

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

**FZR-304**

Oktober 2000

ISSN 1437-322X



**Archiv-Ex.:**

*Peter Schumann*

**Nutzung der Rauschdiagnostik für Nachweis  
und Überwachung der Schwingungen von  
Reaktordruckbehältereinbauten und zur  
Aufklärung ihrer Ursachen in ostdeutschen  
Kernkraftwerken mit WWER-440/230-Reaktoren  
der russischen Baureihe**

Herausgeber:  
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF  
Postfach 51 01 19  
D-01314 Dresden  
Telefon +49 351 26 00  
Telefax +49 351 2 69 04 61  
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt  
Alle Rechte beim Herausgeber

*Peter Schumann*

**Nutzung der Rauschdiagnostik für Nachweis  
und Überwachung der Schwingungen von  
Reaktordruckbehältereinbauten und zur  
Aufklärung ihrer Ursachen in ostdeutschen  
Kernkraftwerken mit WWER-440/230-Reaktoren  
der russischen Baureihe**

**Inhalt:**

<b>0.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>Kurzbeschreibung der schwingungsbedingten Störungen an den WWER-440/230-Reaktoren im KKW Greifswald</b>	<b>3</b>
2.1	Durchflussinduzierte Schwingungen der Regelelemente	4
2.2	Anomale Reaktorkorbschwingungen	5
<b>3.</b>	<b>Detaillierter Bericht über Regelelementschwingungen</b>	<b>6</b>
3.1	Allgemeine Beschreibung, betroffene Standorte, Schadensberichte	6
3.2	Gestörtes Anlagenverhalten und betriebliche Maßnahmen	6
3.3	Inspektionsergebnisse nach der Störung an den Blöcken 1 und 2 des KKW Greifswald	8
3.4	Reparatur und vorbeugende Maßnahmen	11
3.5	Rauschdiagnostische Untersuchungen und physikalische Aufklärung	12
3.5.1	Allgemeine Ergebnisse durch Analyse der Neutronenfluss-Schwankungen	12
3.5.2	Befunde aus der Analyse nicht-nuklearer Messgrößen	17
3.5.3	Befunde durch Analyse von Ereignissen unter Nutzung der Zeitmittelfunktionen	20
3.5.4	Experimentelle und theoretische Untersuchungen am Modell eines hydraulischen Pendels	25
3.5.5	Spektralleistung im Störungszustand vor der Abschaltung	29
3.5.6	Spektralleistung nach der Wiederinbetriebnahme	30
<b>4.</b>	<b>Detaillierter Bericht über anomale Reaktorkorbschwingungen</b>	<b>32</b>
4.1	Allgemeine Beschreibung, betroffene Standorte, Schadensberichte	32
4.2	Gestörtes Anlagenverhalten und betriebliche Maßnahmen	32
4.3	Inspektionsergebnisse nach der Störung am Block 2 des KKW Greifswald	35
4.4	Reparatur und vorbeugende Maßnahmen	37
4.5	Rauschdiagnostische Untersuchungen und physikalische Aufklärung	39
4.5.1	Allgemeines	39
4.5.2	Phänomenologische Beschreibung der Neutronenfluss-Schwankungen bei normalen und anomalen Reaktorkorbschwingungen	40
4.5.3	Konventionelle Analyse mit Hilfe der Schätzung der Spektralleistungen	41
4.5.4	Interpretation der Neutronenfluss-Schwankungen in Ex-core Positionen als Distanzinformation	43
4.5.5	Beschreibung der Kohärenz- und Phasenfunktionen durch ein mathematisches Modell	47
4.5.6	Experimentelle Bestimmung der variierenden Drehrichtung	48
4.5.7	Analyse der Kreuzspektralleistung von Neutronenfluss und nichtnuklearen Messgrößen	50
4.5.8	Analyse der Anschläge, die gelegentlich in den Beschleunigungssignalen an der Druckbehälteroberfläche auftreten	52
4.5.9	Experimentelle Untersuchungen an einem Labormodell	59
4.5.10	Regelelementschwingungen bei anomalen Reaktorkorbbewegungen	60
4.6	Phänomenologische Beschreibung des normalen Schwingungsverhaltens	62
<b>5.</b>	<b>Abschließende Bemerkungen</b>	<b>66</b>
<b>6.</b>	<b>Danksagung</b>	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>67</b>

## 0. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden Anwendung und Ergebnisse rauschdiagnostischer Untersuchungen von Schwingungen, die zu Beschädigungen der Einbauten des Reaktordruckgefäßes geführt haben, im Detail beschrieben. Sie waren in den Jahren 1975 bzw. 1985 an den WWER-440/230-Reaktoren der russischen Baureihe der Blöcke 1 und 2 des Kernkraftwerkes Greifswald in Form von dominanten Regelelementschwingungen und anomalen Reaktorkorb-schwingungen aufgetreten. Der Bericht enthält die wesentlichen Angaben zum Betriebsverhalten während des gestörten Betriebes, die Inspektionsergebnisse, die charakteristischen experimentellen Befunde unter Verwendung rauschdiagnostischer Analysemethoden, die physikalische Aufklärung des Schwingungsprozesses und seiner Ursachen durch spezielle Untersuchungen sowie einige Empfehlungen zur Schwingungsüberwachung und -minimierung.

## 1. Einleitung

Anomales Betriebsverhalten und Störungen in Kernkraftwerken beginnen sehr oft mit Fehlverhalten von Komponenten, das überhaupt nichts zu tun hat mit sicherheitsrelevanten Ereignissen. Das Prinzip der Fehlerfrüherkennung zielt daher darauf ab, solches Fehlverhalten zum frühestmöglichen Zeitpunkt zu erkennen und durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden oder wenigsten zu minimieren. In diesem Zusammenhang sind Diagnosesysteme sehr leistungsfähige Werkzeuge, um dem Betriebspersonal von KKW die nötigen Informationen über verborgenes und im Wachstum begriffenes Fehlverhalten zu geben.

Zweck der Fehlerfrüherkennung ist die Verbesserung der nuklearen Sicherheit. Das ist untrennbar verknüpft mit einer verbesserten Anlagenverfügbarkeit, mit verbesserter Kosteneffizienz und ggf. mit verringerter Strahlenbelastung des (Instandhaltungs-)Personals.

In westlichen Ländern ist für eine Reihe von Störprozessen durch die Regeln KTA-3201.4 [1, 1997] und KTA-3204 [2, 1998] eine kontinuierliche Überwachung empfohlen, begleitet von einer Reihe periodischer Kontrollen wie zerstörungsfreie Materialprüfungen und Inspektionen. Überwachungsmethoden und -geräte sind bekannt für:

- Lose-Teile-Detektion im ersten Kreislauf,
- Schwingungsanalyse für die wichtigsten Komponenten des ersten Kreislaufs,
- Leckdetektion an der Oberfläche aller Primärsysteme und
- Belastungsmessungen und/oder -schätzungen der Komponenten des Primärkreises.

Obwohl das Wissen über das Auftreten verschiedener Fehler aus diesen vier Bereichen bekannt ist und in Konferenzen und Zeitschriften darüber berichtet wurde, fehlt bisher eine umfassende und systematische Darstellung.

Die IAEA plädierte schon länger für eine „Bibliothek erfolgreich bearbeiteter diagnostischer Ereignisse, die für jedermann verfügbar sein soll“ [3, 1995], jedoch wurde bisher nichts unternommen.

Andererseits sind offizielle Mitteilungen über Ereignisse, die mit diagnostischen Systemen nachgewiesen oder analysiert wurden, ausgesprochen selten, insbesondere bezüglich der WWER-Reaktoren. Das ist die direkte Folge der besonderen Sensibilität für solche Informationen und der Informationspolitik der früheren Sowjetunion. Das wird im folgenden verschiedentlich deutlich.

Über Ereignisse und Beschädigungen an Druckgefäßeinbauten in WWER-440/230-Reaktoren, die durch Störprozesse hervorgerufen worden sind, haben in der Vergangenheit nur die Bearbeiter aus dem Rossendorfer Institut und Fachleute aus dem KKW Greifswald berichtet. Ihre Berichte sind von methodischer Art und enthalten keinerlei Hinweise auf Ereignisse oder Beschädigungen von Reaktorkomponenten.

An den WWER-440/230-Reaktoren des KKW Greifswald haben zwei Ereignisse stattgefunden, die durch mechanische Schwingungen

- der Regelelemente in den Jahren 1973 – 1976, beschrieben in Kapitel 3, und
- des Reaktorkorbes 1985 – 1986, beschrieben in Kapitel 4,

hervorgerufen worden sind und zu betrieblichen Störungen geführt haben. Das zugehörige Erscheinungsbild ist durch die Rossendorfer Bearbeiter genauer untersucht worden.

In der Vergangenheit hatten auch die Rossendorfer nur offizielle Quellen und - teilweise und nur sehr eingeschränkt - ihr eigenes Wissen über diese Schwingungen in Publikationen verarbeitet. Im vorliegenden Bericht wird diese Konvention nun durchbrochen, um möglichst viel Wissen über schwingungsinduzierte Ereignisse an WWER-Reaktor-Einbauten zusammenzufassen, sofern dies nach so vielen Jahren noch möglich ist<sup>1</sup>. Damit soll dem Nutzer diagnostischer Systeme ein umfangreicheres Wissen über das Betriebsverhalten und Überwachungsmöglichkeiten dieser sicherheitsrelevanten Störprozesse an WWER-Reaktoren in die Hand gegeben werden.

Die in diesem Bericht benutzten Quellen sind:

1. Berichte, die in speziellen Konferenzen und in Zeitschriften veröffentlicht wurden,
2. das Advanced Incident Reporting System der IAEA,
3. detaillierte Analysen der Ereignisse aus speziellen internen technischen Berichten der Rossendorfer Bearbeiter,
4. die wichtigsten Analyseresultate der Bearbeiter bezüglich der untersuchten Schwingungsprozesse,
5. verschiedene interne Dokumente und Notizen, die sich bei der Arbeit der Bearbeiter im KKW Greifswald ergeben haben und
6. persönliche Mitteilungen von Fachkollegen.

Spezielles Wissen und Erfahrungen über angrenzende Gebiete wie

- allgemeines Betriebsverhalten der Reaktoren des KKW Greifswald ,
- Architektur und Aufgaben der im KKW Greifswald eingesetzten Rauschanalyse-Systeme und
- Überwachungs-Monitore für spezielle Effekte und die Probleme der Automatisierung und standardisierten Überwachung

sind in den Berichten [4, 1991], [5, 1985], [6, 1988], [7, 1988], [8, 1989] und [9, 1988] niedergelegt.

## **2. Kurzbeschreibung der schwingungsbedingten Störungen an den WWER-440/230-Reaktoren im KKW Greifswald**

Während das Advanced Incident Reporting System der IAEA im wesentlichen als Warnung und Hinweis für den Betreiber gedacht ist und daher zumeist wenig detaillierte Informationen enthält, gibt es bislang keine Berichtsform für denjenigen Diagnosespezialisten, der neu auftretende Störungen untersuchen und aufklären soll. Dabei hatte schon SAITO [10, 1977] vorgeschlagen, eine dem Spezialisten verfügbare Bibliothek über Ereignisse, die mit Hilfe diagnostischer Verfahren und Systeme untersucht worden sind, aufzubauen. Angelehnt an seinen Vorschlag, wird im folgenden eine Kurzinformation über die beiden Störungsphänomene gegeben.

<sup>1</sup> Vieles ist heute nur noch durch persönliche Mitteilungen von Fachkollegen zu erfahren. Die Zitate persönlicher Mitteilungen im Quellenverzeichnis geben den Arbeitsort zur Zeit der Mitteilung an.

## 2.1 Durchflussinduzierte Schwingungen der Regelelemente

<i>Kernkraftwerk, Block</i>	Rheinsberg, Greifswald 1, 2; (Kola), (Kozloduy)
<i>Reaktortyp:</i>	WWER-440/230
<i>Datum des Vorkommnisses und der Untersuchungen:</i>	1973-1976
<i>Betrieblicher Zustand des Reaktors:</i>	Leistungsbetrieb 100%
<i>Verwendete Signale:</i>	Ex-core Ionisationskammern, In-core n-β-Emissionsdetektoren, Beschleunigungsaufnehmer an den Schutzrohren der Regelement-Antriebe,
<i>Analysemethoden::</i>	Normalisierte Auto- und Kreuz-Spektralleistungen, Partielle Spektralleistungen, Zeitintervallhistogramme, verschiedene Arten von Mittelfunktionen im Zeitbereich
<i>Kurzbeschreibung des Ereignisses</i>	Auf Grund der turbulenten Kühlmittelströmung im Reaktor erzeugen die stochastischen Kräfte an der inneren und äußeren Oberfläche der Regelemente fluktuierende Druckunterschiede, so dass mechanische Schwingungen angeregt werden.  Diese Schwingungen waren so stark ausgeprägt, dass im KKW Greifswald im Jahre 1975 die Brennstoffteile (Kassettenmäntel und Brennstabhüllen) und als Folge auch einzelne Regelemente der Reaktorblöcke 1 und 2 durch Reibkorrosion zerstört wurden. Ähnliche Ereignisse hat es auch an den WWER-440-Reaktoren anderer KKW gegeben.
<i>Klassifikation:</i>	<b>Störung</b>
<i>Kurzbeschreibung der Signalanalyse:</i>	In den Auto- und Kreuzspektralleistungen von Ex-core Ionisationskammern und n-β-Emissionsdetektoren in In-core Positionen erscheinen im niederfrequenten Gebiet (1 bis 4 Hz) stark ausgeprägte Resonanzspitzen mit hoher Kohärenz des Neutronenflussrauschens in vertikaler Richtung und geringer Kohärenz in größerer horizontaler Entfernung.  Weiterführende Untersuchungen zeigen eine signifikante Kohärenz der demodulierten Schallereignisse im Beschleunigungssignal an den Schutzrohren der Regelementantriebe und der Neutronendetektorsignale in Positionen, die zum betreffenden Regelement benachbart sind.  Eine mittlere Bewegungsamplitude $\delta x$ lässt sich wegen der Abhängigkeit des resultierenden Dipolfeldes von der Bewegungsrichtung nur in Bewegungsrichtung aus den Neutronenfluss-Schwankungen ableiten:  $\frac{\delta i}{i} \approx \frac{0,01}{cm} \delta x$  $\delta i$ – mittlere Schwankung des Ionisationskammerstromes, $i$ – mittlerer Ionisationskammerstrom, $\delta x$ – mittlere Schwingungsamplitude des Regelementes.
<i>Kurzbeschreibung der konstruktiven und vorbeugenden Maßnahmen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion des Kühlmitteldurchflusses im Regelementkanal durch Reduktion der Anzahl der Eintrittsöffnungen in der Dämpferregion von 12 auf 8,</li> <li>• Versteifung der Kassettenwand von 1,5 mm auf 2,0 mm, später auch Einführung perforierter Kassettenmäntel der Brennstoffteile</li> <li>• Periodische Rauschmessungen</li> </ul>
<i>Charakteristische Analyseresultate:</i>	Abb. 3.5 bis 3.11, 3.13, 3.14, 3.21, 3.22
<i>Literatur:</i>	[14, 1977], [15, 1978], [20, 1976]

## 2.2 Anomale Reaktorkorbschwingung

Kernkraftwerk, Block	Greifswald 2, (Kola 1)
Reaktortyp:	WWER-440/230
Datum des Vorkommnisses und der Untersuchungen:	1985-86
Betrieblicher Zustand des Reaktors:	Leistungsbetrieb 100%
Verwendete Signale:	Ionisationskammern in Ex-core Positionen, n-β-Emissionsdetektoren in In-core Positionen, Beschleunigungsaufnehmer an Deckel, Boden und äußerer Wand des Reaktordruckbehälters, besonders auch in Nähe der Labyrinthdichtung, Beschleunigungsaufnehmer an den Schutzrohren der Regelemente, Druckdetektoren
Analysemethoden::	Normalisierte Auto- und Kreuzspektralleistungen, Mittelfunktionen im Zeitbereich, Amplituden-Häufigkeitsverteilungen, Zeitintervallhistogrammanalyse, Bestimmung elliptischer Trajektorien und Parameter
Kurzbeschreibung des Ereignisses	Reaktivbewegungen des Reaktorkorbes gegenüber dem Druckgefäß bis zu 5 mm wurden ermittelt. Die Ursache dieser großen Verschiebungen bestehen in der plastischen Verformung der Federrohrsegmente, die den Andruck des Reaktordeckels auf den Reaktorkorb realisieren. Die ungenügende Fixierung des Reaktorkorbes führt unter anderem zur Beschädigung der Führungskeile und -nuten unterhalb der Spaltzone. - Da die Reaktorkorbbewegungen mit einer quasi-statischen axialen Drehung des Korbes innerhalb des Druckbehälters verbunden sind, waren beträchtliche Teile der Führungskeile erodiert. Bis zu 18 mm Material waren abgetragen.
Klassifikation:	<b>Störung</b>
Kurzbeschreibung der Signalanalyse:	<p>Der Nachweis der Reaktorkorbbewegungen basiert auf der Tatsache, dass sich bei solchen Bewegungen relativ zum Druckbehälter die Ausdehnung des Wasserspaltes im Ringspalt im Takt der Bewegung ändert und damit auch die Transmission der schnellen Neutronen, die von den externen Ionisationskammern wahrgenommen werden.</p> <p>Die normalisierten Autospektralleistungen und Kohärenzfunktionen der externen Neutronenfluss-Schwankungen und der Schallsignale aus der Umgebung der Labyrinthdichtung zeigen folgendes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutlich erhöhte Schwankungsbreite (RMS-Wert) der Ionisationskammer-signale,</li> <li>• 180° Phasendifferenz der Neutronenfluss-Schwankungen in gegenüberliegenden Ionisationskammerpositionen</li> <li>• Hohe Kohärenzwerte zwischen Neutronenfluss-Schwankungen und der Einhüllenden der genannten Schallsignale.</li> <li>• Die mittlere mechanische Bewegungsamplitude lässt sich aus der zugeschnittenen Größengleichung</li> </ul> $\frac{\delta i}{i} \approx \frac{0,12}{cm} \delta x$ <p>(<math>\delta i</math> – mittlere Schwankung des Ionisationskammerstromes,  <math>i</math> – mittlerer Ionisationskammerstrom,  <math>\delta x</math> – mittlere Schwingungsamplitude des Korbes)  bestimmen.</p>
Kurzbeschreibung der konstruktiven und vorbeugenden Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erneuerung der Federrohrsegmente,</li> <li>• Befestigung der Spaltzonenhalterung,</li> <li>• Reparatur der Führungskeile und -nuten</li> <li>• Festlegung eines betrieblichen Standards für periodische Rauschmessungen</li> </ul>
Charakteristisches Analyseergebnis:	Abb. 4.10 bis 4.13, 4.17, 4.18, 4.20, 4.22 bis 4.24, 4.27
Literatur:	[39, 1988], [43, 1989], [47, 1989], [48, 1990], [49, 1992], [52, 1989]

### 3. Detaillierter Bericht über Regelelementschwingungen

#### 3.1 Allgemeine Beschreibung, betroffene Standorte, Schadensberichte

Über stark ausgeprägte Regelelementschwingungen an WWER-440/230-Reaktoren sowjetischer Bauart, die in den Jahren 1973 bis 1976 an verschiedenen osteuropäischen Kernkraftwerken aufgetreten sind, gibt es überhaupt keinen offiziellen Bericht oder Hinweis in der gesamten Literatur. Obwohl nach internationaler Empfehlung jedes Ereignis an die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien berichtet werden sollte, bestand in dieser Zeit ein allgemeines Interesse der osteuropäischen Staatsführungen, Informationen über Fehlfunktionen oder Fehler an den in der Sowjetunion hergestellten Reaktoren zu unterbinden.

Offenbar wurde aber eine interne Information über das Ereignis durch den Stellvertretenden Ministerpräsidenten der DDR, Horst SINDERMANN, am 23./24. April 1975 an die IAEA weitergegeben, wie aus einer Notiz des entsprechenden Ministeriums [11, 1975] hervorgeht.

In der DDR und ebenso in den anderen osteuropäischen Staaten war das Wissen über die Regelelementereignisse an WWER-440/230-Reaktoren absolut geheim. So wurden z.B. die Bearbeiter verpflichtet, „über dieses Staatsgeheimnis und alles, was damit zusammenhängt, Stillschweigen gegen jedermann zu bewahren“<sup>2</sup>. Somit konnten die Autoren bis zum Ende der DDR über ihre diagnostischen Erfahrungen und Untersuchungen der Regelelementschwingungen am betroffenen KKW Greifswald nicht berichten. Sie haben daher lediglich über das physikalische Phänomen des hydraulisch angeregten Pendels und die Abbildung seiner Bewegung in externen Neutronenfluss-Schwankungen berichtet. Es ist nicht verwunderlich, dass diese methodischen Berichte und Vorträge [12, 1976], [13, 1977], [14, 1977] und [15, 1978] von den westlichen Fachkollegen sehr skeptisch aufgenommen wurden, und zwar auch deshalb, weil solche Schwingungen auf Grund einer völlig andersartigen Konstruktion der Regelelemente (Finger-Cluster) in den westlichen Kraftwerksreaktoren nicht auftreten können.

