : *Bestimmung der thermohydraulischen Kenngrößen durch Analyse des Neutronenflußrauschens im Kern von Siedewasserreaktoren*, Arbeitsbericht 58/1976, Institut für Kerntechnik, Universität Hannover
- [25] Kozma, R. : *Nuclear Reactor Noise Investigation on Boiling Effects in Simulated MTR-Type Fuel Assembly*, Dissertation, Universität Delft, 1992
- [26] Runkel, J., Stegemann, D. : *Anwendung eines On-Line-Analysesystems zur Kernüberwachung in Leichtwasserreaktoren*, Jahrestagung Kerntechnik, Karlsruhe, 1987, S.643ff
- [27] Anaytis, G.Th., Lübbesmeyer, D. : *Multi-Dimensional Modeling of Two-Phase Flow in Rod Bundles and Interpretation of Velocities Measured in BWRs by the Cross-Correlation Technique*, Progress in Nuclear Energy, Vol 14, Nr.2, 1984, S.95ff
- [28] Miteff, L. : *Identifikation der Zweiphasenströmungsform im oberen Teil eines Siedewasserreaktorkerns mit Hilfe der Rauschanalyse*, Dissertation , Hannover, 1980
- [29] Behringer, K., Lescano, V.H., Lübbesmeyer, D., Meier, F., Miteff, L., Phildius, J., Winkler, H. : *Recent Developments in Reactor Noise Analysis*, EIR-Bericht Nr.445 (1981)
- [30] Pázsit, I. : *Investigation of the space dependent noise induced by a vibrating absorber*, Atomkernenergie, Bd.30, 1977
- [31] Pázsit, I. : *Two-group theory of noise in reflected reactors with application to vibrating absorbers*, Ans. Nuc. Eng., Vol. 5, 1978
- [32] Laggiard, E., Runkel, J., Stegemann, D. : *One-Dimensional Binomial Model of Vibration and Impacting of Instrument Tubes in a Boiling Water Reactor*, Nuc. Sci. Eng., Nr.115, 1993, S.62ff
- [33] Laggiard, E., Runkel, J., Stegemann, D. : *Three dimensional model of vibration and impacting of instrument tubes in a BWR and transfer from mechanical to neutron noise*, Nuc. Sci. Eng., 120, 1995,
- [34] Thomson, O., Garis, N., Pázsit, I. : *Detection and qualification of instrument tube vibrations an impacting*, presented at IMORN-26, Piestany, Slovak Republik, 1996

- [35] Runkel, J., Laggiard, E., Stegemann, D., Fiedler, J., Heidemann, P., Mies, H.P., Oed, R., Weiß, F.-P., Altstadt, E. : *Application of Noise Analysis in two BWR Units of Nuclear Power Plants Gundremmingen*, Proceedings of Smorn VII, Avignon, France, OECD 1996
- [36] Husemann, A., Laggiard, E., Mies, H.P., Oed, R., Runkel, J., Stegemann, D. : *BWR Vibration Measurements by In-Core Neutron Noise Analysis*, Proceedings of Smorn VI, Gatlingburg, USA, 1991
- [37] Thie, J. : *Core Motion Monitoring*, Nuclear Technology, Vol.45, Aug.1979
- [38] Karlson, J. : *Development and Application of Reactor Noise Diagnostics*, Thesis, Chalmers University Of Technology, Sweden, 1999
- [39] Keijzer, J. : *Investigation Of Spartial Effects In Nuclear Reactor Kinetics*, Thesis, University Of Technology, Delft, Netherlands, 1996
- [40] Trenty, A., Puyal, C., Vincent, C., Inchauspe, M., Baeyens, R., Lagarde, G. : *Thimble Vibration Analysis And Monitoring On 1300 And 900 MW Reactors using Accelerometers And In Core Neutron Noise*, Progress in Nuclear Energy, Vol. 21, 1988
- [41] Laggiard, E., Runkel, J., Stegemann, D., Fiedler, J. : *Determination of Vibration Amplitudes and Neutron-Mechanical Scale Factors Using Incore Accelerometers in NPP Obrigheim*, Proceedings of Smorn VII, Avignon, France, OECD 1995
- [42] Profos, P. : *Handbuch der industriellen Meßtechnik*, Vulkan-Verlag, Essen, 1987
- [43] Serridge, M., Licht, T. R. : *Piezelektrische Beschleunigungsaufnehmer und Vorverstärker*, Brüel & Kjaer Druckschrift, 1990
- [44] Europäisches Patentamt, (Hrsg) : *Europäische Patentanmeldung Nr.87810642.6*, Patentblatt 89/21, 1989
- [45] *United States Patent No. 5.117.696*, 1992
- [46] Runkel, J., Laggiard, E., Stegemann, D., Heidemann, P., Blaser, R., Schmid, F., Reinmann, H : *Incore masurements of reactor internals vibrations by use of accelerometers and neutron detectors*, OECD/NEANSC INCORE-96, Mito, Japan, 1996
- [47] *Spezifikation CA-607*, Vibrometer, 1986
- [48] Röhr, S. : *Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Vorrichtung für Schwingungsmessungen in Fahrkammerrohrleitungen eines Siedewasserreaktors*, Studienarbeit, Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Hannover, 1997
- [49] Wegst, C.W. : *Stahlschlüssel*, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach, 1992