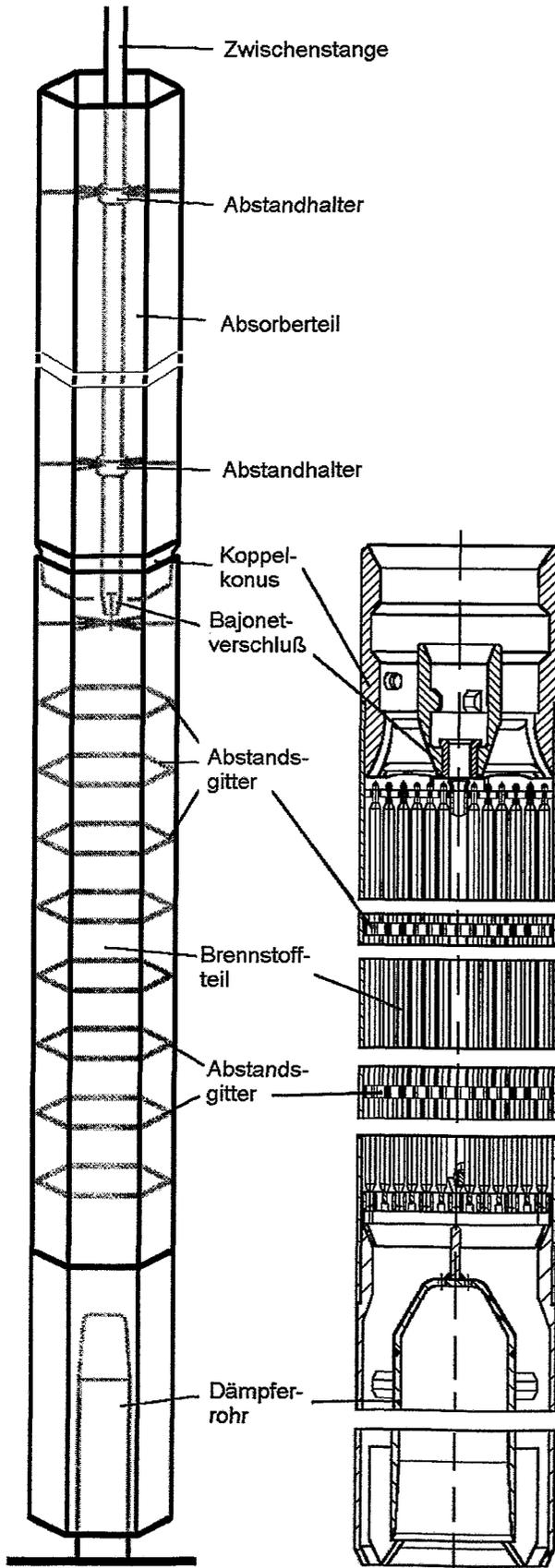
Durch ihre Untersuchungen des Schwingungsverhaltens der Regelelemente wurden die Autoren näher mit den KKW-Fachleuten aus anderen osteuropäischen Ländern bekannt und erfuhren, dass ähnliche Ereignisse in den KKW Kola (UdSSR) [16, 1975], Kozloduy (Bulgarien) [16, 1975] und [17, 1977] stattgefunden haben. Erstaunlich war, dass am finnischen KKW in Loviisa<sup>3</sup> diese Schäden nicht aufgetreten sind [18, 1998], möglicherweise als Folge der schon frühzeitig und vorbeugend durchgeführten Reduzierung des Kühlmitteldurchsatzes innerhalb der Regelelemente und durch den Einsatz von Brennstoffteilen mit verstärkten Kassettenwänden. - Viel später erst erfuhren die Autoren von der Schwingung eines einzelnen Regelelementes ohne Schadensfolge am ungarischen KKW in Paks [19, 1984].

#### 3.2 Gestörtes Anlagenverhalten und betriebliche Maßnahmen

Die Konstruktion der WWER-Regelelemente ist völlig verschieden von der in westlichen Reaktoren verwendeten Cluster-Regelung. Abbildung 3.1 zeigt sehr vereinfacht den Aufbau des WWER-Regelelementes. Das Element besteht aus einem unten befindlichen Brennstoff

<sup>2</sup> Verpflichtungsformel, mit der der zuständige Sicherheitsverantwortliche im damaligen Zentralinstitut für Kernforschung die Bearbeiter verpflichtet hatte. Die Formel „...alles was damit zusammenhängt...“ führte zu sehr erheblichen Verunsicherungen der Bearbeiter.

<sup>3</sup> Der Betreiber in Loviisa war in allgemeiner Form über die Schäden am Brennstoffteil der Regelelemente im KKW Greifswald, die durch strömungsinduzierte Schwingungen hervorgerufen waren, informiert worden, sowie auch über die Maßnahmen der sowjetischen Hersteller zur Vermeidung oder wenigstens zur Reduktion der Schwingungen im Sinne einer Verhinderung von Beschädigungen des Brennstoffes. - Bei der Präsentation des Vortrages [15] führte das Wissen der anwesenden Fachkollegen über diese Schäden zu schwierigen und gegenseitiges Misstrauen erzeugenden Diskussionen.



teil mit hexagonalem Querschnitt, das 126 Brennstäbe enthält, und dem darüber befindlichen Absorberteil. Der Absorberteil steht auf dem Brennstoffteil und wird am unteren Ende durch einen Konus, der in den Brennstoffteil hineinragt, zentriert. Das Brennstoffteil ist durch einen Bajonettverschluss an die Zwischenstange angekoppelt, die ihrerseits an der Zahnstange hängt. Die Länge dieser Anordnung beträgt insgesamt etwa 8 Meter.

Schon seit 1972 waren im Kernkraftwerk Rheinsberg (WWR-70-Reaktor) durch die Autorausdiagnostische Untersuchungen durchgeführt worden, die eine signifikante niederfrequente Resonanz in den Autospektralleistungen der Neutronenfluss-Schwankungssignale in Ex-core-Positionen zeigten. Charakteristisch war eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen mittlerer Resonanzfrequenz und Kühlmitteldurchsatz,

**Abbildung 3.1**

*Vereinfachte Struktur eines Regelelementes der WWR-440-Reaktoren, bestehend aus einem Absorberteil (oben) aus Borstahl und einem Brennstoffteil (Arbeitskassette, unten) mit dem angereicherten Spaltstoff. Das Brennstoffteil wird über einen Bajonettverschluss durch die vertikal bewegliche Zwischenstange gehalten. Das Absorberteil rastet mit seinem konischen Fluss in den Kopf des Brennstoffteils ein. Die Abstandhalter im Innern des Absorbers gewährleisten eine annähernd vertikale Ausrichtung der gesamten Anordnung.*

*Der Auftrieb des gesamten Regelelementes als Folge des Strömungswiderstandes wird durch das Gesamtgewicht beider Teile zuverlässig kompensiert. Brennstoff- und Absorberteil können bei Betrieb von sechs Hauptkühlmittelpumpen jedoch einzeln aufschwimmen, wenn sie entkoppelt sind.*

der durch Zu- oder Abschalten der Kühlmittelpumpen verändert werden konnte. Abbildung 3.4 zeigt diese Abhängigkeit.

Eine Resonanzstruktur mit diesem Verhalten, jedoch wesentlich deutlicher ausgeprägt, war schon während der Inbetriebnahme des Kernkraftwerkes Greifswald am Block 1 (1994) und am Block 2 (1975) in den Neutronenfluss-Schwankungssignalen gefunden worden. Wie im rauschdiagnostischen Bericht der Autoren zur Inbetriebnahme [20, 1975]<sup>4</sup> dokumentiert ist, konnte sie einzig und allein durch die Annahme erklärt werden, dass mindestens ein ortsabhängiger Schwingungsprozess im Reaktor stattfindet<sup>5</sup>. Wegen der allmählich ansteigenden Intensität dieser Resonanzen warnten die Autoren mehrfach vor Beschädigungen.

Am Block 1, der im Herbst 1974 in Dauerbetrieb gegangen war, wurde seit Dezember 1974 ein kontinuierlicher Anstieg der Dosisrate des Kühlwassers im ersten Kreislauf beobachtet, wobei gleichzeitig zunehmend Probleme mit der Beweglichkeit von zwei Regelementen auftraten. Ähnliche Probleme gab es Wochen später auch bei der Inbetriebnahme des Blockes 2. Da am Block 1 das Regelement in der Position 12-31 am 28. März 1975 nicht mehr in die niedrigste Position gefahren werden konnte, und weil Messungen des mechanischen Verhaltens am 31. März 1975 eine Irregularität an diesem Regelement und auch in der Position 12-43 bestätigten, entschied der Betreiber am 03. April 1975 in eigener Verantwortung<sup>6</sup> und gegen den Einspruch der sowjetischen Spezialisten, den Block 1 abzuschalten und für eine Inspektion zu öffnen. Die Dosisrate im Kühlwasser hatte inzwischen einen Wert um 1 Ci/l [21, 1992] erreicht. Am Tage vor der Abschaltung waren Rauschmessungen am Block 1 durchgeführt worden, deren Ergebnis in Abb. 3.21 dargestellt sind.

Am 7. Mai 1975 wurde auch Block 2 wegen ähnlich verdächtiger Effekte abgeschaltet.

### **3.3 Inspektionsergebnisse nach der Störung an den Blöcken 1 und 2 des KKW Greifswald**

Den Spaltzonenquerschnitt mit den im folgenden genannten Positionen zeigt Abb. 3.2.

In KKW-internen Berichten [22, 23, 1975] ist über die Situation am Block 1 geschrieben:

*„Nach der Trennung von Antriebseinheit und Zwischenstange wurde am Block 1 durch Dynamometermessung festgestellt, dass der Brennstoffteil in den beiden Positionen 12-31 und 12-43 fehlte.*

*Die visuelle Inspektion der beiden Regelemente am Block 1 unter Nutzung einer Fernsehkamera im Brennelementbecken ergab:*

- *Position 12-43: der Kopf des Brennstoffteiles war von der Ummantelung abgerissen*
- *Position 12-31: der Kopf des Brennstoffteiles war in der Höhenposition 2 m abgerissen.*

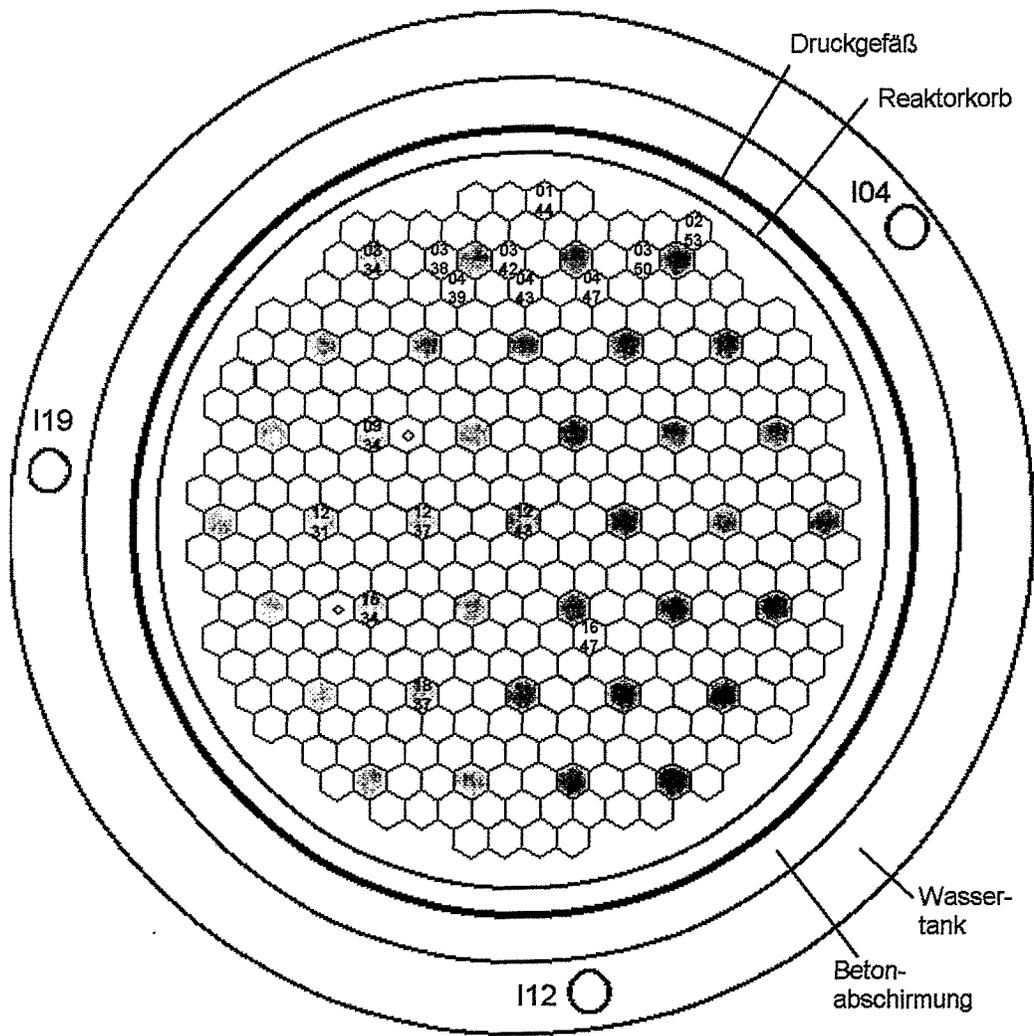
Die spätere Inspektion des verbliebenen Brennstoffteiles ergab:

- *in der Position 12-43 gab es keine Beschädigung der Brennstäbe,*
- *in der Position 12-31 waren Brennstäbe und das Zentralrohr beschädigt.*

<sup>4</sup> Dieser Bericht und nachfolgende wurden als „Vertrauliche Dienstsache“ (VD) eingestuft, waren nachweispflichtig und unter Verschluss aufzubewahren.

<sup>5</sup> Liewers berichtete am 05. April 1975 vor Betreiber und sowjetischen Spezialisten in Greifswald über die Resultate der rauschdiagnostischen Untersuchungen und ihre Deutung als Schwingung von Brennstoffkassetten oder Regelementen. Von der sowjetischen Seite wurde diese Deutung energisch zurückgewiesen: „In den sowjetischen Reaktoren schwingt nichts.“

<sup>6</sup> Maßgeblichen Anteil an dieser Entscheidung hatte der damalige Hauptingenieur Adolf STURM.



Besonderheit	Regelement	Brennstoffteil
Auffälliges Betriebsverhalten	12-31, 12-43	
Fehlendes Brennstoffteil	12-31, 12-43	
Verklemmter Greifer der Entlademaschine	03-34	
Beschädigter Mantel des Brennstoffteils	12-31, 12-43, 15-34, 18-37	
Zerstörte Brennstäbe	12-43	
Beschädigtes Brennstoffteil und Verdacht auf zerstörte Brennstäbe		01-44, 03-42, 04-39, 04-43, 04-47
n-β-Emissionsdetektoren nach Wiederinbetriebnahme des Blockes 1		03-50 (E35-E39), 09-36 (E30-E34), 15-32 (E55-E59), 16-47 (E45-E49)

**Abbildung 3.2**

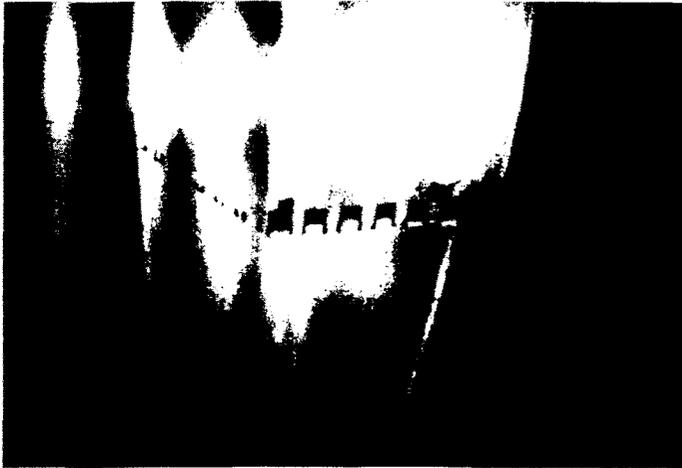
Spaltzonekonfiguration und Beschädigungen am Block 1 im April 1975 nach Entladung von 35 Regelementen und etwa 55 Kassetten (01-38 bis 05-58). Die nummerierten Positionen der Regelemente oder Arbeitskassetten sind in der Schadensbeschreibung, genannt.

Der Betreiber entschied, die gesamte Spaltzone zu entladen und alle Oberflächen aller Brennstoffteile und aller Brennelemente visuell zu kontrollieren. Bei der Entladung der Position 03-34 verklemmte sich der Greifer der Entlademaschine im Absorberkopf und musste unter

*Verwendung eines Brecheisens gelöst werden<sup>7</sup>. Der Greifer musste ausgewechselt werden. Bei der Entladung der Brennstoffteile der Regelelemente in den Positionen 15-34 und 18-37 wurde eine Reihe von Beschädigungen gefunden. An der Kassettenwand dieser Elemente wurden Lücken von mehr als 10 mm Länge gefunden, die durch das anschlagende Distanzgitter im Innern des Brennelementes während einer intensiven und langdauernden Schwingung entstanden waren.“*

Abb. 3.3a/b zeigen - qualitativ schlechte - Fotografien des Bildes einer fernbedienten Inspektionskamera.

An allen Regelelementen wurden Spuren und Riefen gefunden wie sie in den Abb. 3.3 a/b zu sehen sind.



**Abbildungen 3.3 a, 3.3 b**

*Perforierter Kassettenmantel der Regelelemente 12-31 (oben) und 12-43 (unten).*

*Als Folge der horizontalen Pendelschwingungen und der dabei auftretenden Anschläge an den umgebenden Führungskanal tragen die Distanzgitterelemente die oxidierte Oberfläche des Kassettenmantels ständig ab. Auf diese Weise führt die Reibkorrosion allmählich zur Zerstörung sowohl der Kassettenwand als auch der Brennstabhülle. Bei den bestimmungsgemäßen Positionsänderungen der Regelemente können die herausragenden Distanzgitter sowohl die eigene als auch*

*Benachbarte Kassetten beschädigen. Zum Beispiel war bei Bewegungen des Regelementes 12-43 der Kopf des Brennstoffteiles abgerissen, Absorberteil und Teile des Brennstoffteiles waren getrennt beweglich.*

*Folgeschäden dieser Art sind weit auffälliger als die Perforationen und haben dazu beigetragen, dass erst allmählich die Pendelschwingungen als Ursache der Schäden erkannt, anerkannt und auch von sowjetischer Seite bestätigt worden sind. Zwischen dem 3. und 6. Mai 1975 wurden etwa 90 Brennelemente ausgeladen. Fünf davon zeigten Beschädigungen an der Außenwand (01-44, 03-42, 04-43, 04-39 und 04-47).*

Nur wenige Tage nach der Inspektion der beschädigten Regelelemente bestätigten die sowjetischen Spezialisten die Vibrationsursache der Beschädigungen. In Bezug auf den Stand der Instandsetzung informierte Staatssekretär SIEBOLD den Persönlichen Referenten des Ministers [24, 1975]:

1. *„Schadensursache: Der Sowjetische Minister für Atomenergie, SEMJONOW, hat erklärt: Als wahrscheinlichste Ursache der Schäden kommen Schwingungen des gesamten Regelementes in Frage, die eine intensive Reibkorrosion des austenitischen Distanzgitters so-*

<sup>7</sup> Über ein ähnliches Ereignis wurde in Verbindung mit der Entladung des KKW in Kozlodui (Bulgarien) [14, 1975] berichtet. Um den Greifer vom Regelement zu trennen, wurde die gesamte Anordnung einige Male gegen die Wand des Gleiskorridors geschlagen.

wohl an der Brennstoffkassette als auch an der Brennstabhülle und damit verbundene Zerstörung der Struktur hervorrufen. Aller Wahrscheinlichkeit nach sind diese Schwingungen konstruktionsbedingt<sup>8</sup> und kommen durch die hohe Kühlmittelgeschwindigkeit zustande, die nahe der erlaubten Grenze lag.

2. Beseitigung der Ursache: Um die Ursache zu beseitigen, ist keine Veränderung der Konstruktion der Reaktoreinbauten notwendig. Aber die Brennstoffteile sind durch neue zu ersetzen. Die Produktion veränderter Brennstoffteile hat schon begonnen...<sup>9</sup>“

### 3.4 Reparatur und vorbeugende Maßnahmen

Im Abschlussbericht der Schadenskommission<sup>10</sup> [25, 1976] sind die Maßnahmen der Inspektion und Reparatur aufgelistet:

- o *Mai bis September 1975: Visuelle Begutachtung der Brennelemente innerhalb des Brennelementbeckens, Begutachtung der Dämpferregion, des unteren Spaltzonengitters, des Korbbodens und des Druckgefäßes auf der Suche nach Fremdkörpern (Pellets) im ersten Kreislauf mit Hilfe speziell entwickelter Werkzeuge. Bergung der Fremdkörper.*
- o *August 1975: Verminderung des Kühlmitteldurchsatzes im Innern der Regelemente durch Verringerung der Anzahl der Einströmöffnungen in der Dämpferregion.*
- o *September 1975: Leckkontrolle aller Brennelemente.*
- o *20. Oktober 1975: Überprüfung der Durchsatzminderung durch hydraulische Messungen. Bestätigung der gemessenen Werte durch die sowjetische Seite. Kritisches Experiment.*

In Abstimmung mit Entscheidungen der Staatlichen Kommission zur Nutzung der Atomenergie in der Sowjetunion wurden folgende Konstruktionsänderungen vorgenommen [23, 1976]:

- o *Reduktion des Kühlmitteldurchsatzes durch die Regelemente durch Einwalzen metallischer Zylinder in 4 der 12 Einströmöffnungen in der Dämpferregion (bestätigt durch [18, 1998])*
- o *Auswechseln der Brennstoffteile durch solche neuen mit größerer Wandstärke.*
- o *Justierung der Länge der Zwischenstangen oder Auswechseln gegen neue.*

Einer Empfehlung des Betreibers folgend haben das Ministerium für Kohle und Energie der DDR und das Allunionsinstitut für auswärtige Atomkraftwerke („Sojus24“) in Moskau beschlossen, dass während der Reparatur Rauschdiagnostiksysteme [13, 1977] für beide betroffenen Reaktoren durch die Gruppe Rauschdiagnostik im Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf entwickelt, hergestellt, installiert und in Betrieb genommen werden sollen. Sie umfassen die Messfühler, Vorverstärker und Verstärker für

- o 6 Kanäle zur Messung des Neutronenflusspegels und seiner Schwankungen,
- o 8 Kanäle zur Messung der Druckschwankungen
- o 6 Kanäle zur Messung der Beschleunigung an der Regelement-Schutzrohren,
- o 4 Kanäle zur Messung niederfrequenter Beschleunigungen an den Stiftschrauben des Druckgefäßkopfes und
- o 18 Kanäle zur Messung der In-core-Neutronenfluss-Schwankungen auf der Basis von n-β-Emissionsdetektoren mit Rhodium-Emitter.

<sup>8</sup> Auf Grund dieser Aussage hat der zuständige Staatssekretär MITZINGER im Ministerium für Kohle und Energie dem sowjetischen Hersteller einen Schadenersatz in Höhe von 10.000 Rubel für den Produktionsausfall in Rechnung gestellt, was auf sowjetischer Seite zu erheblicher Verstimmung führte und in der Folge auch das Verhältnis der Bearbeiter zu allen sowjetischen Fachleuten und Dienststellen belastete. Bis 1990 hat es trotz vieler Bemühungen keinerlei Kontakte der Bearbeiter zu sowjetischen Betreibern gegeben.

<sup>9</sup> Bereits am 3. und 4. Juli 1975 wurden die neuartigen Brennstoffteile für alle Regelemente per Flugzeug angeliefert [25, 1975]. Das ist eine nicht nur für sowjetische Verhältnisse überraschend kurze Lieferfrist.

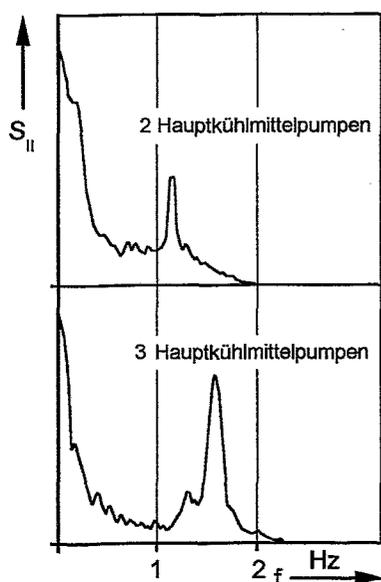
<sup>10</sup> Während an den Werktoeren des Kernkraftwerkes Greifswald auf Transparenten der sozialistische Wettbewerb verkündet wurde „Wir kämpfen um eine vorfristige Wiederinbetriebnahme“, war den Rossendorfer Bearbeitern jegliche Äußerung untersagt.

Experimentelle Bestimmungen der Autospektralleistung<sup>11</sup> wurden bei der Wiederinbetriebnahme durchgeführt, wobei ausgewählte Signale der obigen Messfühler auf Analogmagnetband gespeichert und am Fourieranalysesystem NICOLET 1086<sup>12</sup> im ZfK Rossendorf ausgewertet wurden. Die Auswertung ergab, dass weiterhin Regelelementschwingungen bestehen, dass deren Amplitude nur geringfügig gegenüber dem Anfangsbefund während der Inbetriebnahme verringert ist<sup>13</sup> und dass die Mittenfrequenz des Resonanzgebietes sich zu geringeren Werten verschoben hat.

### 3.5 Rauschdiagnostische Untersuchungen und physikalische Aufklärung

#### 3.5.1 Allgemeine Ergebnisse durch Analyse der Neutronenfluss-Schwankungen

Wie schon erwähnt hatten bereits erste rauschdiagnostische Untersuchungen am WWER-70-Reaktor des KKW Rheinsberg eine niederfrequente Resonanzstruktur (s. Abb. 3.4) gezeigt, die durch die Reaktortheorie nicht erklärbar war, so dass genauere Untersuchungen nötig waren.<sup>14</sup>



Auf unerwartete und unerklärliche Weise verschwand diese Resonanzstruktur im Jahre 1973. Grund dafür war der Austausch von drei der typischen hexagonalen WWER-Regelelemente von Abb. 3.1 durch Cluster-elemente, was die Bearbeiter aber erst zwei Jahre später erfahren haben.

Erste Rauschuntersuchungen während der Inbetriebnahme des WWER-440 Reaktors Block 1 des KKW Greifswald zeigten eine sehr viel deutlichere Resonanzstruktur in den Ex-core-Neutronenflussschwankungen wie in Abb. 3.5

**Abbildung 3.4**

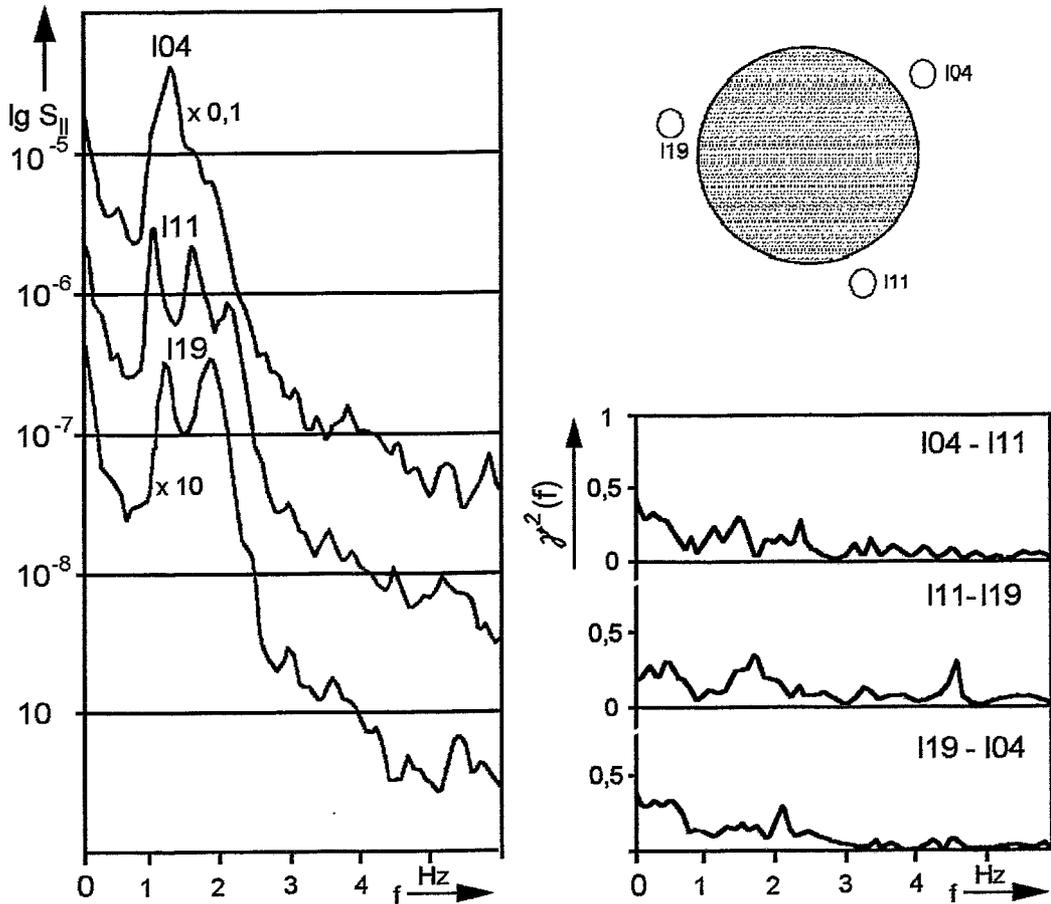
*Autospektralleistung der Neutronenfluss-Schwankungen in Ex-Core-Positionen des Kernkraftwerkes Rheinsberg 1972 in Abhängigkeit von der Anzahl der arbeitenden Hauptkühlmittelpumpen. Die Resonanzfrequenz steigt mit steigender Kühlmittelgeschwindigkeit. Es sind nur wenige der 19 Regelelemente zu Schwingungen angeregt.*

<sup>11</sup> Im vorliegenden Bericht wird in allen skalierten Abbildungen anstatt der üblichen Spektralen Leistungsdichte  $[(\text{physikalische Größe})^2/\text{Hz}]$  die Spektralleistung  $[(\text{physikalische Größe})^2]$  angegeben. Diese Größe ist unabhängig von der (digitalen) Auflösung, so dass die Amplitude einer ausgeprägten Resonanz nahezu deren Leistung repräsentiert.

<sup>12</sup> Das Leistungsvermögen der speziellen, von den Bearbeitern erstellten Signalanalyse-Software ist in [26, 1984] beschrieben. Alle in diesem Bericht genannten Signalanalyseverfahren wurden auf diesem Rechner implantiert und alle dargestellten Analyse-Ergebnisse wurden mit Hilfe dieser Software gewonnen.

<sup>13</sup> Das ist nicht verwunderlich, denn die Amplitude der Schwingungen wird durch den Führungskanal der Regelelemente begrenzt.

<sup>14</sup> Zu diesem Zeitpunkt (1971) war sowohl die Sensor- als auch die Verstärkerausrüstung am Reaktor WWER-70 für die Untersuchung von Schwankungssignalen völlig ungeeignet, der Frequenzgang der verwendeten Analogmagnetbandspeicher zeigte Eigenresonanzen und die Messdaten konnten nur in Form von extrem langen Lochbändern in den zur Fouriertransformation verwendete Rechner D4a (Rechner mit 4k-Trommelspeicher des VEB Cellatron Zella-Mehlis) eingegeben werden. Auf Grund dieser technischen Bedingungen war eine Aufklärung der Resonanzerscheinungen kaum möglich.



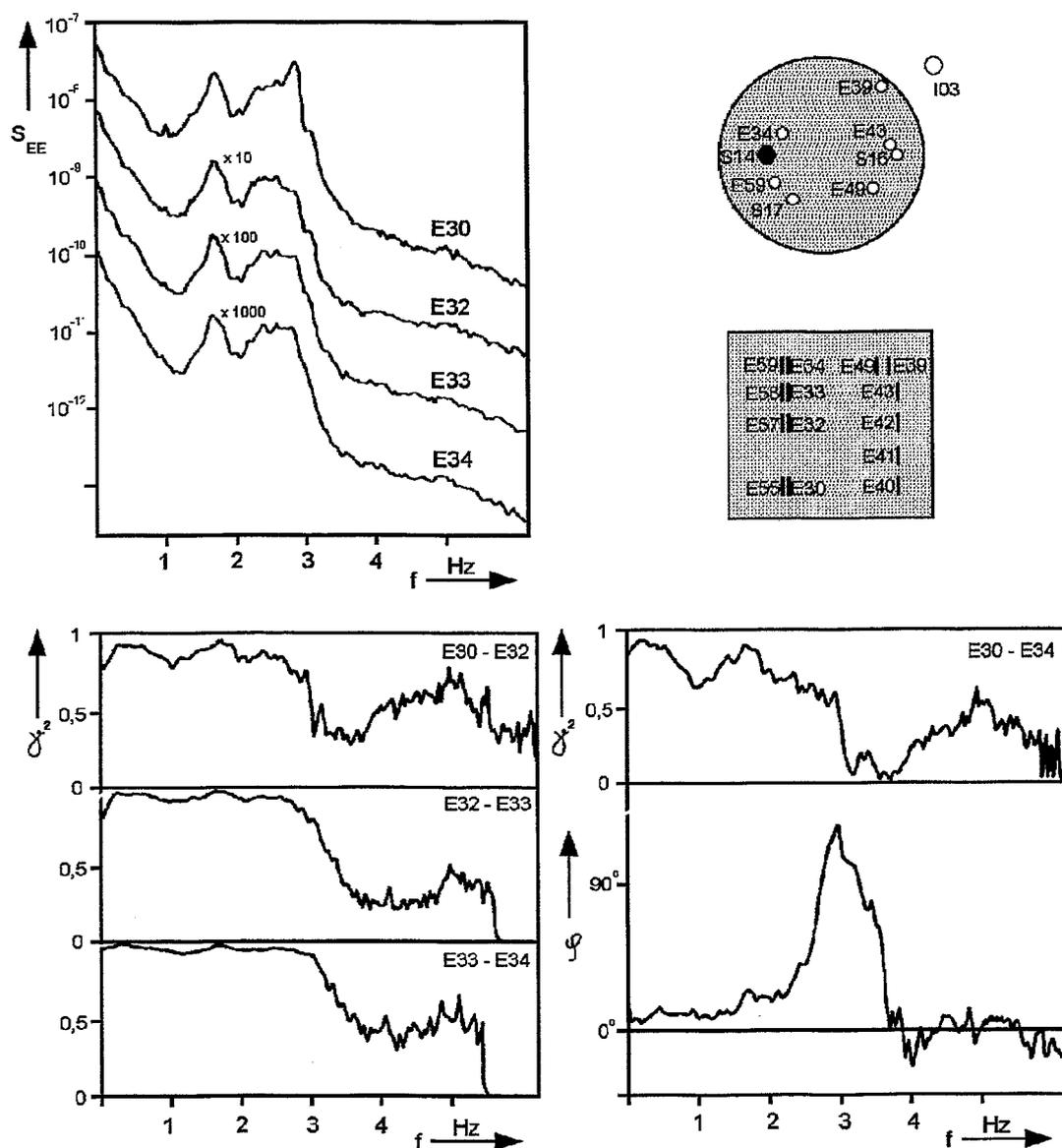
**Abbildung 3.5**

Normierte Autospektralleistungen der Neutronenflussschwankungen, gemessen mit den Ex-core-Ionisationskammern I04, I11 und I19 am Block 1, zusammen mit den zugehörigen Kohärenzfunktionen. Die Resonanzstruktur in den verschiedenen Messpositionen ist deutlich unterschiedlich und weist zusammen mit den geringen Kohärenzwerten auf eine größere Anzahl örtlich verteilter Rauschquellen hin, deren Auswirkungen offenbar örtlich begrenzt sind.

Die Resonanzstruktur der normalisierten Autospektralleistungen  $S_{xx}$  in Abb. 3.5 ist in den Signalen von unterschiedlichen externen Detektorpositionen ganz verschieden, und die Kohärenzfunktionen beliebiger Paare erreichen Maximalwerte von nur knapp 20% im Resonanzgebiet. Dieser Sachverhalt deutet auf einige ähnliche, sich überlagernde, aber untereinander unkorrelierte Rauschquellen hin und auch auf die Ortabhängigkeit der Übertragung in die verschiedenen Detektorpositionen.

Die nachfolgenden Abbildungen gehören, wenn nicht anders vermerkt, zu den Untersuchungen nach der Reparatur, wo wesentlich mehr Signale aus dem neu installierten Rauschanalysesystemen verfügbar waren, das Schwingungsverhalten aber ähnlich deutlich ausgeprägt war.

In Abb. 3.6 sind die Autospektralleistungen, Kohärenzen und Phasenfunktionen der Rauschanteile von n- $\beta$ -Detektoren E30 ... E34 angegeben, die in einer Detektorlanze in der Position 09-36 in verschiedenen Höhenpositionen angeordnet waren.

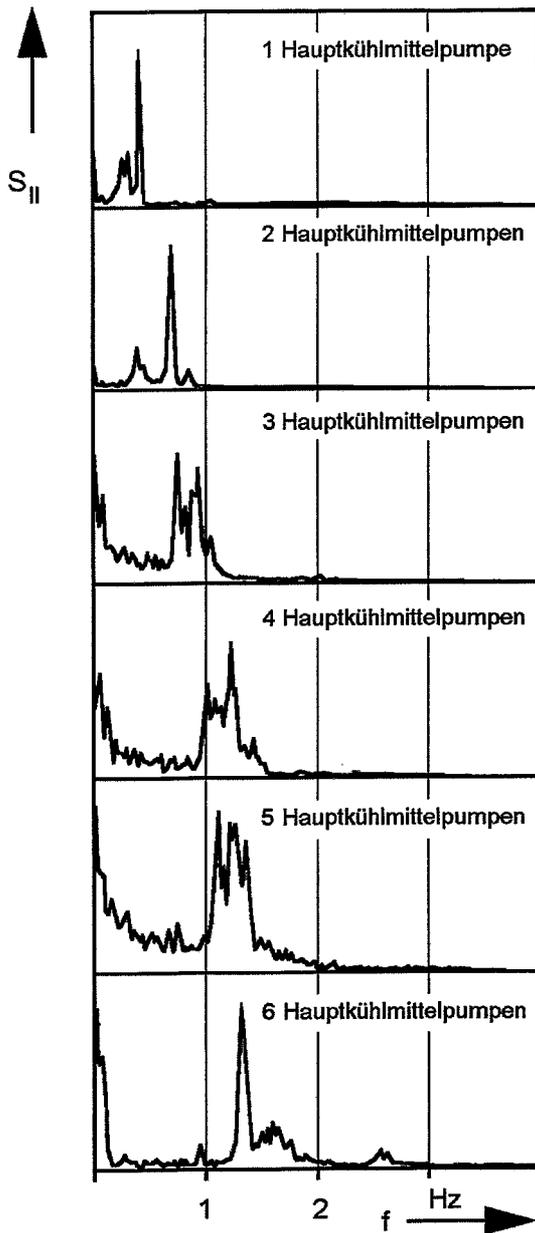


**Abbildung 3.6**

Normalisierte Autospektralleistungen der Neutronenfluss-Schwankungen E30, E32, E33 und E34, gemessen mit Hilfe von  $n$ - $\beta$ -Emissionsdetektoren in In-core-Positionen in verschiedenen Höhenlagen sowie die zugehörigen Kohärenzfunktionen  $\gamma^2(\omega)$  und die Phasenfunktion  $\phi(\omega)$  für den größten geometrischen Abstand (E30 - E34).

Die Untersuchungen der Spektralleistungen, Kohärenzen und Phasenfunktionen solcher In-core  $n$ - $\beta$ -Emissionsdetektorsignale, deren Geber in einer Lanze übereinander in verschiedenen Höhenpositionen angeordnet sind, bestätigen in Abb. 3.6 diese Aussage: Die Autospektralleistungen sind ähnlich, die Kohärenzfunktionen  $\gamma^2(\omega)$  als Maß der Signalverwandtschaft erreichen im Resonanzgebiet fast den Werte der vollständigen Kohärenz knapp unter 1. Die Phasenfunktion  $\phi(\omega)$  erreicht als Maximalwert  $15^\circ$ , d.h. der verursachende Effekt ist in der unteren Position nur wenig gegenüber der oberen Position verzögert, sonst aber weitgehend identisch.

Schon während der Inbetriebnahme des Blockes 1 waren Rauschmessungen bei variierender Anzahl der in Betrieb befindlichen Hauptkühlmittelpumpen durchgeführt worden. Die resultierenden Autospektralleistungen zeigt Abb. 3.7.



**Abbildung 3.7**

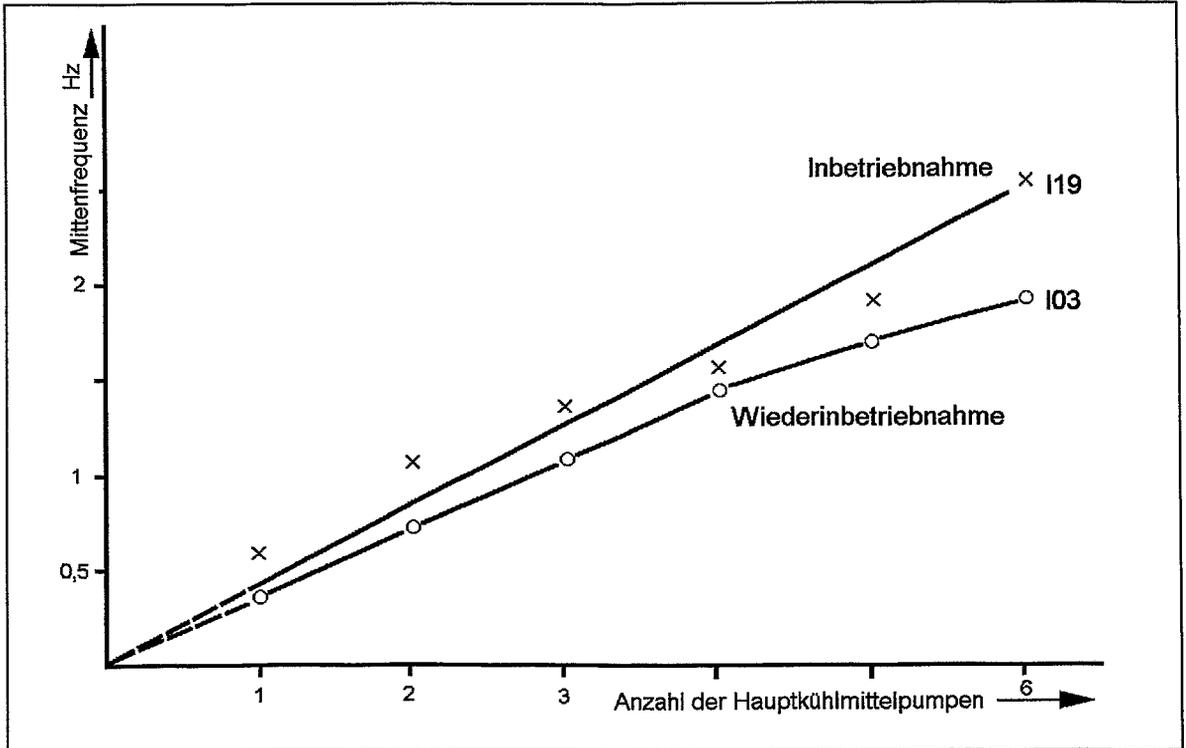
Normalisierte Autospektralleistungen der Neutronenfluss-Schwankungen (in linearem Maßstab), gemessen mit der Ex-core-Ionisationskammer 104 bei verschiedener Anzahl arbeitender Hauptkühlmittelpumpen. Die Resonanzmittelfrequenz nimmt mit wachsender Anzahl arbeitender Hauptkühlmittelpumpen stetig zu, und die Form des Resonanzgebietes ändert sich dabei deutlich.

Diese Abbildung liefert die wohl typischste Information über die Regelelementschwingungen an WWER-440-Reaktoren und erlaubt eine Schlussfolgerung bezüglich des verursachenden physikalischen Phänomens: Die Resonanzstruktur verändert sich mit dem Durchsatz deutlich<sup>15</sup> und die Mittenfrequenz wächst mit wachsendem Durchsatz. Diagnostisch wichtig ist die Tatsache, dass bei sechs laufenden Pumpen die erste Oberharmonische der scharf ausgeprägten Resonanz bei 1,35 Hz deutlich hervortritt. Offenbar ist die Schwingung nicht mehr rein harmonisch. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich die Intensität der Einzelresonanzen mit wachsendem Kühlmitteldurchsatz nicht wesentlich ändert, siehe Fußnote 9! Definiert man eine Mittenfrequenz als Schwerpunktabzisse des Resonanzgebietes, so ergibt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit<sup>16</sup> zwischen dieser Mittenfrequenz und der Anzahl der laufenden Hauptkühlmittelpumpen wie in Abb. 3.8.

Der Vergleich der Resonanzmittelfrequenzen vor und nach der Reparatur in Abb. 3.8 zeigt deutlich den Einfluss der Kühlmittelreduktion durch das Zuwalzen von Einströmöffnungen in der Dämpferregion: Nach der Rekonstruktion erreicht die Mittenfrequenz bei 6 laufenden HKMP nur den Wert, den sie vor der Rekonstruktion bereits bei 4,5 laufenden HKMP erreicht hatte, d.h. der Kühlmitteldurchsatz innerhalb der Regelelemente erscheint auf 75% abgesenkt.

<sup>15</sup> Berücksichtigt man die Aussage von Abb. 3.5, dass eine größere Anzahl ähnlicher Rauschquellen in der Spaltzone örtlich verteilt ist, so kann auf Grund der Abb. 3.7 vermutet werden, dass sich bei verändertem Kühlmitteldurchsatz auch die örtliche Verteilung der Rauschquellen ändert.

<sup>16</sup> Die bei sechst laufenden HKMP auftretende Abweichung vom linearen Verhalten korrespondiert mit der Tatsache, dass auf Grund der hochturbulenten Strömung bei der Zuschaltung der sechsten Pumpe auch der Durchsatz nicht mehr linear ansteigt.



**Abbildung 3.8**

Abhängigkeit der Mittenfrequenz des Resonanzgebietes, das durch Regelelementschwingungen im Autoleistungsspektrum des Neutronenflussrauschens der Ex-core-Ionisationskammern induziert wird, von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Hauptkühlmittelpumpen, Block 2 des KKW Greifswald, 1975

Das bestätigt die Maßnahme des sowjetischen Reaktorherstellers, durch Reduktion der Einströmöffnungen den Durchsatz zu mindern<sup>17</sup>.