-
- [50] Mughabghab, S., Divadeenam, M., Holden, N. : *Neutron Cross Sections*, Volume 1, Part A, Academic Press, 1981
- [51] Mughabghab, S., Divadeenam, M., Holden, N. : *Neutron Cross Sections*, Volume 1, Part B, Academic Press, 1984
- [52] Erdtmann, G. : *Neutron Activation Tables*, Verlag Chemie, Weinheim, 1976
- [53] Erdtmann, G. : *Neutron Activation Analysis*, Bericht des Forschungszentrums Jülich 2673, Jülich, 1992
- [54] Seelmann-Eggebert, W., Pfennig, G., Münzel, H., Klewe-Nebenius, H. : *Nuklidkarte*, Kommunalschriften-Verlag, München, (5) 1981
- [55] Stegemann, D. : *Grundlagen der Kerntechnik*, Vorlesungsskript, Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Hannover, 1991
- [56] Vogt, H-G., Schultz, H. : *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*, Carl Hanser Verlag, Wien, 1992
- [57] Reich, H. (HRSG) : *Dosimetrie ionisierender Strahlung*, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1990
- [58] Morgenroth, T. : *Konstruktion eines Versuchsstandes zur Schwingungsmessung an Fahrkammerrohrleitungen*, Studienarbeit, Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Hannover, 1997
- [59] *Betriebsanleitung für das MVDS-System*, Reutlinger, Darmstadt, 1982
- [60] Schoppnies, E. (Hrsg.) : *Lexikon der Sensortechnik*, VDE-Verlag, Berlin, 1992
- [61] Schlinke, D. : *Werkstoffprüfung für Metalle*, Schroedel Verlag, Hannover, 1981
- [62] *Schwingungsmessung*, Brüel & Kjaer Druckschrift, 1986
- [63] Senfleben, M. : *Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsmeßstrecke zur Schwingungsuntersuchung an Inkern Instrumentierungslanzen aus Siedewasserreaktoren*, Diplomarbeit, Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Hannover, 1997
- [64] VDI-3733 : *Geräusche bei Rohrleitungen*, 1996
- [65] Runkel, J., Stegemann, D., Fiedler, J., Heidemann, P., Blaser, R., Schmid, F., Trobitz, M., Hirsch, L., Thoma, K. : *New technologies for acceleration and vibration measurements inside operating nuclear power reactors*, Proceedings of CoMoCoRe99, Stockholm, Sweden, OECD, 2000
- [66] Runkel, J., Stegemann, D., Fiedler, J., Heidemann, P., Blaser, R., Schmid, F., Trobitz, M., Hirsch, L., Thoma, K. : *Vibration monitoring by neutron noise analysis and acceleration measurements inside operating nuclear power reactors*, Proc. of Physor 2000, May 2000, Pittsburg, USA

Lebenslauf:

Persönliches

Peter Heidemann
Geburtsdatum: 09.01.1966
Geburtsort: Münster/Westf.
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig
Eltern: Hildegard Heidemann
Dr. Karl Heidemann

Schulbildung:

1972 - 1976 Grundschule in Münster-Hiltrup
1976 - 1980 Kardinal-von-Galen-Gymnasium in MS-Hiltrup
1980 - 1985 Matthias-Claudius-Gymnasium in Gehrden
Abschluß: Allgemeine Hochschulreife

Grundwehrdienst:

1985 - 1986 beim Heer in Munster

Studium:

1986 - 1994 Maschinenbaustudium (Dipl.) an der Universität
Hannover mit dem Schwerpunkt Energie und Verfahrenstechnik,
1994 Diplomhauptprüfung

Praktika:

Grundpraktikum: 1986 bei den Stadtwerken Hannover AG

Fachpraktika : 1988 bei Sulzer Infra, Hannover
1988 bei Contitech GmbH, Hannover
1990 bei der Dt. Babcock GmbH im KW Wilhelmshaven
1992 bei der Dt. Babcock GmbH im KW Essen-Karnap
1992 bei Asadata GmbH, Hannover

Berufliche Tätigkeit:

seit 1994 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kerntechnik
und Zerstörungsfreie Prüfverfahren der Universität Hannover (IKPH)