Die von der sowjetischen Seite abgegebene Erklärung [24, 1975], der zufolge die Schwingungen allein durch eine zu hohe Kühlmittelgeschwindigkeit zustande kommen, wird jedoch durch die Resultate der Rauschmessungen bei der Wiederinbetriebnahme nicht gestützt, denn die Resonanzintensität ist nach der Rekonstruktion nur unwesentlich gegenüber dem Zustand bei der Inbetriebnahme verändert, wie Tabelle 3.2 belegt.<sup>18</sup>

**Tabelle 3.2**

Resonanzintegrale RI der normalisierten Autospektralleistungen am Block 1 des KKW Greifswald vor und nach der Rekonstruktion (in Einheiten von  $10^{-6}$ )

Anzahl der laufenden HKMP	1	2	3	4	5	6
RI bei Inbetriebnahme	0,8	1,2	1,8	3,2	4,2	5,1
RI vor der Abschaltung						20 (!)
RI nach der Rekonstruktion	0,5	0,9	1,5	2,5	3,5	4,5

Die nur geringfügige Reduktion der Resonanzintensität legt die Vermutung nahe, dass die Schwingungsamplituden durch die konstruktiven Maßnahmen nicht verändert worden sind,

<sup>17</sup> Natürlich ist die Kühlmittelgeschwindigkeit an der Außenfläche der Regelelemente durch die Verringerung der Einströmöffnungen nicht verändert worden.

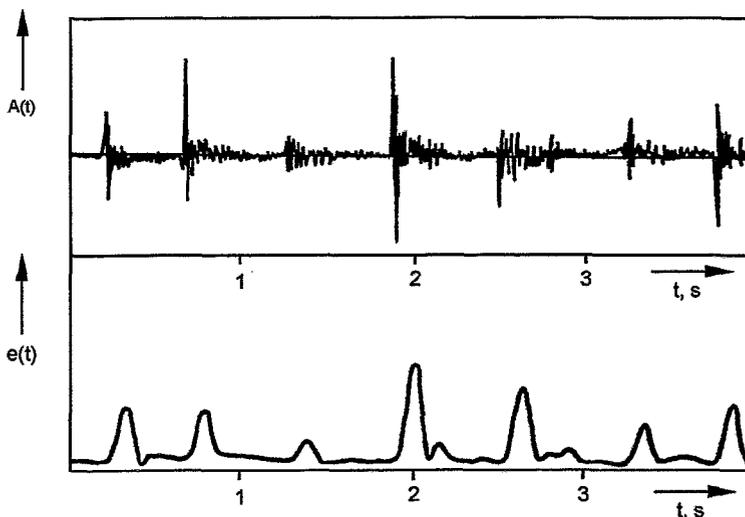
<sup>18</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Spektralleistung eine quadratische Größe ist, zur Ermittlung der Schwingungsamplitude also die Wurzel zu ziehen ist.

und dass – wie bereits angedeutet - diese Amplituden offenbar durch die Wandungen der umliegenden Brennstoffkassetten begrenzt werden<sup>19</sup>.

### 3.5.2 Befunde aus der Analyse nicht-nuklearer Messgrößen

Auf der Grundlage der Hypothese, dass die normalisierten Autospektralleistungen des Neutronenflussrauschens aus Anteilen bestehen, die durch unkorrelierte, aber ähnliche Schwingungen einer größeren Anzahl von Regelementen hervorgehen, besteht unmittelbar praktisches Interesse daran, den Ort der am kräftigsten schwingenden Regelemente zu bestimmen und ihren Anteil – möglichst Schwingungsamplitude und Schwingungsform - für diagnostische Zwecke zu separieren. Sowohl wegen der möglicherweise großen Anzahl schwingender Elemente und der großen Anzahl der schwingungsbeschreibenden Parameter: zwei Parameter für den Ort, mindestens drei Parameter in je zwei unterschiedlichen Höhenpositionen für die Beschreibung einer elliptischen Bewegung der Regelementachse sowie ein Rotationsanteil [27, 1982] als auch wegen des stochastischen Charakters der Einzelbewegung scheint eine analytische Bestimmung dieser Bewegung allein aus der Analyse des Neutronenflussrauschens unmöglich. Daher musste nach einer experimentellen Methode gesucht werden<sup>20</sup>.

Eine ausgesprochen nützliche und hilfreiche Zusatzinformation liefern Beschleunigungsaufnehmer an den Schutzrohren der Regelemente, die außer der Beschleunigung auch Ereignisse aus ihrer unmittelbaren Nachbarschaft in Form von Körperschall aufnehmen. Antriebsgeräusche, Strömungsgeräusche und auch Anschlaggeräusche können in dieser Detektorposition gut wahrgenommen werden.



**Abbildung 3.9**

Beschleunigungssignal  $A(t)$ , gemessen am Regelement-Standrohr der Position 12-31 (S14), das, über einen Lautsprecher hörbar gemacht, den Eindruck von Anschlägen vermittelt.

Durch eine einfache Amplitudendemodulation entsteht die zugehörige Envelope  $e(t)$ . Die Verwendung eines Anti-Aliasing-Tiefpassfilters verzögert die Einhüllende um etwa 100 ms gegenüber der ursprünglichen Beschleunigung.

Bei der Demodulation mit Hilfe der HILBERT-Transformation ist diese Verzögerung vermeidbar.

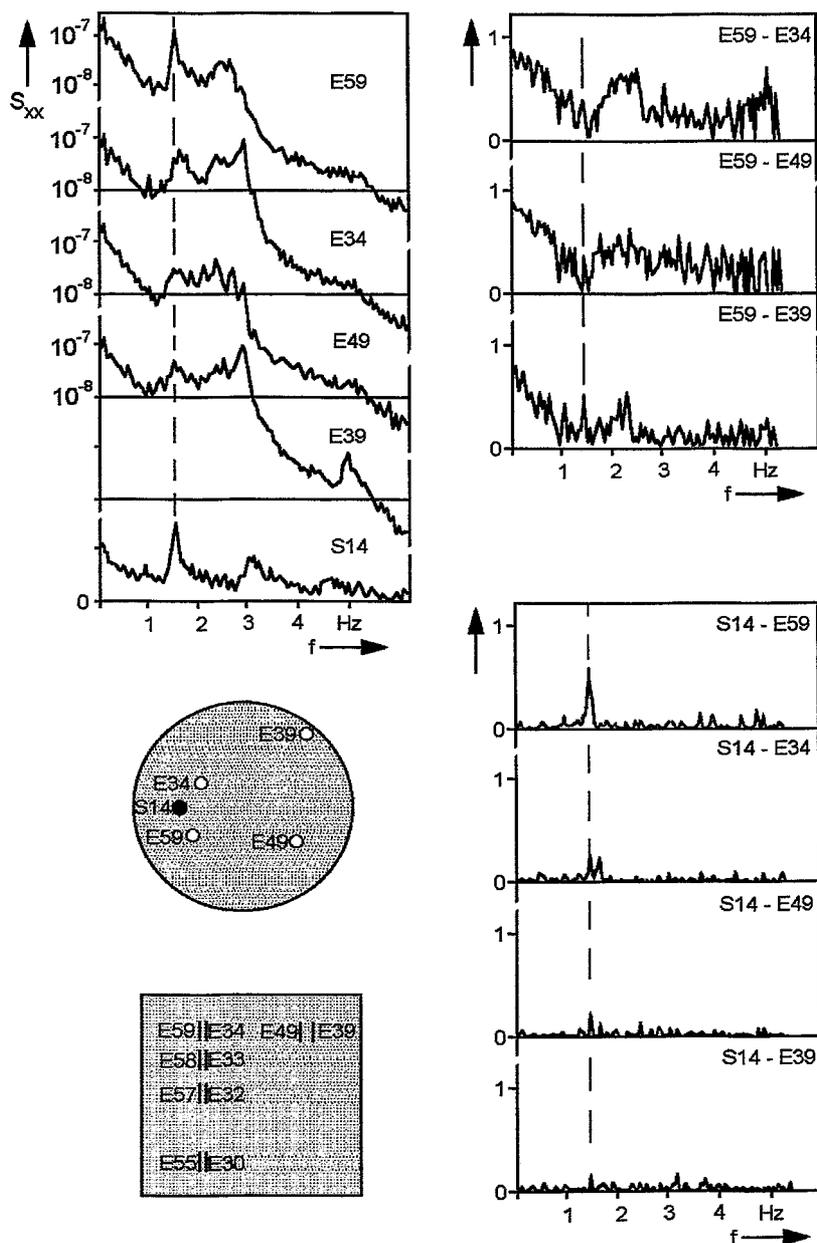
Schon die visuelle Beobachtung am Bildschirm und gleichzeitiges Anhören der verstärkten Beschleunigungssignale erzeugte den Eindruck eines kausalen Zusammenhangs zwischen

<sup>19</sup> Diese Interpretation der Bearbeiter traf bei der sowjetischen Seite auf Widerspruch, weil somit erneute Schäden nicht auszuschließen wären. Die sowjetischen Spezialisten im Kraftwerk erklärten nach Rücksprache mit dem Hersteller wörtlich, dass es „künftig keine Beschädigungen von Regelementen mehr geben wird“. Die Tatsache, dass in der Folge keine Beschädigungen mehr aufgetreten sind, hat ihre Ursache sicherlich auch in der Verstärkung des Wandmaterials der Brennstoffteile von 1,5 mm auf 2,0 mm, die in Verbindung mit den Beschädigungen nirgends erwähnt ist.

<sup>20</sup> Eine andere Methode zur Identifizierung des Ortes eines schwingenden Regelementes und zu seiner Diagnose allein mit Hilfe der Analyse des Neutronenflussrauschens in In-core und Ex-core Positionen beschreiben GLÖCKLER und PAZSIT [19, 1983, 1984 und 1988]. Diese Methode ist jedoch nur erfolgreich, wenn es sich um ein einzelnes schwingendes Element handelt oder die Schwingfrequenzen mehrerer Regelemente ausreichend unterschiedlich sind.

den niederfrequenten Neutronenfluss-Schwankungen und auffälligen anschlagähnlichen Geräuschen. Solche transiente Struktur ist in Abb. 3.9 oben beispielhaft dargestellt.

Natürlich ist nicht das relativ hochfrequente transiente Schallsignal  $A(t)$  kohärent zum Neutronenflussrauschen, wohl aber die Einhüllende  $e(t)$ , die daraus durch eine einfache Amplituden-Demodulation (Zweiweg-Gleichrichtung und Tiefpassfilterung) abgeleitet werden kann und in Abb. 3.9 unten dargestellt ist. Eine bessere Demodulation ist mittels der digitalen HILBERT-Transformation zu erreichen [28, 1991].



**Abbildung 3.10**

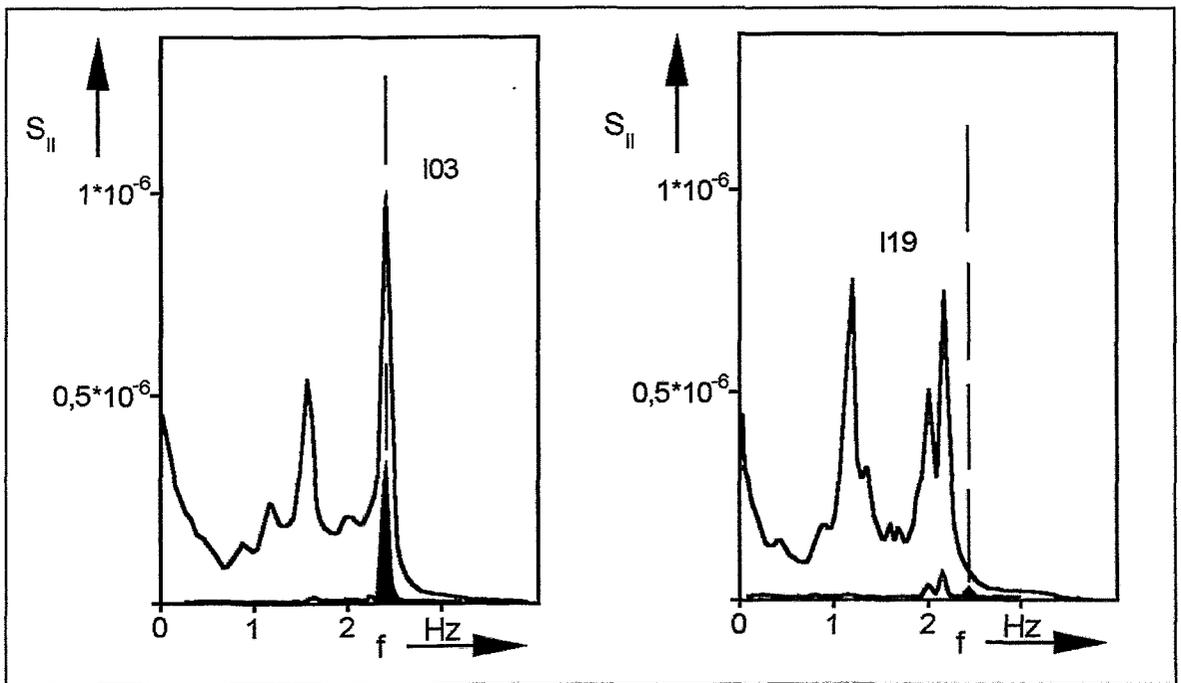
Normierte Autospektralleistungen  $S_{xx}$  der  $n$ - $\beta$ -Emissionsdetektorsignale  $E_j$  in verschiedenen Messpositionen und des Körperschallsignals S14 (oben links) sowie die Kohärenzfunktionen (oben rechts)  $\hat{\gamma}(\omega)$  dieser Signalkombinationen. Der Korrelationsgrad (unten links) im Frequenzpunkt der Anschlagfrequenz hängt deutlich von Abstand und Detektorrichtung zwischen Regelement und Detektor ab.

Die Kohärenzfunktionen des Einhüllenden-Signals S14 in der eingezeichneten Core-Position und der Neutronenfluss-Schwankungen in In-core Positionen sind in Abb. 3.10 unten/rechts dargestellt. In den Autospektralleistungen links ist die Peakfrequenz  $f_{14}$  des Schallpegelsignals S14 eingezeichnet. Die Autospektralleistungen von vier In-core Neutronenfluss-Schwankungssignalen, die in gleicher Höhenposition aber in sehr unterschiedlicher horizontaler Entfernung von der Regelementposition des S14-Signals gemessen wurden, zeigen die schon erwähnte unterschiedliche Resonanzstruktur. Die Schwingfrequenz  $f_{14}$  ist nur in der Spektralleistung von E59 stark ausgeprägt<sup>21</sup>. Das Signal dieses In-core-Detektors in der unmittelbar benachbarten Position ist in hohem Maße kohärent zur Schallpegel S14, der etwa gleichweit entfernte, aber in anderer Richtung befindliche Detektor E34 ist weit weniger kohärent, und in den noch weiter entfernten Detektoren E49 und E39 sind die Kohärenzwerte so gering, dass sie als statistisch unsicher bezeichnet werden müssen.

Alles in allem ist die Kreuzspektralleistung von Einhüllender und Neutronenfluss-Schwankung gut geeignet, um den Anteil eines einzelnen schwingenden Regelementes aus dem komplexen Neutronenflussrauschen, das Anteile von allen schwingenden Elemente enthält, zu separieren. Für eine quantitative Bestimmung des zum Schallpegelsignal korrelierten Anteils wurde die Partielle Spektralleistung [14, 1977] eingeführt.

$$S_{xx}^{part}(f) = S_{xx}(f) * \gamma_{xs}^2(f), \quad (3.1)$$

und stellt damit die untere Grenze<sup>22</sup> des mittleren Schwingungsanteils des untersuchten Regelementes dar. Abb. 3.11 zeigt die prinzipielle Möglichkeit, den Anteil eines einzelnen schwingenden Regelementes aus dem komplexen Neutronenflussrauschen zu separieren.



**Abbildung 3.11**

Normierte Autospektralleistungen der Neutronenfluss-Schwankungen in den Positionen 103 und 119 und die über die Kohärenzfunktion  $\gamma^2(f_{14})$  ermittelten partiellen Spektralleistungen für die Resonanzfrequenz  $f_{14}$  des Schallpegelsignals S14 (beide in linearer Skalierung).

<sup>21</sup> In der Autospektralleistung von E34 ist die Grundharmonische von S14 nur undeutlich erkennbar, aber die zweite Harmonische  $2*f_{14}$  ist signifikant, s. auch Abschnitt 3.5.3.

<sup>22</sup> Die untere Grenze, weil das Schallpegelsignal  $e(t)$  hier als völlig unverrauscht angenommen wird.

Zusätzlich zu Gl. (3.1) kann gezeigt werden, dass die Differenz der beiden Phasenfunktionen  $\Delta\varphi(f)$

$$\Delta\varphi(f) = \varphi_{sy}(f) - \varphi_{sx}(f) \quad (3.2)$$

identisch ist mit der Phasendifferenz, die die Detektoren x und y bezüglich des korrelierten Anteils zeigen würden, könnte man sie direkt bestimmen. Die partielle Spektralleistung ermöglicht also auch die Bestimmung der Zeitverzögerung im Bewegungsablauf eines einzelnen Regelelementes.

### 3.5.3 Befunde durch Analyse von Ereignissen unter Nutzung von Zeitmittelfunktionen (Average functions)

Auf Grund der Annahme, dass die transienten Schallereignisse in den Beschleunigungssignalen von Anschlägen herrühren, ist der Zeitverlauf solcher Anschläge von Interesse. Die Periodizität der Schallereignisse in Abb. 3.9 und erst recht die Existenz eines Resonanzpeaks im Envelope-Spektrum erwecken den Eindruck, dass die Anschläge sich nach einer gewissen Zeit wiederholen. Will man ein klares Abbild des postulierten Anschlagvorgängen in den Neutronenfluss-Schwankungen erhalten, so wird es wegen des stochastischen Charakters sowohl der Neutronenfluss-Schwankungen als auch der Ereignisamplituden nötig, den stochastischen Anteil zu reduzieren, etwa durch Anwendung der Zeitmittelung. Diese hat die nützliche Eigenschaft, dass die zum Triggersignal korrelierten Signalanteile zu einem Mittelwert zusammengefasst und damit in ihrer Amplitude erhalten bleiben, während bei Summation über N Einzelmessungen alle dazu nicht korrelierten Anteile auf den Wert

$$1/\sqrt{N}$$

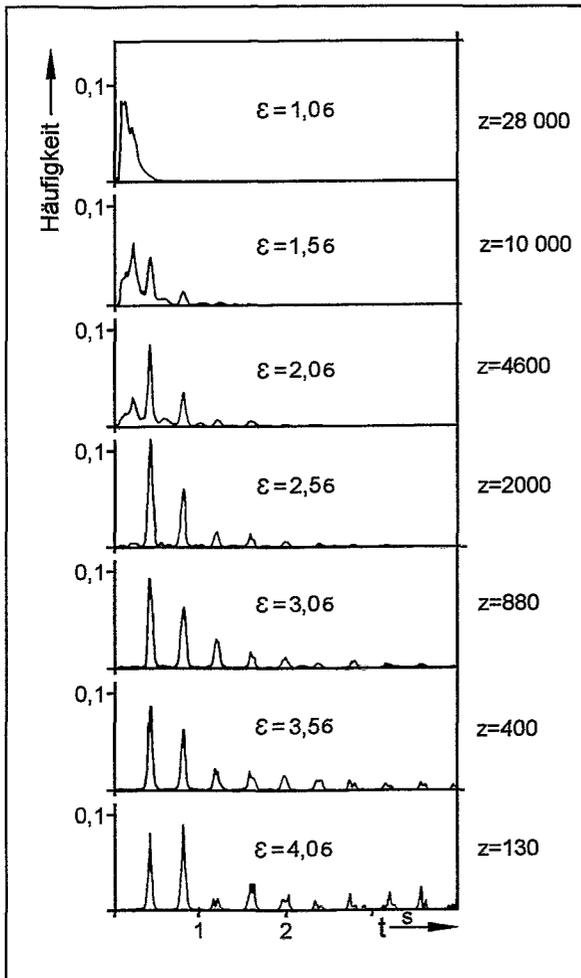
ihrer mittleren Amplitude verringert werden.

Eine Mittelfunktionsbildung im Zeitbereich ist nur dann sinnvoll möglich, wenn eine Zeitmarke verfügbar ist, die stets dem gleichen Zustand des untersuchten Prozesses zugeordnet ist. Ein klassisches Beispiel sind die sogenannten Tachometersignale zur Markierung eines bestimmten Drehzustandes einer rotierenden Welle. Sie erfüllen die Erfordernisse einer exakten Zeitmarkierung im strengen Sinne. In Bezug auf das vorliegende Signal S14 muss nach einem Kriterium gesucht werden, das genügend genau einen jeweils identischen Zustand des schwingenden Regelelementes anzeigt und daher wie ein Tachometersignal zur Ermittlung physikalisch sinnvoller Mittelfunktionen verwendet werden kann. Der Schwellwert für die Impulsamplitude des Schallpegelsignals, von dem an der vermutete Anschlagvorgang genügend gut ausgeprägt ist, soll im folgenden ermittelt werden. Dazu dient die Zeitintervall-Histogramm-Analyse, die im folgenden zur Ermittlung der Häufigkeit des Zeitabstandes aufeinanderfolgender Schallimpulse verwendet wird.

In Abb. 3.12 sind die Ergebnisse einer solchen Zeitintervall-Histogramm-Analyse für verschiedene Schwellwerte  $\varepsilon$  – in Einheiten der mittleren Schwankungsbreite  $\sigma$  – angegeben. Als Zeitmarke diente dabei das Maximum der Einhüllenden nach Überschreitung des Schwellwertes  $\varepsilon$ . Gemessen wird zunächst der zeitliche Abstand (Zeitintervall) zwischen zwei aufeinanderfolgen Maxima. Der ermittelte Zeitabstand führt zu der Eintragung eines Ereignisses in den zugehörigen Zeitkanal, so dass nach Abschluss der Analyse der Inhalt der Zeitkanäle die Häufigkeit des Auftretens dieses Zeitintervalls angibt. Eine völlig stabile Periodizität würde dann als Eintragung in nur einen einzigen Zeitkanal abgebildet.

Abb. 3.12 zeigt für niedrige Schwellwerte  $\varepsilon$  in der Größe der mittleren Schwankung zwar eine große Anzahl von registrierten Ereignissen, jedoch keine Periode. Erst mit wachsendem

Schwellwert wird die Periodizität immer deutlicher, wobei keineswegs nur die einfache Periode  $\tau$ , sondern auch deren Vielfache ( $2\tau$ ,  $3\tau$  usw.) auftreten.



**Abbildung 3.12**

*Zeitintervallverteilung der Anschläge, die im Beschleunigungssignal von Abb. 3.9 hörbar sind, in Abhängigkeit von der (normierten) Detektionsschwelle  $\varepsilon$ . Die Zeitintervallhistogrammanalyse ermittelt die Zeitspanne zwischen dem der Schwellüberschreitung nachfolgenden Impulsmaximum und dem der nächsten Schwellwertüberschreitung folgenden Maximum und inkrementiert den Inhalt des zugehörigen Zeitkanals.*

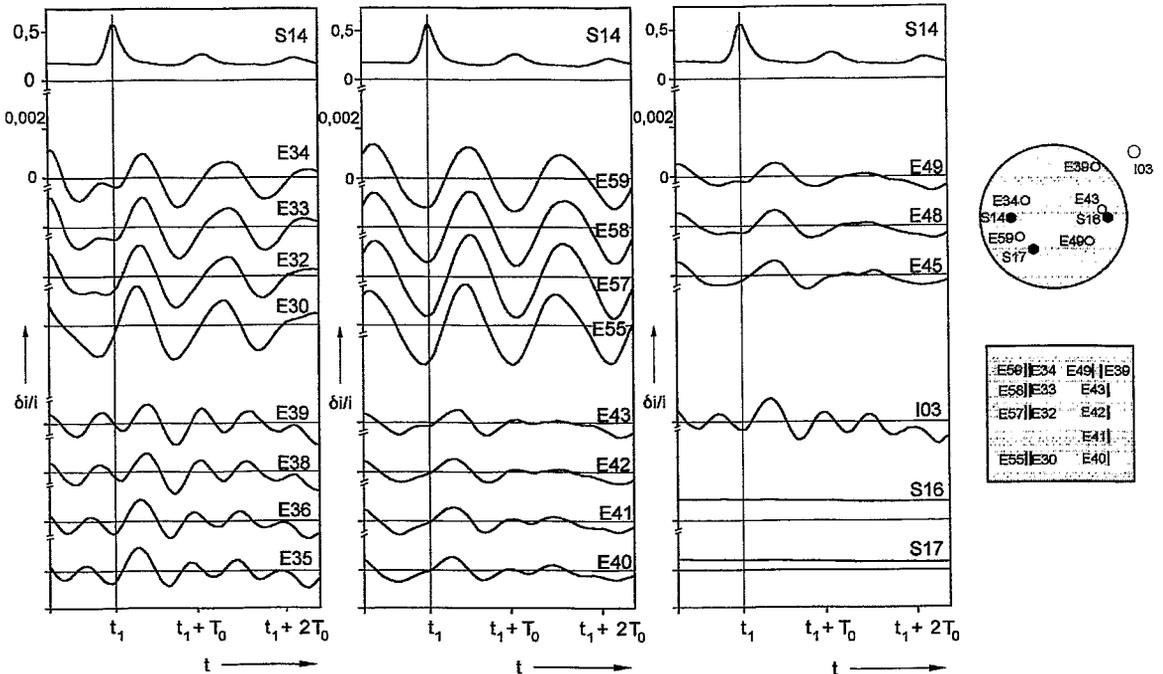
*Die Anzahl der registrierten Ereignisse  $z$  nimmt naturgemäß mit wachsenden Schwellwert  $\varepsilon$  ab. Ein optimaler Schwellwert bezüglich der Detektion periodischer Anschläge ist durch eine ausgeprägte und stabile Periodizität bei möglichst großer Anzahl registrierter Ereignisse gekennzeichnet.*

Abb. 3.12 zeigt, dass eine gute Prozess-Periodizität vorliegt, wenn nur solche Ereignisse betrachtet werden, deren Envelope-Amplitude größer als  $3\sigma$  ist. Somit kann man eine Envelope-Amplitude von  $3\sigma$  als Triggerbedingung einer „ereignisorientierten Messwerterfassung“ benutzen. Es besteht dann begründete Hoffnung, damit stets den etwa gleichen Schwingungszustand - hier Zeitpunkt des Anschlages - markiert zu haben.

Die Messwerterfassung zur Ermittlung der Mittelfunktionen läuft nun so ab, dass die Amplitude des Envelope-Signals kontinuierlich gemessen und mit dem Schwellwert  $3\sigma$  verglichen wird. Gleichzeitig werden alle interessierenden Neutronenfluss-Signale ebenfalls ausgemessen und aufbewahrt. Sobald der Schwellwert überschritten wird, kann die gerade laufende Messung als geeignet bezeichnet werden und wird - einschließlich einer konstanten wählbaren „Vorgeschichte“ - als gültige Realisierung des Prozesses aufbewahrt.

Nach Abschluss der Messwerterfassung werden die einzelnen Realisierungen zu einer Mittelfunktion zusammengefasst, die einen mittleren Prozessablauf repräsentiert. Die Frage, ob dieser mittlere Prozessablauf auch wirklich auftritt oder nur das Ergebnis einer Mittelung über unterschiedliche diskrete Prozessabläufe ist, bedürfte weitergehender Untersuchungen, die hier nicht vorgenommen worden sind. - Natürlich ist die Vorgeschichte sowohl als Ursache des Ereignisses von Interesse als auch bezüglich der Veränderungen infolge des Ereignisses, die sich aus dem Vergleich von Vorgeschichte und Nachfolge ergeben.

Das Ergebnis einer solchen Mittelfunktionsbildung unter Verwendung des Schallpegelsignals S14, das aus  $N = 180$  Schätzungen hervorgegangen ist, zeigt Abb. 3.13.



**Abbildung 3.13**

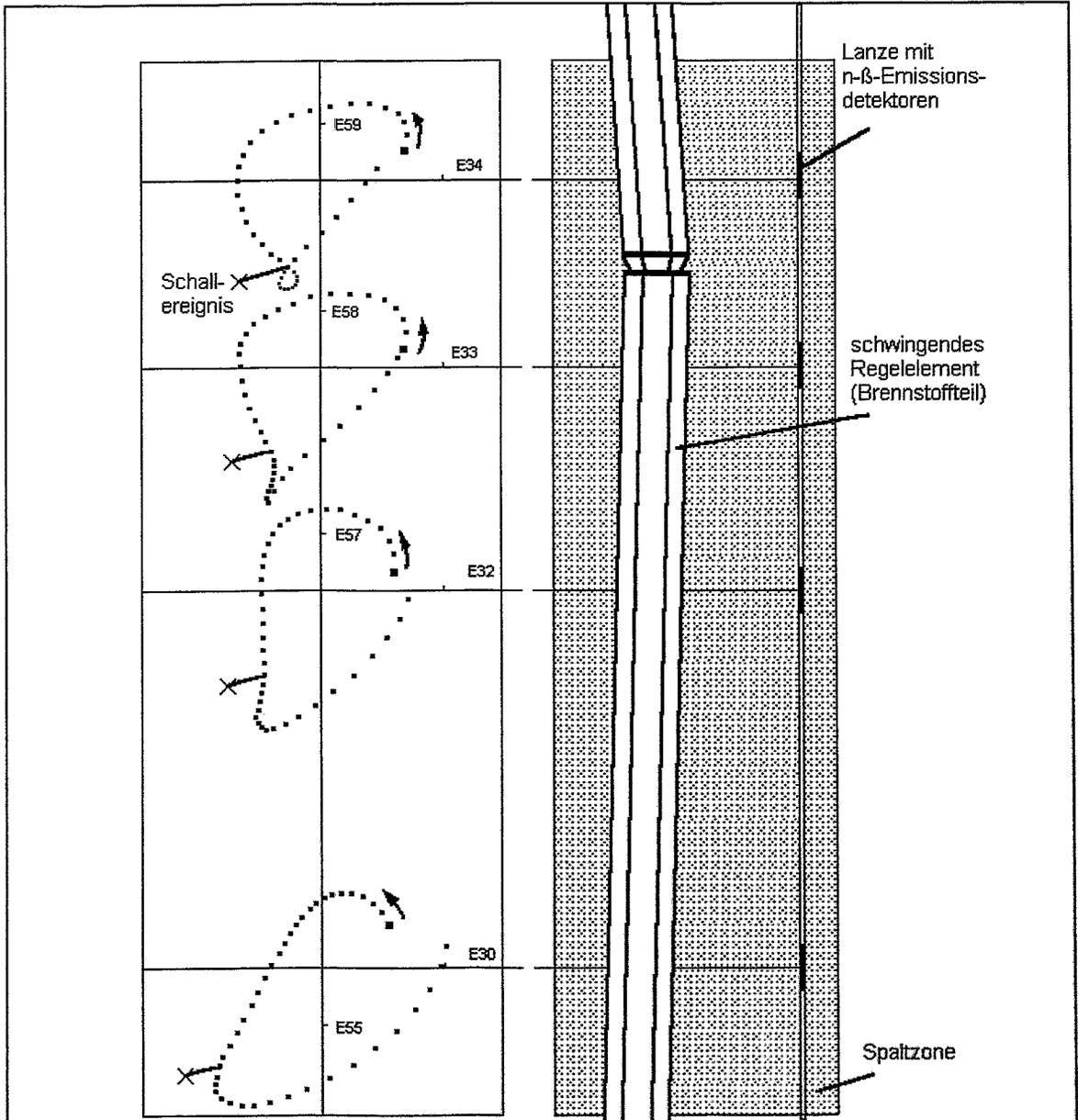
Mittelfunktionen, resultierend aus 180 Schätzungen der ereignisorientiert erfassten Signale. Als Triggersignal diente das Körperschallsignal S14 vom Regelement 12-31. Die mittleren Neutronenfluss-Schwankungen sind signifikant in der unmittelbaren Umgebung des schwingenden Elementes (E30-E34 und E55-E59), aber in größerer Entfernung deutlich kleiner. Die Körperschallsignale von anderen Regelementen zeigen keine Korrelation zum Triggersignal.

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Die Schwingungen der Regelemente sind im Rahmen der statistischen Genauigkeit untereinander unkorreliert. Während das Signal S14 sehr deutlich den mittleren Trigger-signalverlauf und seine Periodizität  $\tau_{14}$  aufzeigt, sind in den Schallpegelsignalen S16 und S17 keinerlei Amplitudenschwankungen und also auch keine Periodizitäten zu erkennen.
2. Die separierten Amplitudenverläufe, die in unmittelbar benachbarten Positionen des Regelementes 12-31 (Detektoren E30...E34 und E55...E59) gemessen werden, sind von gleicher Periodizität wie das Triggersignal S14 und haben deutlich größere Werte als in größerer Entfernung gemessen wird.
3. Die separierten Amplituden, die in weiter entfernten Positionen gemessen werden, haben nur in einem schmalen Zeitbereich um den Triggerzeitpunkt herum gleiche Periodizität wie das Triggersignal.
4. Die mittleren Amplitudenverläufe in weit entfernten Neutronenflussdetektoren (E40...E44 und E45...E49 sowie die dazu benachbarte Ionisationskammer I03) zeigen völlig unterschiedliche Periodizitäten, die offenbar durch die Akkumulation von 180 Schätzungen noch nicht hinreichend unterdrückt worden sind. Wahrscheinlich gibt es in unmittelbarer Nachbarschaft dieser Positionen weitere kräftig schwingende Regelemente mit anderer Schwingfrequenz.
5. Das „Neutronenabbild“ der Schwingung ist in den verschiedenen Höhenpositionen einer Lanze nahezu identisch.
6. Im Zeitabschnitt unmittelbar um den Triggerzeitpunkt herum zeigen die Neutronenfluss-detektoren E32...E34 einen Anteil der Oberharmonischen, der in der obersten Position am

deutlichsten ausgeprägt ist. Darauf wird noch zurückzukommen sein. - Eine solche Oberharmonische tritt auch in den Positionen E43, E48 und E49 auf.

Unter der Annahme einer Proportionalität zwischen realer Auslenkung des Regelelementes und der Amplitude der Neutronenfluss-Schwankung von Abb. 3.13 können diese separierten Mittelfunktionen in den Core-Positionen 09-36 (E30...E34) und 16-33 (E55...E59) dazu verwendet werden, eine hypothetische „Neutronenfluss-Trajektorie“ der zentralen Achse des schwingenden Regelelementes in den vier verschiedenen Höhenpositionen darzustellen, wobei auf rechtwinklige Koordinaten umgerechnet wird.



**Abbildung 3.14**

*Interpretation der Mittelfunktionen der In-core-Neutronenfluss-Schwankungen E30-E34 und E55-E59 von Abbildung 3.13 als Distanzsignale und ihre Darstellung als Trajektorien. In Verbindung mit dem Schallimpuls im Körperschallsignal S14 vollführt die Trajektorie in der obersten Ebene (Höhenposition der Koppelstelle Absorber-Brennstoff) eine schmale Schleife, wie sie für Prellvorgänge typisch ist.*

In Abbildung 3.14 sind solche „Neutronenfluss-Trajektorien“ Zeitpunkt für Zeitpunkt dargestellt, und der Triggerzeitpunkt ist angegeben. Die Höhenposition der einzelnen Detektorpaare ist rechts eingetragen und in Bezug gesetzt zu den Höhenposition des Regelelementes, um darauf hinzuweisen, dass unterschiedliche Neutronen-Abbilder durchaus möglich sein können.

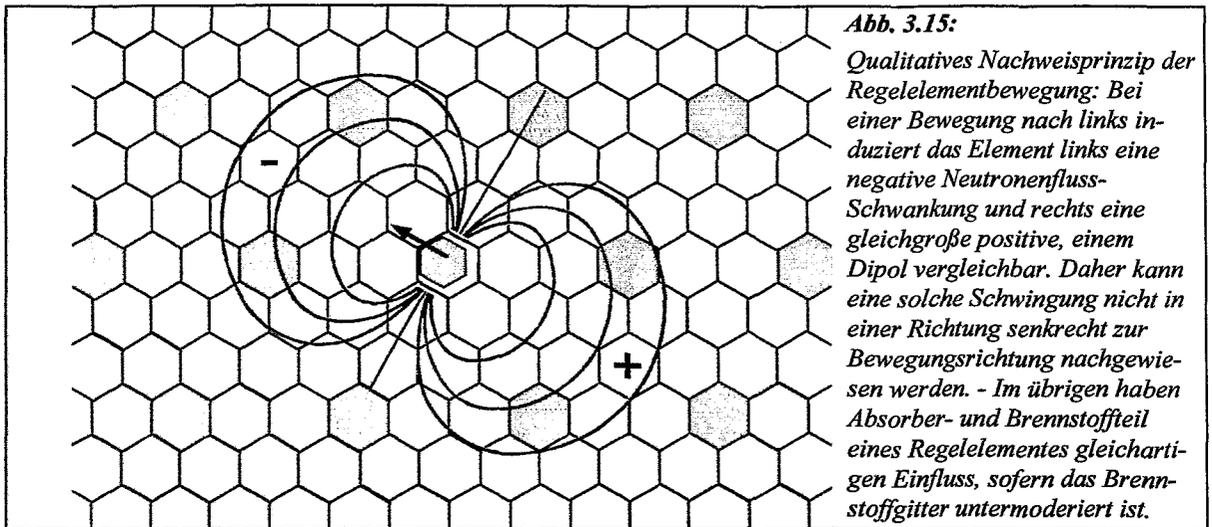
Die Neutronen-Abbilder sind besonders im Zeitabschnitt um den Triggerzeitpunkt herum im Detail unterschiedlich. In der obersten Detektorebene durchläuft die Trajektorie kurz nach dem Anschlag (Triggerzeitpunkt) eine kleine Schleife mit umgekehrten Drehsinn. In der untersten Detektorposition ist davon nichts zu merken. Die Trajektorien in den dazwischenliegenden Ebenen sind offenbar Zwischenzustände dieser beiden Extrema<sup>23</sup>.

Während die Trajektorie in der obersten Position innerhalb einer Periode eine nahezu geschlossene Kurve darstellt, verbleibt in der untersten Ebene eine offene Kurve, an deren Ende die „Geschwindigkeit“ deutlich größer ist (größere zurückgelegte Wegstrecke innerhalb der konstanten Messzeitintervalle). Damit wird möglicherweise ein neuer Anschlag vorbereitet.

Erst einige Jahre später wurde die Übertragungsfunktion eines bewegten Brennelementes mit hexagonalem Querschnitt im hexagonalen Gitter durch COLLATZ [29, 1981], MEYER [30, 1982] und BARTHEL [27, 1982] reaktortheoretisch untersucht.

COLLATZ untersuchte die Übertragung unter Annahme „adiabatischer“ Zustände des in Ruhe befindlichen Regelelementes in Normalposition und in ausgelenktem Zustand in einer in finite Elemente eingeteilten Spaltzone und betrachtete den Unterschied der Neutronenfelder ohne und mit Regelelementverschiebung. Die wichtigsten Ergebnisse waren:

- 1 Der Reaktivitätsbeitrag eines horizontal bewegten Regelelementes ist sehr gering verglichen mit einem deutlich ausgeprägten ortsabhängigen Effekt.
- 2 Der ortsabhängige Effekt wird - vereinfacht gesprochen - durch die variierende Anzahl der absorbierenden Nuklide in der Elementarzelle hervorgerufen: Bei einer Bewegung in radialer Richtung nach rechts wird der Neutronenfluss rechts des Regelelementes geringer und links größer. Verbindet man die Gebiete gleicher Neutronenfluss-Variation, so ergeben sich die Linien eines elektrischen Dipolfeldes wie in Abb. 3.15.



**Abb. 3.15:**

*Qualitatives Nachweisprinzip der Regelelementbewegung: Bei einer Bewegung nach links induziert das Element links eine negative Neutronenfluss-Schwankung und rechts eine gleichgroße positive, einem Dipol vergleichbar. Daher kann eine solche Schwingung nicht in einer Richtung senkrecht zur Bewegungsrichtung nachgewiesen werden. - Im übrigen haben Absorber- und Brennstoffteil eines Regelelementes gleichartigen Einfluss, sofern das Brennstoffgitter untermoderiert ist.*

<sup>23</sup> Auf diesen Gesamtbefund, der im Jahre 1978 mit dem Hinweis auf die Ähnlichkeit zwischen möglicher Auslenkung und „Neutronenfluss-Trajektorie“ veröffentlicht [15, 1978] wurde, reagierte die Fachwelt überrascht und auf Grund fehlender Zusatzinformationen misstrauisch, vgl. Fußnote 3.

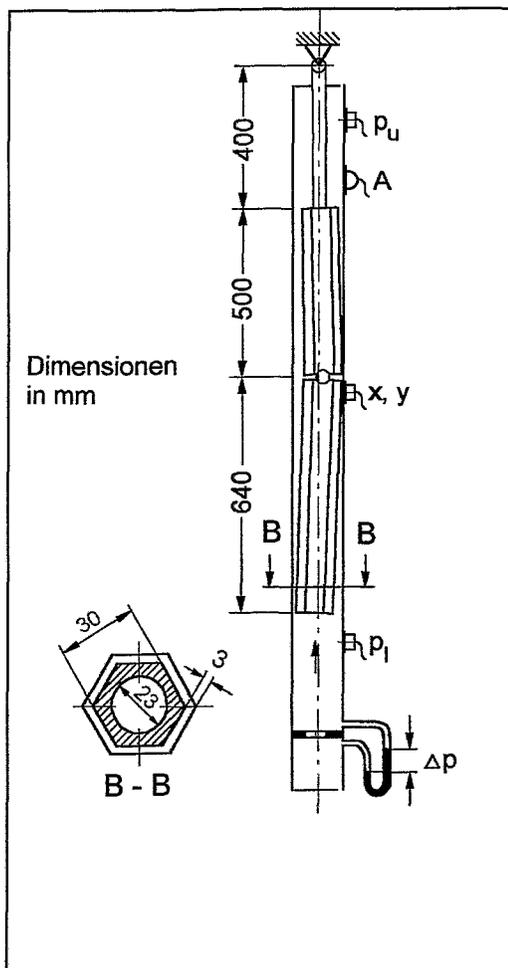
3. Die durch die Regelementbewegung induzierten Neutronenfluss-Schwankungen sind für eine radiale Bewegung deutlich größer als für eine tangentiale.
4. Um eine beliebige Bewegung zu verstehen, müssen die radialen und die tangentialen Schwankungen überlagert werden.
5. Die Einflüsse des Brennstoffteiles und des Absorberteiles sind qualitativ gleich und quantitativ nur wenig unterschiedlich.
6. Eine überschlägige Angabe der Schwingungsamplitude in radialer Richtung ist mit Hilfe der Formel

$$\delta i / i = K * \delta x, \quad K = 0,01 \text{ cm}^{-1} \quad (3.3)$$

möglich.

### 3.5.4 Experimentelle und theoretische Untersuchungen am Modell eines hydraulischen Pendels.

In den 70er Jahren waren physikalische Ursache und antreibende Kraft der Regelementschwingungen völlig unbekannt. Auf Anregung von GRUNWALD<sup>24</sup> wurde 1977 ein einfaches Versuchsmodell - wie in Abb. 3.16 dargestellt - aufgebaut, um das grundsätzliche physikalische Phänomen dieser durchflussinduzierten Schwingungen zu untersuchen.



**Abbildung 3.16**

Schematische Darstellung eines Versuchsstandes für systematische Schwingungsuntersuchungen an Regelementmodellen.

Instrumentierung:

*pu, pl* Druck in oberer und unterer Position,

*x, y* induktive Wegaufnehmer mit Kennlinienkorrektur,

*A* Beschleunigungsaufnehmer

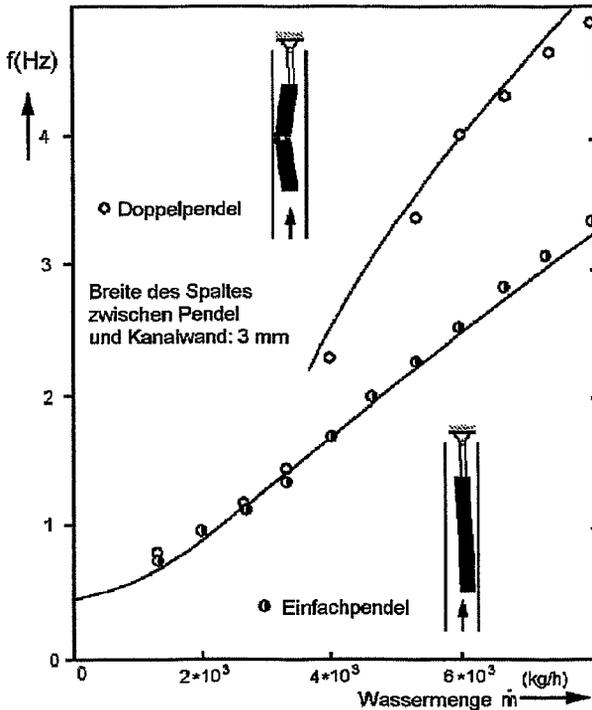
$\Delta p$  Druckdifferenz an der Messblende

Insbesondere sollten Ursachen und Bedingungen der Schwingungen zumindest qualitativ festgestellt werden, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen bezüglich Möglichkeiten zu deren Vermeidung oder zumindest zur Minimierung der Schwingungsamplitude. Das Modell wurde zunächst mit Luft und später auch mit Wasser betrieben und war mit Sensoren für Weg, Druck und Beschleunigung ausgerüstet. Es wurde festgestellt:

1. Die Anordnung nach Abb. 3.16 reagiert wie ein Pendel, das durch die unterschiedliche Durchströmung des inneren und äußeren Kanals angeregt wird.
2. Die Druckdifferenz zwischen innerem ( $\varnothing 23\text{mm}$ ) und äußerem ( $\varnothing 30\text{mm}$ ) Kanal wirkt durch das hydrodynamische Paradoxon als antreibende Kraft.

<sup>24</sup> GRUNWALD hatte zunächst lediglich ein Doppelpendel aus Papier angefertigt und in einer Röhre aus Papier durch Pusten zu Schwingungen angeregt.

3. Bei geringem Durchsatz schwingen Oberteil und Unterteil synchron, die Eigenfrequenz steigt mit dem Durchsatz kontinuierlich an wie in Abb. 3.17 dargestellt.



**Abbildung 3.17**

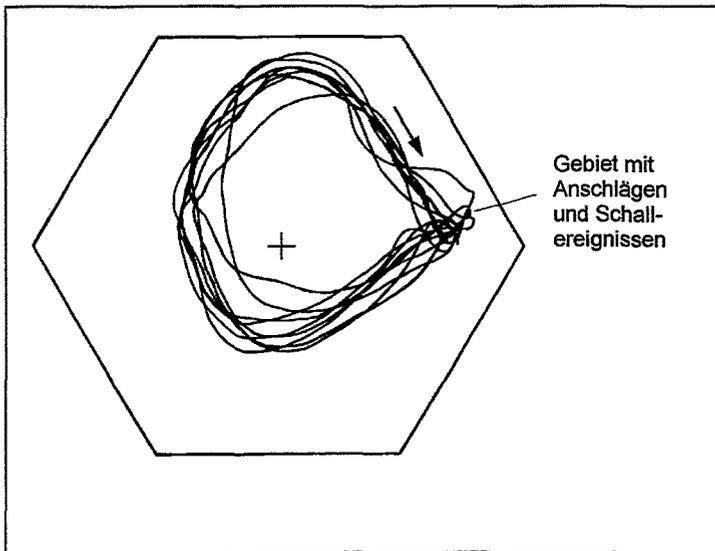
Ergebnisse experimenteller (Punkte) und theoretischer (ausgezogene Kurve) Untersuchungen [31, 1984] der Abhängigkeit der Schwingfrequenz eines hydraulischen Pendels von der Geschwindigkeit des strömenden Mediums (hier Wasser).

4. Bei höherem Durchsatz schwingt die Pendelanordnung wie ein Doppelpendel, Ober- und Unterteil schwingen nur an der Koppelstelle im Gleichtakt, am oberen und unteren Ende aber im Gegentakt. In diesem Fall steigt die Eigenfrequenz mit wachsendem Durchsatz stärker an.
5. Es gibt einen mittleren Bereich, in dem beide Schwingformen möglich sind und einander abwechseln.
6. Eine Verringerung der antreibenden Kraft kann erreicht werden, indem
- durch Lücken zwischen äußerem und innerem Kanal ein Druckausgleich ermöglicht wird und/oder
  - durch eine Leiteinrichtung am Strömungseintritt eine einseitige Anströmung erzeugt wird<sup>25</sup>.
7. Ein detailliertes dreidimensionales mathematisches Modell der Druckverteilung in einem Strömungsfeld, in das ein Hohlkörper eingebracht ist, wurde durch GRUNWALD und Mitarbeiter [32, 1997] realisiert, als die rechentechnischen Möglichkeiten dazu bestanden.

Selbstverständlich wurden am Versuchsmodell auch systematische Untersuchungen [15, 1978] vorgenommen, um die Art der Bewegung des gekoppelten Regelelementes unter Nutzung von Wegaufnehmern, Beschleunigungsaufnehmern und Druckaufnehmern zu untersuchen. Abb. 3.18 zeigt beispielhaft die Trajektorien für mittleren Luftdurchsatz.

Die Bewegung des hydraulischen Pendels verläuft bei sehr geringem Durchsatz ohne jegliche Anschläge. Steigert man den Durchsatz systematisch, so verschiebt sich die Pendelachse allmählich auf eine Seite, und das Pendel gerät in heftigere Schwingungen. Dabei stößt das Pendel auf einer Seite an, wobei ein Schallereignis entsteht. Bei sehr starkem Durchsatz können Anschläge an unterschiedlichen Orten auftreten. Dann ist die Bewegung verständlicherweise jedoch nicht mehr periodisch.

<sup>25</sup> Diese Vorschläge wurden 1977 durch BRINCKMANN dem sowjetischen Hersteller unterbreitet, dort aber sehr bestimmt abgelehnt. - Einige Jahre später sind Brennstoffkassetten mit perforierten Kassettenwänden in den WWER-440-Reaktoren allgemein eingeführt worden, um eine Vermischung und damit eine bessere Kühlung der Spaltzone zu erreichen. Seitdem wurden keine Regelelementschwingungen mehr festgestellt.



**Abbildung 3.18**

Trajektorie der Achse des hydraulischen Pendels nach Kennlinienkorrektur, gemessen mit induktiven Wegaufnehmern bei mittlerem Wasserdurchsatz.

Bei mittlerem Wasserdurchsatz gibt es einen geometrisch stabilen Ort, in dem Anschläge mit nahezu konstanter Pendelfrequenz auftreten.

Es wurden zwei Arten von Mittelfunktionen gebildet: geometrische Mittelfunktionen unter Ver-

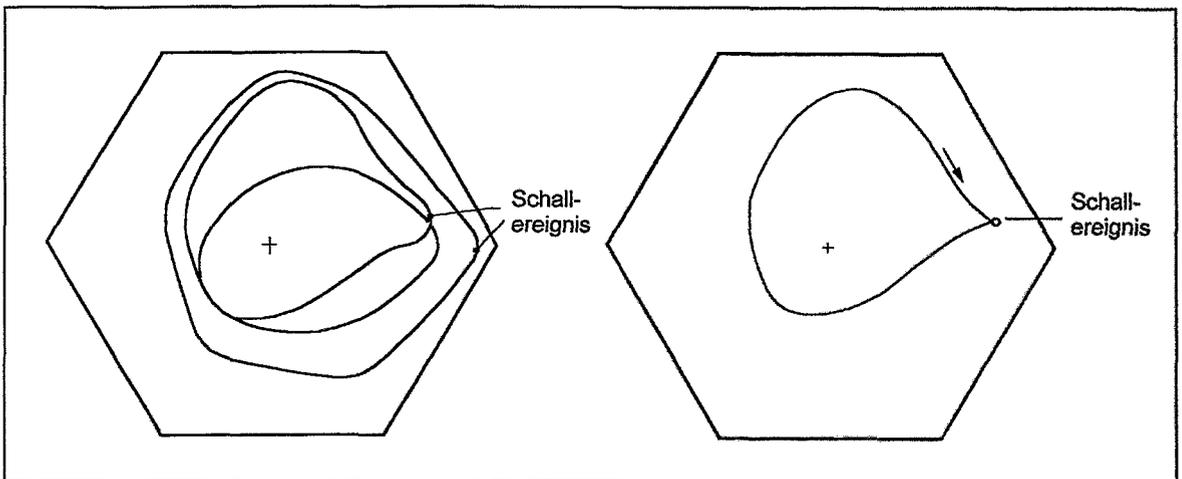
wendung allein der Wegsignale, um die mittlere Auslenkung zum Zeitpunkt des Schallereignisses zu bestimmen:

$$\bar{r}(\varphi) = \left\{ |r(t)| \right\}_{\varphi-\Delta\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \quad (3.4)$$

und die anschlagorientierte Mittelfunktion

$$\bar{r}(t) = \left\{ r(\Theta_i + t) \right\}_0^T \quad (3.5)$$

mit  $\Theta_i$  als Ereigniszeit. Die Ergebnisse beider Prozeduren zeigt Abb. 3.19.



**Abbildung 3.19**

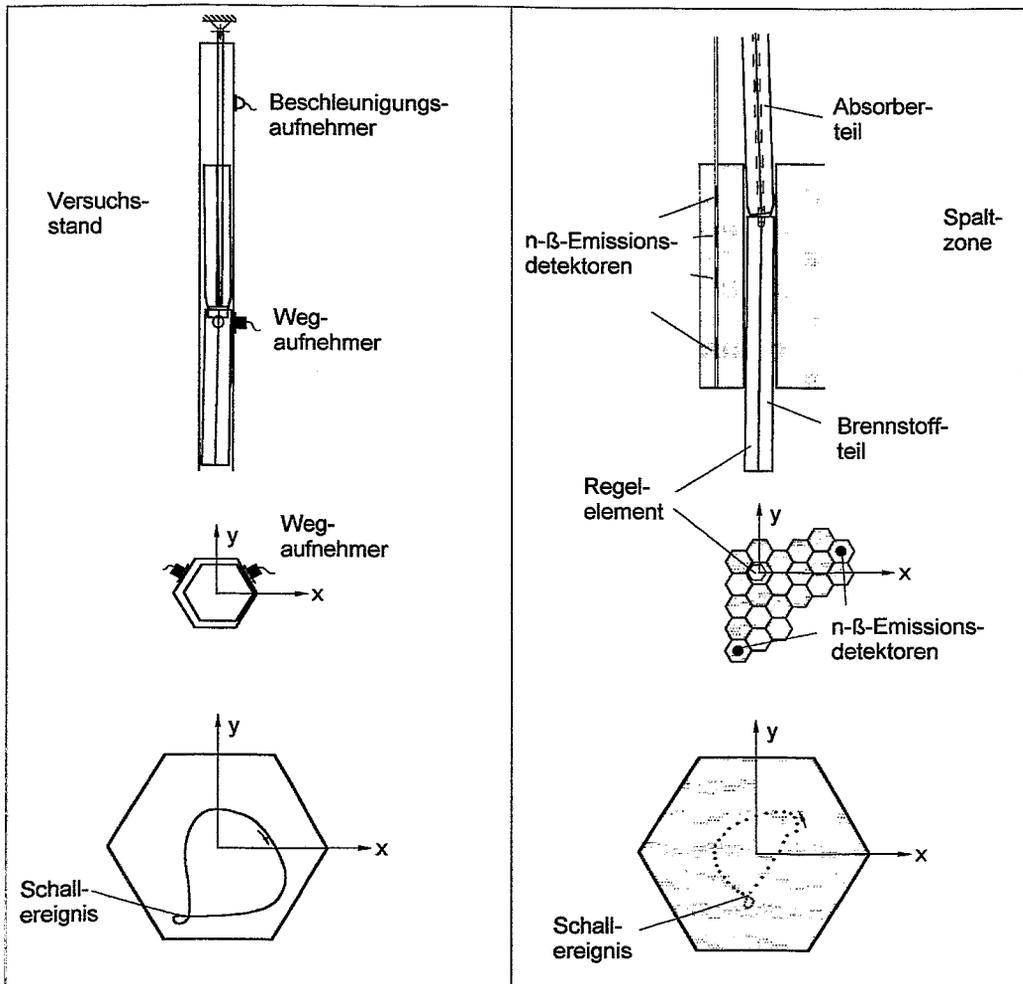
Vergleich der mittleren Trajektorien. Links das Ergebnis der geometrischen Average-Prozedur für geringen, mittleren und hohen Wasserdurchsatz. Bei hohem Durchsatz nähert sich die geometrisch ermittelte Trajektorie einer Hexagon-Struktur.

Rechts die mittlere Trajektorie nach ereignisgetriggertem Averaging. Nur bei dieser Mittelung und nur, wenn die Anschlagregion eng begrenzt ist, ist die in Abbildung 3.18 in Verbindung mit dem Anschlag auftretende Kehrschleife ausgebildet auch in der mittleren Trajektorie zu sehen.

Die geometrisch gebildete Mittelfunktion führt nicht zu einer detaillierten Darstellung des Bewegungsverhaltens während des Anschlagvorganges, weil in der Ebene der Wegaufnehmer der Anschlagwinkel nicht konstant ist. Dagegen bildet die ereignisorientierte Mittelung natür-

lich den Anschlagvorgang deutlich genauer ab. Damit ist gezeigt, dass Anschläge wesentlich besser über das dabei entstehende Schallsignal nachgewiesen werden<sup>26</sup> als durch eine direkte Wegmessung.

Einen sehr eindrucksvollen Vergleich der Resultate, die am KKW-Reaktor und an der Versuchsanordnung im Labor durch ereignisorientierte Mittelfunktionsbildung erzielt worden waren, zeigt zusammenfassend Abb. 3.20. Bis auf den scheinbar verschiedenen Drehsinn sind die mittleren Bahnkurven, die aus Neutronenfluss-Schwankungen und aus direkten Wegmessungen hervorgegangen sind, in beiden Anordnungen überaus ähnlich. Insbesondere ist die kleine Schleife als Folge des Prellvorganges während des Anschlages in beiden Abbildungen deutlich ausgeprägt.



**Abbildung 3.20**

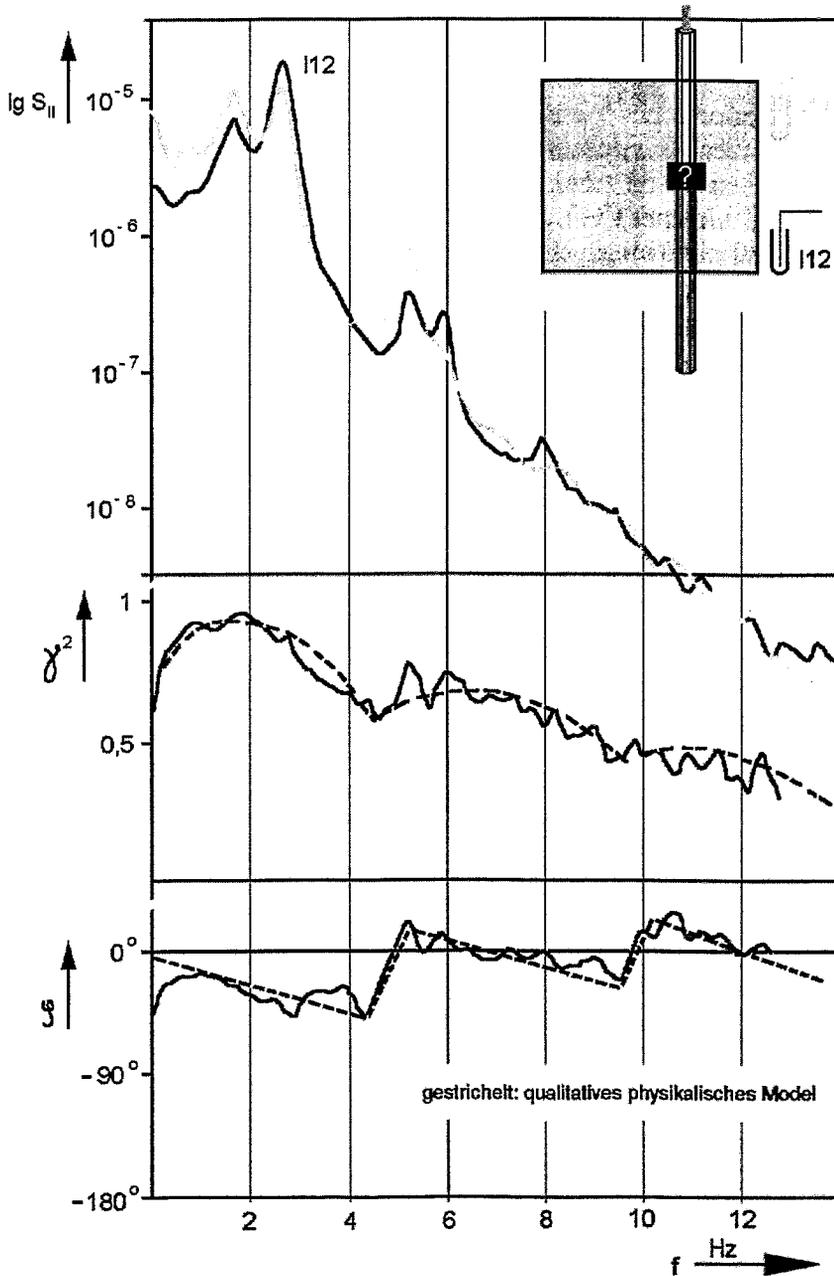
Vergleich der „mittleren Neutronenfluss-Trajektorie“ des schwingenden Regelementes 12-31 im Reaktorblock 2 des Kernkraftwerkes Greifswald (links) mit der am hydraulischen Pendel im Versuchsstand mit Wegaufnehmern gemessenen Trajektorie (rechts).

Die Drehrichtungen sind nur scheinbar verschieden: Die Abbildung vom Reaktor stellt eine Draufsicht dar, der Versuchsstand betrachtet den Vorgang von unten (in Strömungsrichtung).

<sup>26</sup> Auf Grund dieser Erfahrung wurde ein Regelement-Monitor entwickelt, der die Schallebenereignisse von den Schutzrohren der Regelemente in zyklischer Abfrage registriert, an Hand der Eigenschaften des Schallimpulses die Klassifizierung „ungefährlich“ oder „verdächtig“ vornimmt und das Ergebnis für jedes Regelement akkumuliert. Dieser Monitor wurde in den Jahren 1979-1980 im KKW Greifswald durch REINHOLD erfolgreich getestet.

### 3.5.5 Spektralleistung im Störungszustand vor der Abschaltung

Wie bereits im Abschnitt 3.2 angedeutet wurden am Tage vor der störungsbedingten Abschaltung des Blockes 2 Rauschmessungen durchgeführt. Es standen dazu jedoch leider nur Ex-core-Ionisationskammersignale zur Verfügung, da die Rauschdiagnosesysteme RAS zu diesem Zeitpunkt noch nicht existierten. Daher war eine umfassende Diagnose nicht möglich gewesen. Die Kreuz-Spektralleistung der Neutronenfluss-Schwankungen zweier in verschiedener Höhenposition in benachbarten Kanälen angeordneten Messwertgebern sind in Abb. 3.21 wiedergegeben.



**Abbildung 3.21**

Normierte Auto-spektralleistung, Kohärenz- und Phasenfunktion der Neutronenfluss-Schwankungen der benachbarten Ex-core-Ionisationskammern 111 (oben) und 112 (unten) in Höhe oberer und unterer Spaltzonenkante während des gestörten Betriebes am 27.03.1975. Diese Messinformationen reichen nicht aus, um den Bewegungsvorgang z.B. eines in Absorberteil und Brennstoffteil aufgetrennten Regелеlementes aufzuklären.

Das Ergebnis dieser Messungen kann wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Autospektralleistungen in oberer und unterer Position sind überaus ähnlich. Die Kohärenzfunktion ist bis zu 12 Hz signifikant, so dass die Phasenfunktion bis zu diesem Frequenzwert statistisch gesichert ist<sup>27</sup>.
2. Zwei Paare von Grund- und Oberharmonischen sind deutlich ausgeprägt: 1,7 Hz und 5,1 Hz sowie 2,9 Hz und 5,8 Hz.
3. Die Amplitude bei 2,8 Hz ist etwa 4 Mal größer als nach der Reparatur in Abb. 3.22.
4. Die Amplituden von Grund- und Oberharmonischen sind in oberer und unterer Position unterschiedlich. Es ist daher anzunehmen, dass sich die Schwingungsformen oben und unten unterscheiden. Sie lassen sich jedoch an Hand der Autospektralleistung nicht identifizieren.
5. Die Kohärenzfunktion zeigt periodisches Verhalten in Form der sog. „Sinkfrequenzen“ und klingt zu höheren Frequenzen hin systematisch ab. Eine solche Periodizität in Verbindung mit einer gleichermaßen periodischen Phasenfunktion wurde durch WACH und KOZALY [34, 1974] allgemein mit einer Überlagerung des Transporteffektes von neutronenabsorbierendem Material mit dem zugehörigen Reaktivitätseffekt erklärt.
6. Aus der beobachteten Sinkfrequenz bei 4,6 Hz und der effektiven Höhe der Spaltzone von 2,5 m ergibt sich eine Transportgeschwindigkeit von etwa 11 m/s, was etwa der Kühlmittelgeschwindigkeit in der Spaltzone entspricht.

Die spätere Inspektion hatte - wie schon berichtet - gezeigt, dass neben den Beschädigungen der Kassettenwand in den Positionen 12-31 und 12-43 (Abb. 3.3 a, b) auch Brennstoff- und Absorberteil dieser Regelelemente getrennt waren. Die Trennung beider Teile kann jedoch auch nach heutigem Wissen nicht zuverlässig aus den Ergebnissen von Abb. 3.21 abgeleitet werden. Eine separate Bewegung beider Teile ist auf Grund der Auftriebskräfte physikalisch durchaus möglich. REICHE [35, 1975] hat unter der Annahme einer Trennung beider Teile aus den Spektralleistungsamplituden von Abb. 3.21 eine Bewegungsamplitude von 5-10 mm abgeschätzt, wobei für die Gewichtsfunktion der Wert für eine mittlere Höhenposition verwendet wurde<sup>28</sup>.

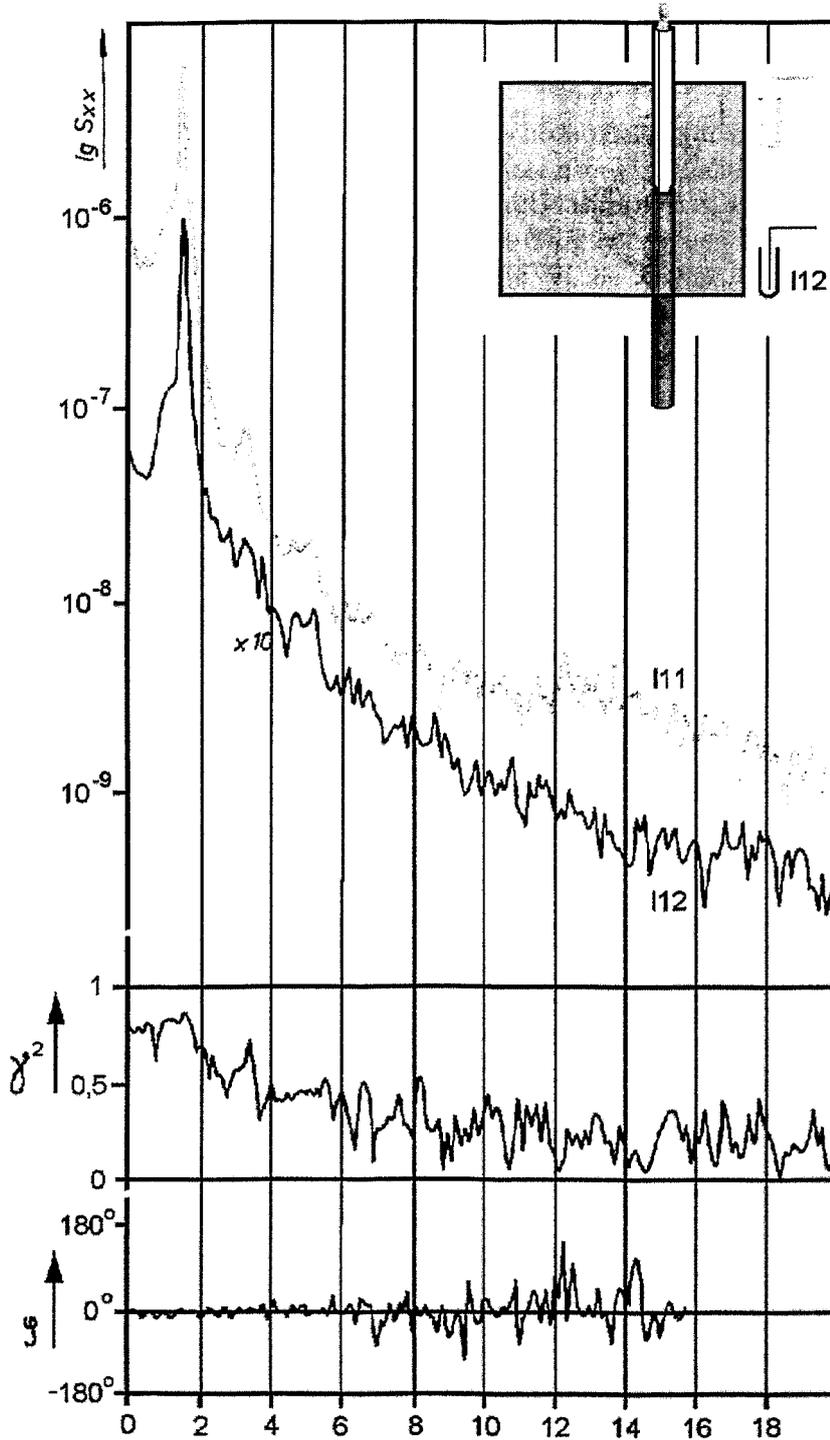
Abb. 3.22 zeigt völlig veränderte Verhältnisse der Spektralleistung nach der Rekonstruktion: Obwohl die Resonanzfrequenzen im niederfrequenten Gebiet weiterhin deutlich ausgeprägt sind, sind die Sinkfrequenzen weder in der Kohärenzfunktion noch in der Phasenfunktion erkennbar. Auch fällt die Phasenfunktion nicht mehr mit steigender Frequenz, sondern schwankt um Null. Zudem sind Oberharmonische, die sicher mit Anschlagvorgängen in Verbindung stehen, kaum noch erkennbar.

Abb. 3.21 und 3.22 zeigen aber auch in Verbindung mit späteren Untersuchungen, dass die Regelelementschwingungen in den Neutronenfluss-Schwankungen so stark dominieren, dass davon sowohl die Eigenfrequenzen des Druckgefäßes als auch des Reaktorkorbes völlig überlagert werden und aus dem Untergrund nicht auflösbar sind. Die Resonanzpeaks der Druckgefäßschwingung und der normalen Reaktorkorbschwingung wurden erst 1986 identifiziert, nachdem die Regelelementschwingungen durch den Einsatz von perforierten Brennstoffkassetten und Einbau von strömungslenkenden Platten in der Dämpferregion nicht mehr aufgetreten sind und auch die anomalen Reaktorkorbschwingungen<sup>29</sup> durch den Einsatz neuer Federrohre beseitigt worden waren.

<sup>27</sup> Zur statistischen Genauigkeit der Kohärenzfunktion siehe [33, 1993].

<sup>28</sup> Schleifspuren an den Kassetten und die Löcher in den Kassettenwänden von Abb. 3.3a und 3.3b erreichen Werte bis zu 12 mm.

<sup>29</sup> Siehe Kapitel 4.



**Abbildung 3.22**  
 Normierte Auto-  
 spektralleistung,  
 Kohärenz- und  
 Phasenfunktion der  
 Neutronenfluss-  
 Schwankungen der  
 benachbarten Ex-  
 core-Ionisations-  
 kammern I11  
 (oben) und I12 (un-  
 ten) in Höhe oberer  
 und unterer Spalt-  
 zonenkante nach  
 der Reparatur.

Obwohl die Reso-  
 nanzstruktur mit  
 nur geringfügig  
 geminderter Am-  
 plitude erscheint,  
 liefern Kohärenz-  
 und Phasenfunktion  
 keinen Hinweis auf  
 eine Überlagerung  
 von globalem  
 Reaktivitätseffekt  
 und Transport-  
 effekt.

## 4. Detaillierter Bericht über anomale Reaktorkorbschwingungen<sup>30</sup>

### 4.1 Allgemeine Beschreibung, betroffene Standorte, Schadensberichte

Auf dem Gebiet der Reaktorkorbschwingungen haben die Berichte von FRY u.a. [36, 1974] und BASTL u.a. [37, 1974] den Startschuss gegeben viele theoretische und experimentellen Untersuchungen. Am Reaktor des KKW Palisades, USA, hatten anomale Reaktorkorbschwingungen im Jahr 1972 große Beschädigungen der RDB-Einbauten hervorgerufen. So waren auch die internen Berichte von FRY u. a [z.B. 38, 1973] an die US Atomic Energy Commission gegangen und sind nicht verfügbar.

Ein zweites Mal wurde über anomale Reaktorkorbschwingungen durch die Rossendorfer Bearbeiter berichtet [39, 1988]. Am Reaktorblock 2 des Greifswalder Kernkraftwerkes (WWER-440/230-Reaktor sowjetischer Produktion) waren durch anomale Korbschwingungen wiederum große Beschädigungen aufgetreten. Auf Grund des allgemeinen Fortschrittes auf dem Gebiet der Reaktor-Rauschanalyse, der zugehörigen speziellen Instrumentierung und der vorliegenden Erfahrungen konnte an diesem Block eine größere Anzahl weiterführender Untersuchungen durchgeführt werden, um das Phänomen im Detail zu verstehen, Schlüsse zu ziehen auf mögliche Beschädigungen, Werkzeuge und Messgeräte für die Inspektion vorzubereiten, um schließlich die Prognosen mit den Inspektionsresultaten zu vergleichen und somit die Treffsicherheit der Rauschdiagnostik zu prüfen. Im Abschnitt 4.5 wird eine detaillierte Beschreibung der Resultate dieser Untersuchungen gegeben.

Der Betreiber hatte 1987 Informationen über die aufgetretenen Störungen in das „Advanced Incident Reporting System“ der IAEA unter der Registriernummer 000 60 81 [40, 1987] eingespeist. Dieser Störungsbericht vermittelt jedoch nur einen groben Eindruck über das Ereignis, enthält den Hinweis auf möglicherweise eingeschränkte Beweglichkeit der Regelelemente als Folge des verschobenen Korbes, verschweigt aber sowohl die Ursachen als auch mögliche Auswirkungen des anschlagenden Korbes auf die Integrität des Druckbehälters. Er verschweigt auch die notwendig gewordenen Reparaturen an den Reaktoreinbauten.

Offizielle Hinweise oder Berichte über die anomalen Reaktorkorbschwingungen an anderen KKW mit WWER-440-Reaktoren sind nicht bekannt.

Die Bearbeiter haben aber auf persönlicher Ebene schon 1986 von den sowjetischen Fachleuten von einer ähnlichen Störung an einem Block des KKW Kola (UdSSR) gehört, bei der ein Führungskeil im unteren Teil des RDB abgebrochen war, was zur Beschädigung der platierten Oberfläche des RDB durch dieses lose Teil geführt und große Probleme bezüglich der Reparatur bereitet hatte.

### 4.2 Gestörtes Anlagenverhalten und betriebliche Maßnahmen

Um die normalen und die anomalen Reaktorkorbschwingungen zu verstehen, müssen die folgende Konstruktionsdetails erläutert werden.

Der Reaktorkorb ist ein Hohlzylinder wie in Abb. 4.1 dargestellt, der im Innern des Druckgefäßes hängt und den Kernbehälter mit den Brennelementen trägt. Der Wasserstrahl, der senkrecht auf den Korb prallt, regt die Schwingungen an.

<sup>30</sup> Zutreffender ist die Bezeichnung Reaktorkorbbewegungen, denn diese Bewegungsform ist mehr durch die stattfindenden Stoßprozesse als durch Eigenfrequenzen gekennzeichnet.

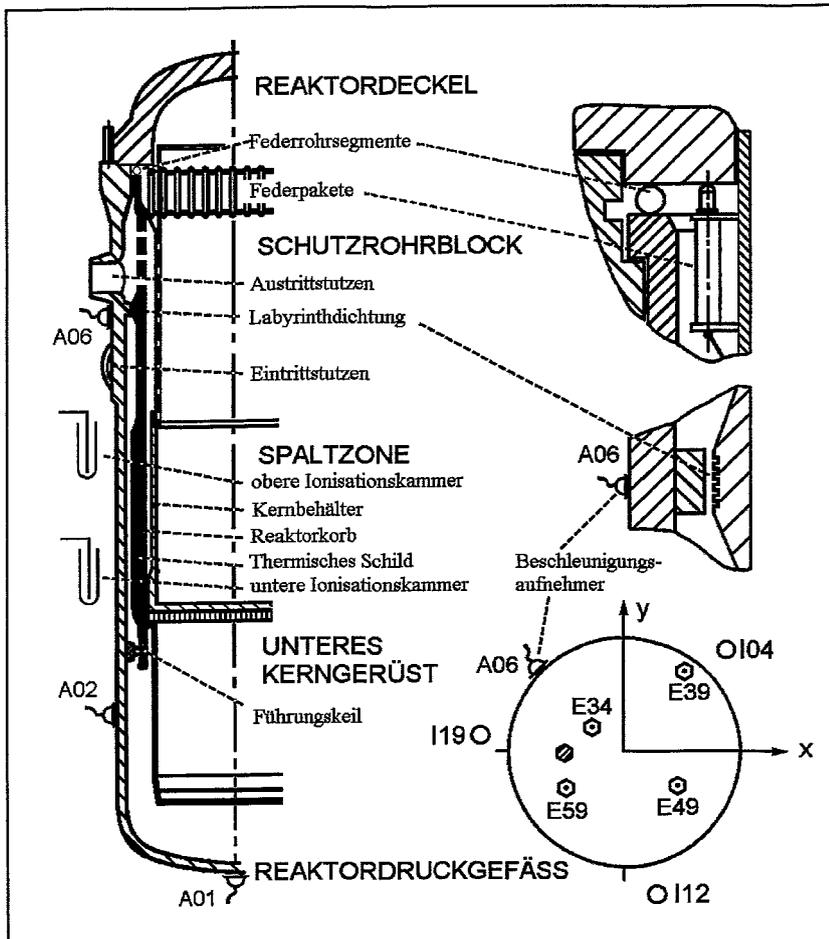


Abbildung 4.1

Schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus des WWER-440-Reaktors einschließlich der wesentlichsten Einbauten und einige der im Kernkraftwerk Greifswald am Block 2 zum Teil nachträglich installierten Messwertgeber:

- A - Beschleunigungsaufnehmer
- I - Ionisationskammern (ex-core)
- E -  $n$ - $\beta$ -Emissionsdetektoren (in-core)

Normale Korbschwingungen mit Amplituden bis zu einigen zehn Mikrometern treten auf, wenn der Korb durch die niederhaltenden Federrohrsegmente oben sowie Führungskeile und zugehörige Nute unten fixiert ist. Bei dieser Schwingform existieren definierte und stabile Federkonstanten und Eigenfrequenzen. Anomale Korbschwingungen treten auf, wenn die Federrohrsegmente ermüdet sind, so dass deren Federkraft um Größenordnungen geringer ist<sup>31</sup>. Die zugehörige Schwingfrequenz verschiebt sich dann zu so geringen Werten, dass eine Erfassung mit Beschleunigungsaufnehmern – wie sie üblicherweise zum Nachweis von Reaktorkorbschwingungen verwendet werden – nicht mehr möglich ist. Sie können dann nur noch mittels Absolutwegaufnehmern oder indirekt über ihre Auswirkungen auf die Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen wahrgenommen werden. – Bei dieser Schwingform kann sich der gesamte Korb seitlich verschieben, so dass sich auch die Federkräfte ändern und eine zufällig wirkende Bewegung entsteht.

Schon FRY u. a. [36, 1973] haben das allgemeine Verhaltensmuster der anomalen Korbschwingungen beschrieben, das durch sehr niederfrequente stochastische Neutronenflussschwankungen in Ex-core-Positionen mit einer relativen Amplitude  $\delta i/i > 1\%$  charakterisiert ist, zusammen mit der wichtigen Tatsache, dass diese Schwankungen in gegenüberliegenden Messpositionen gleich groß mit entgegengesetztem Vorzeichen sind. Die Erklärung dazu wird in Abb. 4.6 im Abschnitt 4.5.1 gegeben. Aus dieser Beobachtung haben FRY und Mitarbeiter die Hypothese abgeleitet, dass solche Schwankungen durch erhebliche Bewegungen der gesamten Spaltzone hervorgerufen werden. Wegen der ganz ähnlichen Konstruktion aller Druckwasserreaktoren kann diese Hypothese auch auf die WWER-Reaktoren übertragen werden.

<sup>31</sup> Das war bereits 1972 von FRY [36] und Mitarbeitern festgestellt worden.

Am Block 2 des KKW Greifswald wurde dieser Effekt gefunden, und die Reaktionen des Betreibers sollen hier aus Gründen der Erfahrungsweitergabe drücklich erwähnt werden. Dazu muss zunächst erwähnt werden, dass

- für die Überwachung der Regelementbewegungen Rauschdiagnostiksysteme (RAS) [13, 1977] an den Blöcken 1 und 2 (1975) und an den Blöcken 3 und 4 (1978/79) installiert worden waren,
- die Amplitude der Regelementbewegungen durch konstruktive Maßnahmen (1975 und 1980) verringert worden sind,
- sich deshalb in den 80er Jahren der Zustand der Beschleunigungsmesstechnik der RAS kontinuierlich verschlechtert hat, ohne dass eine Instandsetzung vorgenommen wurde,
- durch eine Anweisung des (ostdeutschen) Staatlichen Amtes für Atomsicherheit und Strahlenschutz die Ionisationskammern des RAS den Status einer heißen Reserve bekommen haben und 1982 aus dem Messsystem ausgegliedert worden sind,
- die empfohlenen periodischen Messungen des Neutronenfluss-Rauschens seit 1983 nicht mehr durchgeführt worden sind.

Nach der Umladung des Blockes 2 im Frühherbst 1985 stellte der Betreiber bei Volleistung stark ausgeprägte Schwankungen in den Ex-core-Ionisationskammersignalen fest. Die Amplituden erreichten einige Prozent, so dass die automatische Leistungsregelung instabil arbeitete.

- Unter der Annahme einer Störung im Ionisationskammer-Messsystem (insbesondere des Erdungssystems) suchte der Betreiber vergeblich nach einem Fehler.
- Dem Ratschlag der sowjetischen Berater im KKW, die unliebsamen Schwankungen elektronisch auszublenden (durch Verwendung eines extrem niederfrequenten Tiefpassfilters) hat der misstrauisch gewordene Betreiber nicht Folge geleistet.
- Eine Überprüfung der allgemeinen Funktionsweise der betrieblichen Ionisationskammern durch Variation der Neutronenflussverteilung (Schieflast) ergab eine ordnungsgemäße Arbeitsweise der Ionisationskammern.

Im Oktober 1985 wurden schließlich die Bearbeiter (Mitarbeiter der Abteilung Reaktordiagnostik im Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf) informiert und mit der Aufklärung der Ursachen beauftragt. In einer solchen Situation<sup>32</sup> hat der Betreiber die uneingeschränkte Benutzung aller betrieblichen Neutronenfluss-Messkanäle gestattet, so dass schon nach wenigen Wochen die Diagnose „anomale Reaktorkorbbewegungen“ als Tatsache feststand. Gleichzeitig haben Betreiber und Bearbeiter Maßnahmen zur Instandsetzung der RAS eingeleitet. Im November hat der Betreiber das Allunionsinstitut für ausländische Atomkraftwerke in Moskau (Sojusglawzagratomenergo, „Sojus 24“ genannt wegen der auch im Russischen ungewöhnlich langen Folge von 24 Buchstaben in der Abkürzung) konsultiert, um vor dem Winter das Problem zu beraten und ggf. betriebliche Maßnahmen vorzubereiten. Nach einer Darstellung der rauschdiagnostischen Untersuchungsergebnisse durch die deutsche Seite gaben die sowjetischen Fachleute die Empfehlung, den Voll-Leistungsbetrieb fortzusetzen, sofern eine kontinuierliche Überwachung der mittleren Schwankungsamplitude durchgeführt wird und zum Ergebnis führt, dass diese konstant bleibt. Die Experten stimmten ausdrücklich der vorgesehenen Instandsetzung des RAS und der darauf aufbauenden umfangreichen Untersuchungen zu und erbat sich die Ergebnisse. Sie empfahlen für die nächste Umladung eine Generalinspektion aller Druckbehältereinbauten und eine frühzeitige Vorbereitung der Inspektionsmethoden, Messinstrumente und Fernbedienungseinheiten.

<sup>32</sup> Im Winterhalbjahr war die Energiesituation stets auf das äußerste angespannt.

Der Betreiber hat diese Empfehlungen strikt befolgt, hat ein sehr einfaches Überwachungsverfahren auf der Basis einer kontinuierlichen Registrierung der Schwankungsleistung der Ionisationskammersignale eingeführt und hat den Block 2 bis zum geplanten Kampagnenende im März 1986 weiterbetrieben, obwohl in der Folge verdächtige transiente Ereignisse am Druckbehälter gemessen worden waren, s. Abschnitt 4.5.8.

Im Dezember 1985 wurde das RAS gewartet und n- $\beta$ -Emissionsdetektoren in In-core-Positionen sowie Beschleunigungsaufnehmer am RDB (A01, A02, A06 in Abb. 4.20) ergänzt in der Hoffnung, detailliertere Informationen über den Bewegungsablauf und mögliche Beschädigungen zu erhalten, um Reparaturen vorzubereiten. Tatsächlich wurden einige Inspektions- und Reparaturverfahren durch den Betreiber vorbereitet, kleine Werkzeuge entwickelt, und Ersatzteile hergestellt.

### 4.3 Inspektionsergebnisse nach der Störung am Block 2 des KKW Greifswald

Folgende Informationen gibt der Reparaturbericht der Generalinspektion 1986:

1. *Obere Federrohrsegmente: Zwischen der Oberfläche der Federrohrsegmente und dem Flansch wurde eine Lücke von 1,8 mm bei einem maximal tolerierbaren Wert von 0,5 mm gemessen. Damit hatten die Federrohrsegmente ihr Wirksamkeit verloren. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich die Position des Reaktorkorbes durch Materialabtragung zwischen Flansch und seiner Auflage um 1,2 mm verschoben hat<sup>33</sup>.*
2. *Federpakete im Federrohrblock: Es wurde keine Abweichung in der Position der Federpakete gefunden. Die Federkräfte entsprachen den normativen Werten, mit Ausnahme des Elementes 16 (Normwert 605 kp, realer Wert 577 kp).*
3. *Zentrierbohrungen am Kernbehälter: Die Zentrierbohrungen, die mit Hilfe eines Gusskörpers geprüft wurden, zeigten keine Abweichung vom Sollwert. Somit hatte sich der Kernbehälter weder horizontal noch vertikal oder zirkular bewegt, und die beobachtete Bewegung war eine reine Reaktorkorbbewegung.*
4. *Führungsnute im unteren Teil des Reaktorkorbes: Laut technischer Beschreibung hat die Führungsnut eine Breite von 80 mm. Mittels Videokamera, direkter Messung und Prüfkörpern wurde eine Verbreiterung von 15 – 18 mm auf der linken Seite, von außerhalb des Strahlenschutzcontainers mit der Kameraoptik gesehen, vorgefunden.*



**Abbildung 4.2**

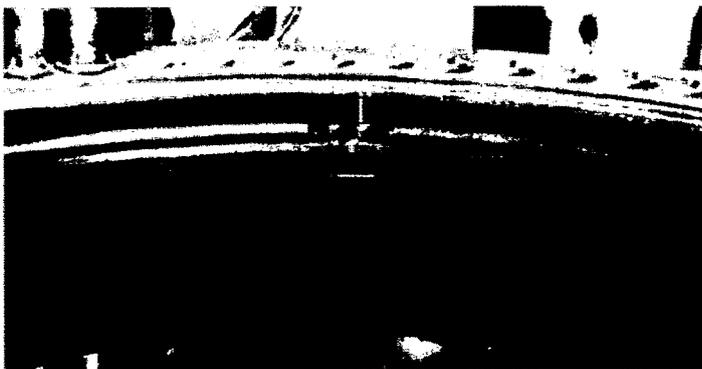
*Die Beschädigung des Zentrierkeils Nr. 6 und der Nute durch Materialabtragung kann durch Anschläge während der anomalen Reaktorkorbbewegung zustande kommen. Bei positiver Drehrichtung des Reaktorkorbes schlägt die rechte Nute des Korbes an die linke Seite des Führungskeils an, der mit seiner federnden Halterung einen Teil des Kraftstoßes aufnimmt und an den Druckbehälter überträgt. Die Abtragung infolge Stoßbelastung erreichte an diesem Zentrierkeil bis zu 7 mm. Die maximal gefundene Abtragung betrug 9 mm am Keil Nr. 5.*

<sup>33</sup> Diese Materialabtragung wurde bei der nachfolgenden Reparatur nicht ersetzt.

5. *Führungskeile im unteren Teil des RDB, den Nuten zugehörig: Ebenfalls mit Videokamera, direkter Messung und Prüfkörpern wurde der Zustand der Führungskeile inspiziert. Auch hier wurde eine Materialabtragung von 15 – 18 mm vorgefunden, siehe Abb. 4.2.*
6. *Befestigung des Reaktorkorbodens: Eine visuelle Inspektion der Zentralbohrungen und Fixiersegmente der Befestigung mit Hilfe einer Unter-Wasser-Kamera ergab keinerlei Hinweis auf irgendeine Beschädigung und auch keinerlei Spuren an den Schweißnäthen.*
7. *Regelelementantriebe: Die Regelelementantriebe hatten sich schwarz verfärbt. Es muss später untersucht werden, ob diese Verfärbung von einer leckenden Dichtung oder aus Ablagerungen von Molybdänsulfid herrührt. Die Antriebe wurden durch neue ersetzt.*
8. *Weitere Begutachtung der Regelelemente: Bei Ausbau und Umladung wurden begutachtet:*
  - *Die Verriegelungsmechanik der Antriebe und der Regelelemente,*
  - *die Zwischenstangen, Brennelemente (nur Stichproben) und Brennstoffteile der Regelelemente,*
  - *die Oberfläche der Kühlkanäle der Regelelemente.**Bei der visuellen Inspektion konnten keine schwingungsbedingten Beschädigungen gefunden werden.*
9. *Befund in der Region der Labyrinthdichtung des RDB: Die kreisförmige Dichtung wurde wie bei jeder Inspektion begutachtet. Vorgefundene Korrosionsspuren beschränken sich auf die Dichtung und haben keinen Einfluss auf die Integrität des Druckbehälters. Eine Ausweitung kann auf Grund der chemischen Passivität nicht erwartet werden. Es wurde entschieden, die Labyrinthdichtung wie vorgefunden zu belassen und eine erneute Bewertung bei der nächsten Inspektion vorzunehmen. Abdrücke wurden für späteren Vergleich angefertigt.*

Ein Vertreter der Abteilung Rauschdiagnostik hat an der Inspektion teilgenommen und vervollständigt den Befund folgendermaßen:

10. *Verdrehung des Reaktorkorbes: Der gesamte Reaktorkorb war gegenüber dem Normalzustand verdreht, besonders deutlich ( $\approx 2,8$  cm) bezüglich der Achse III, hier Y-Achse in Abb. 4.1. Sofern sich diese Verdrehung vergrößert, kann die Beweglichkeit der Regelelemente beeinträchtigt werden.*



**Abbildung 4.3**

*Die Achse IV des Reaktorkorbes (y-Achse in Abb. 4.1) war auf Grund der positiven Drehrichtung und der Abtragung an den Zentrierkeilen um 28 mm in positiver Richtung verdreht, wie hier durch eine weiße Markierung angedeutet. Ein Fortschreiten der Verdrehung hätte eine partielle Verklemmung eines Elementes der äußeren Gruppen der Abschaltenelemente zur Folge haben können.*

11. *Die oberen Federrohrsegmente waren deformiert und glänzend gehämmert.*
12. *Die Oberfläche der Labyrinthdichtung war gleichfalls glänzend gehämmert in der Umgebung von  $+30^\circ$  relativ zur x-Achse, offensichtlich durch Anschlagereignisse, siehe Abb. 4.5.*



**Abbildung 4.4**

Die Federrohrsegmente (hier Segment Nr. 4) zur Arretierung des Reaktorkorbes unter dem Deckel und auch die Köpfe der Federpakete zur Arretierung der Spaltzone waren blank gehämmert und leicht abgeplattet. Dadurch konnte sich der Reaktorkorb auf seiner Auflagefläche verschieben. Wie noch gezeigt wird, kam es bei den Anschlägen des Korbes an die Führungskeile zu solchen Verschiebungen. Die Auflagefläche des Korbes im RDB war einseitig um einige Millimeter abgearbeitet.



**Abbildung 4.5**

Die Oberfläche der Labyrinthdichtung zwischen Reaktorkorb und Druckgefäß war einseitig blank gehämmert. Diese Beschädigung weist darauf hin, dass sich in Verbindung mit heftigen Anschlägen an die Führungskeile der gesamte Reaktorkorb verschoben hat, wobei die Labyrinthdichtung touchiert und die Auflagefläche abgeschliffen wird.

#### **4.4 Reparatur und vorbeugende Maßnahmen**

Durch die Instandsetzungsarbeiten wurde die mit 59 Tagen geplante Inspektion auf 129 Tage verlängert.

Der Reparaturbericht des Betreibers über die Generalinspektion 1986 gibt folgende Auskünfte:

Die Befunde, die durch visuelle Begutachtung unter Benutzung von Bleiglas ermittelt wurden, machten eine Reparatur der Führungsnute am Reaktorkorb und/oder der Führungskeile am Druckgefäß erforderlich. Wegen der hohen Dosisrate sowohl des Reaktorkorbmaterials als auch des Druckgefäßmaterials mussten fernbedienbare Reparaturverfahren und Instrumente eingesetzt werden. Eine Expertengruppe hat zwei Varianten geprüft:

1. Abtragung der Führungsnute des Reaktorkorbes durch Fräsen auf ein Maß  $> 80$  mm entsprechend dem vorgefundenen Materialschwund. Materialauftragung auf die Führungskeile des Druckgefäßes durch Platieren bis auf das neue Maß der Nute.

Oder umgekehrt:

2. Abtragung der Führungskeile des Druckgefäßes durch Fräsen auf ein Maß  $< 80$  mm entsprechend dem vorliegenden Materialschwund. Materialauftragung auf die Führungsnute durch Einwalzen bis zur neuen Breite der Keile am Reaktorkorb.

Wegen des fehlenden fernbedienbaren Walzroboters wurde die erste Variante favorisiert und vorbereitet. Die Bearbeitungen wurden innerhalb eines Strahlenschutzcontainers in der Inspektionskammer durchgeführt.

Ferner wird in [40, 1987] berichtet: *Die Verbindung zwischen der Spaltzonengitterplatte und dem Spaltzonenstützylinder wurde durch einige Bolzen verstärkt.*

Im Abschlussbericht der Expertengruppe 2 ist zusätzlich festgestellt:

- *Die verursachenden Federrohrsegmente wurde vollständig durch solche mit größerer Wandstärke ersetzt,*
- *die Verbindung zwischen Spaltzonengitterplatte und dem Spaltzonenstützylinder wurde durch 16 Bolzen verstärkt,*
- *zusätzlich wurden drei Zentrierkeile auf dem Flansch des Reaktordruckbehälters und drei Zentriermute auf der Ringauflage des Reaktorkorbes angebracht, um den Korb gegen Verdrehung zu sichern.*

Über die Strahlenbelastung des Reparaturpersonals ist nichts berichtet. Auf Nachfrage hat der Betreiber jedoch gegenüber den Bearbeitern erklärt, dass bei Wiederauftreten anomaler Reaktorkorbschwingungen der Reaktorblock vorbeugend abgeschaltet werden würde, um sowohl den Reparaturaufwand zu verringern als auch die Gesundheit des Personals zu schützen.

Als Konsequenz der Störung wurde durch den Betreiber ein interner Standard für eine systematische und periodische Durchführung von Rauschmessungen und ihre Auswertung in Hinblick auf anomale Reaktorkorbbewegung und Regelelementschwingungen erarbeitet und 1988 eingeführt [41, 1987], [42, 1988]. Diese standardisierte monatliche Schwingungsüberwachung wurde bis zur endgültigen Abschaltung [43, 1989], [44, 1988] im KKW Greifswald durchgeführt. So berichten KUNZE und Mitarbeiter [45, 1998] über folgende rms-Werte am 07.02.1990:

Block N°	Leistung %	Regelelement- position K6	$c_B$ g/l	$\sigma_{eff}$ in ‰			
				I01	I09	I17	I18
1	102	205	4.17	1.31	1.18	1.21	1.21
2	102	209	1.16	1.50	1.97	1.83	1.72
3	102	198	2.86	1.37	1.35	1.62	1.49
4	102	185	0.26	2.28	1.90	1.85	2.00

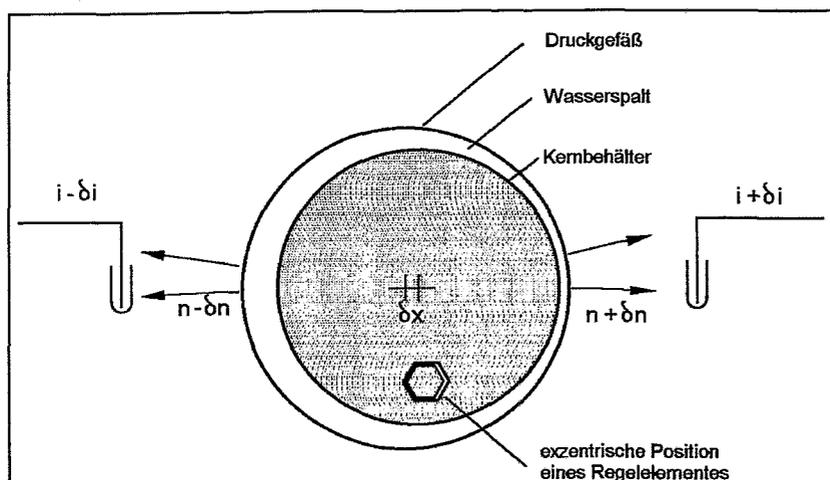
## 4.5 Rauschdiagnostische Untersuchungen und physikalische Aufklärung

### 4.5.1 Allgemeines

Wie bereits gesagt haben die Arbeiten von FRY et. al. [36, 1974] und BASTL [37, 1974] den Startschuss für viele theoretische und experimentelle Untersuchungen der Reaktorkorb-bewegungen gegeben, nachdem im Palisades Kernkraftwerk erhebliche Beschädigungen durch anomale Reaktorkorb-bewegungen eingetreten waren.

Schon damals wurde konstatiert: Normale Reaktorkorb-schwingungen in der Größe von einigen zehn Mikrometern treten auf, wenn der Korb durch die Niederhaltefedern oben und die Halteelemente unten in ausreichender Weise fixiert ist. Anomale Reaktorkorb-bewegungen erscheinen, sobald die oberen Federn defekt sind und ihre Federkonstante daher deutlich zurückgegangen ist. Dann verringern sich die Eigenfrequenzen derart, dass Schwingungen dieser Art mit Beschleunigungsaufnehmern nicht mehr, sondern indirekt nur durch Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen nachweisbar sind.

Die Empfindlichkeit der Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen gegenüber Reaktorkorb-schwingungen ist recht groß. Das Wirkprinzip verdeutlicht Abb. 4.6:



**Abbildung 4.6**

*Nachweis der Reaktorkorb-bewegungen: Durch eine geometrische Verschiebung des Spaltzentrums um  $\delta x$  wird der Wasserspalt rechts schmaler, der austretende Fluss schneller Neutronen und der Strom in der Ex-core-Ionisationskammer größer. Auf der linken Seite verringert sich der Kammerstrom um den gleichen Betrag.*

Das Wirkprinzip, über den bewegungsbedingt variierenden Wasserspalt und die daraus resultierende Transmissionsänderung für schnelle Neutronen amplitudenproportionale Neutronenfluss-schwankungen zu induzieren, hat zur Folge, dass in diametralen Ex-core-Positionen gleichgroße Schwankungsamplituden mit entgegengesetztem Vorzeichen auftreten.

Der Zusammenhang zwischen Auslenkung  $\delta x$  und normiertem Neutronenfluss  $\delta i / i$  ist von Thie [46, 1982] für Druckwasser-Reaktoren mit Cluster-Regelung verallgemeinert worden zu

$$\frac{\delta i}{i} = K \cdot \delta x \quad (4.1)$$

mit  $K = 0,15 \text{ cm}^{-1}$ .

Für die WWER-440-Reaktoren sowjetischer Bauart mit Regelelementen, die aus Absorberteil und Brennstoffteil (s. Abb. 3.1) mit gleichem hexagonalem Querschnitt bestehen, haben die Bearbeiter eine überschlägige experimentelle Bestimmung vorgenommen [47, 1989], [48, 1990], die einen besser geeigneten Wert  $K = 0,12 \text{ cm}^{-1}$  ergeben haben. Dieser justierte Wert wird im folgenden benutzt<sup>34</sup>.

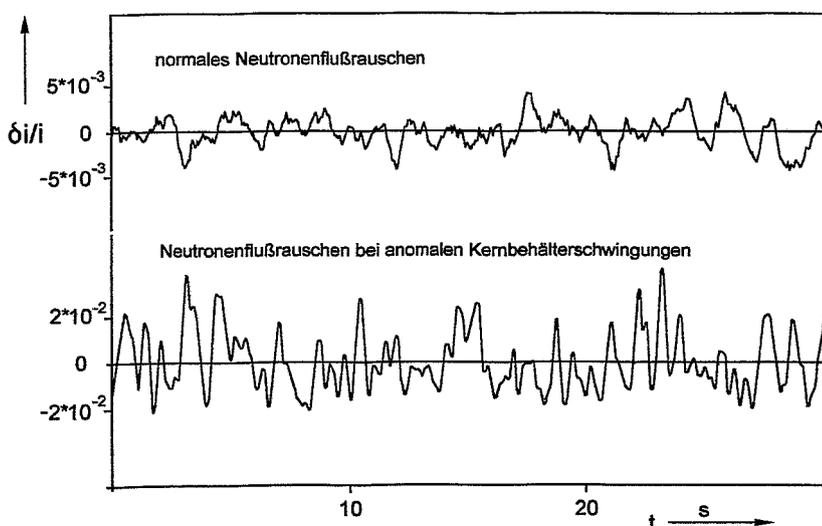
Von FRY und Mitarbeitern [36] wird für die anomalen Korb-bewegungen „eine mittlere Amplitude im Millimeterbereich“ angegeben. Am Block 2 des KKW Greifswald sind mittlere

<sup>34</sup> Der Übertragungsfaktor  $K$  ist etwas kleiner, da sich die frei hängenden Regelelemente nicht im Takt der Reaktorkorb-schwingungen mitbewegen, s. auch Abschnitt 4.5.8.

Amplituden von 2 mm gemessen, aber auch Maximalwerte von 5 mm beobachtet worden. Insbesondere haben die Bearbeiter das Wiederauftreten dieser markanten Bewegungsform 1985 zu sehr detaillierten Untersuchungen genutzt [49, 1992], die auf Grund der weiterentwickelten technischen Ausrüstung der RAS-Systeme [13] und der speziellen Analysesoftware in Form von unüblichen Verfahren [50, 1988], aber auch durch das Entgegenkommen des Betreibers, der dringend an einer Aufklärung interessiert war, möglich wurden.

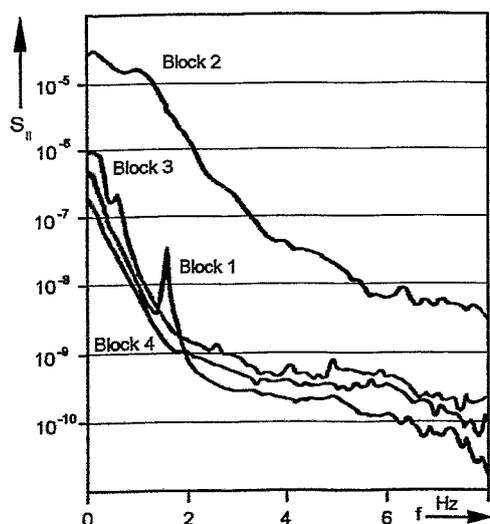
### 3.5.2 Phänomenologische Beschreibung der Neutronenfluss-Schwankungen bei normalen und anomalen Reaktorkorbschwingungen

Anomale Reaktorkorbschwingungen erzeugen deutlich andersartige Neutronenfluss-Schwankungen als sie normalerweise beobachtet werden, s. Abb. 4.7.



**Abbildung 4.7**

Neutronenfluss-Schwankungen, gemessen in Ex-core-Positionen des Blockes 2 im Kernkraftwerk Greifswald, bei normalem Anlagenverhalten (oben) und bei anomalen Reaktorkorbschwingungen (unten). Die Verläufe sind deutlich unterschiedlich. Die Amplituden unterscheiden sich um den Faktor  $\approx 8$ .



**Abbildung 4.8**

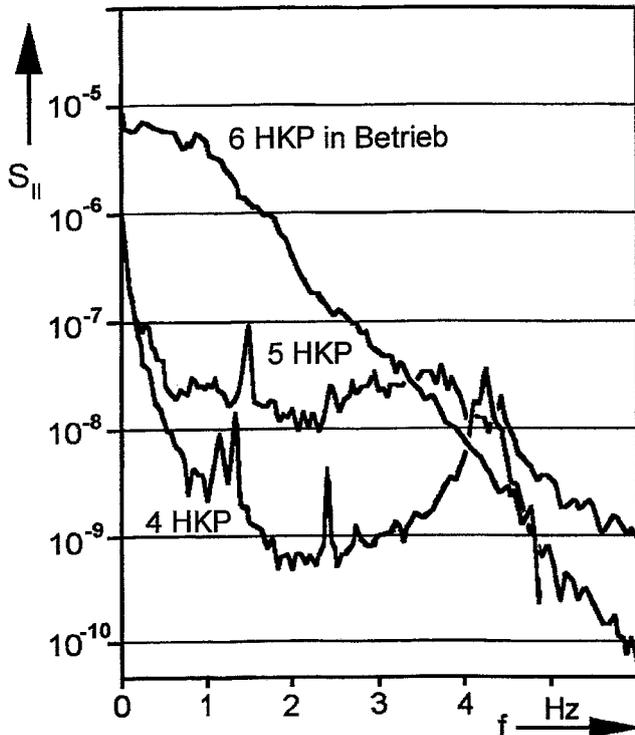
Normierte Autospektralleistungen der Neutronenflussschwankungen in der Ex-core Position I19, ermittelt im Oktober 1985 an den vier Blöcken des Kernkraftwerkes Greifswald. Die anomale Reaktorkorbschwingung am Block 2 erzeugt eine im gesamten Frequenzbereich um fast zwei Größenordnungen erhöhte Spektralleistung. Die Ursache der Resonanz bei 1,5 Hz im Neutronenflussrauschen am Block 1 ist unbekannt.

Daher unterscheiden sich auch die normierten Autospektralleistungen bei normalem und anomalem Zustand: Die Magnitude ist fast zwei Größenordnungen größer als normal und überdeckt damit den Einfluss anderer Rauschquellen, wie in Abb. 4.8 durch Vergleich der Spektralleis-

tungen der Blöcke 1 bis 4 des Greifswalder KKW zeigt. Dabei ist die Ursache der niederfrequenten Resonanzen an den Blöcken 1 und 3 nicht eindeutig geklärt, vermutlich handelt es

sich um Schwingungen einzelner Regelelemente. Der Vergleich macht aber deutlich, dass im Falle anomaler Korbschwingungen Regelelementeschwingungen in den Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen nicht mehr nachweisbar sein werden, sofern ihre Amplitude tatsächlich durch die Geometrie des Kühlkanals begrenzt ist.

Sehr aufschlussreich sind die Autospektralleistungen der externen Neutronenfluss-Schwankungen bei verminderter Anzahl laufender Hauptkühlmittelpumpen. Schon bei nur 5 laufenden Pumpen ist die Spektralleistung fast zwei Größenordnungen (die Amplitude also knapp eine Größenordnung) geringer<sup>35</sup>, und niederfrequente Resonanzen treten deutlich hervor. Ob es sich hierbei wiederum um Schwingungen einzelner Regelelemente handelt oder Schwingungsformen des einseitig anliegenden Korbes, ist nicht bekannt.



**Abbildung 4.9**

*Normierte Autospektralleistung der Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen für unterschiedliche Anzahl arbeitender Hauptkühlmittelpumpen bei anomaler Reaktorkorb-schwingung. Die Bedeutung der einzelnen Resonanzen ist nicht bekannt.*

*Die Schwingungsamplitude ist schon bei nur fünf arbeitenden HKP um mehr als eine Größenordnung geringer gegenüber sechs arbeitenden HKP.*

Im folgenden werden erst einmal ausschließlich die Signale von Ex-core-Ionisationskammern untersucht. Entsprechend Abb. 3.1 sind diese entweder in Höhe Oberkante der Spaltzone (durch Index o gekennzeichnet) oder Unterkante (Index u) angeordnet, bei fehlendem Index handelt es sich um eine mittlere Position.

#### 4.5.3 Konventionelle Analyse mit Hilfe der Schätzung von Spektralleistungen

Bei stationärem Reaktorbetrieb steht genügend Zeit zur Verfügung zur Erfassung von  $N = 100$  Einzelmessungen (Schätzungen) des „zufälligen“ Signalverlaufs der Neutronenfluss-Schwankungen, so dass eine ausreichende statistische Genauigkeit der Spektralleistung erreicht wird.

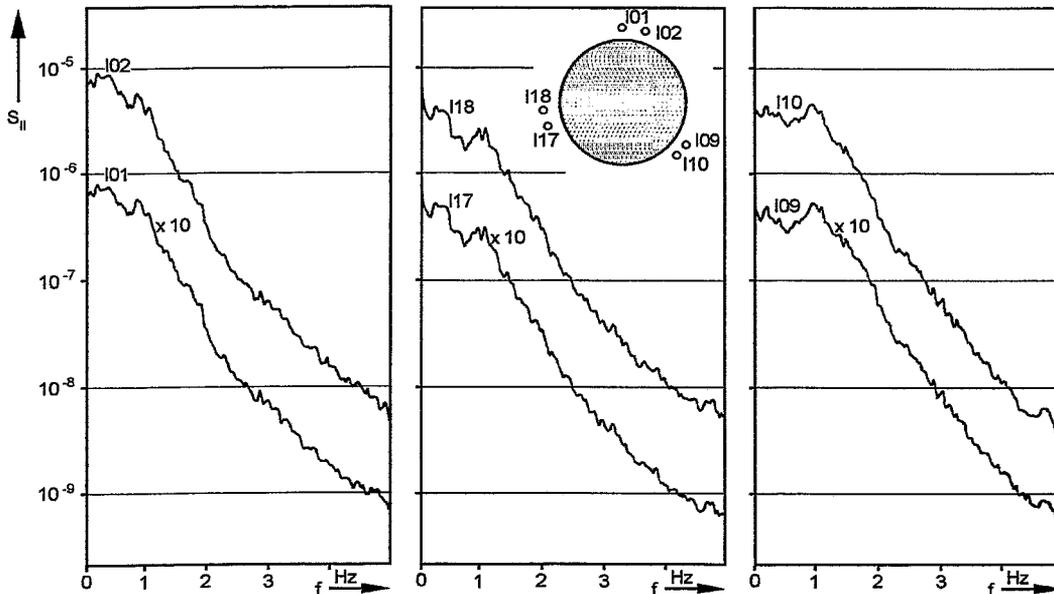
<sup>35</sup> Eine sehr einfache Möglichkeit der Schwingungsminimierung besteht daher in der Abschaltung einer Hauptkühlmittelpumpe. In diesem Falle wird der Reaktorkorb durch die unsymmetrischen Strömungskräfte vermutlich in eine Schiefelage gepresst und ist dann offenbar besser fixiert. Die Betriebsvorschrift verlangt für diesen Fall jedoch eine Leistungsabsenkung auf 50 %, wozu sich der Betreiber nicht entschließen konnte.

Allgemein ist das Dreifache der Standardabweichung<sup>36</sup> - für  $N = 100$  Schätzungen also ein Relativwert von 6 % - eine Fehlergrenze hoher Konfidenz sowohl für die Autospektralleistung als auch für die Kohärenzwerte [50, 1988]. Für die Werte  $S_{rr}$  der Autospektralleistung kann man sicher sein, dass der reale Wert  $S_{xx}$  in den Grenzen

$$(1 - 0,06) * S_{xx} < S_{rr} < (1 + 0,06) * S_{xx}$$

um den gemessenen Wert  $S_{xx}$  liegt. Die Phasenwerte der Kreuzspektralleistung sind ebenfalls praktisch konfident, wenn der zugehörige Kohärenzwert  $< 0,06$  ist, wie experimentell in [33, 1993] gezeigt wurde.

Abb. 4.10 zeigt die geschätzte Spektralleistung mit einer Genauigkeit besser 6% von allen für Rauschmessungen verfügbaren Signale externer Ionisationskammern, und in Abb. 4.11 sind zugehörige Kohärenz- und Phasenfunktionen ausgewählter Signalkombinationen angegeben.



**Abbildung 4.10**

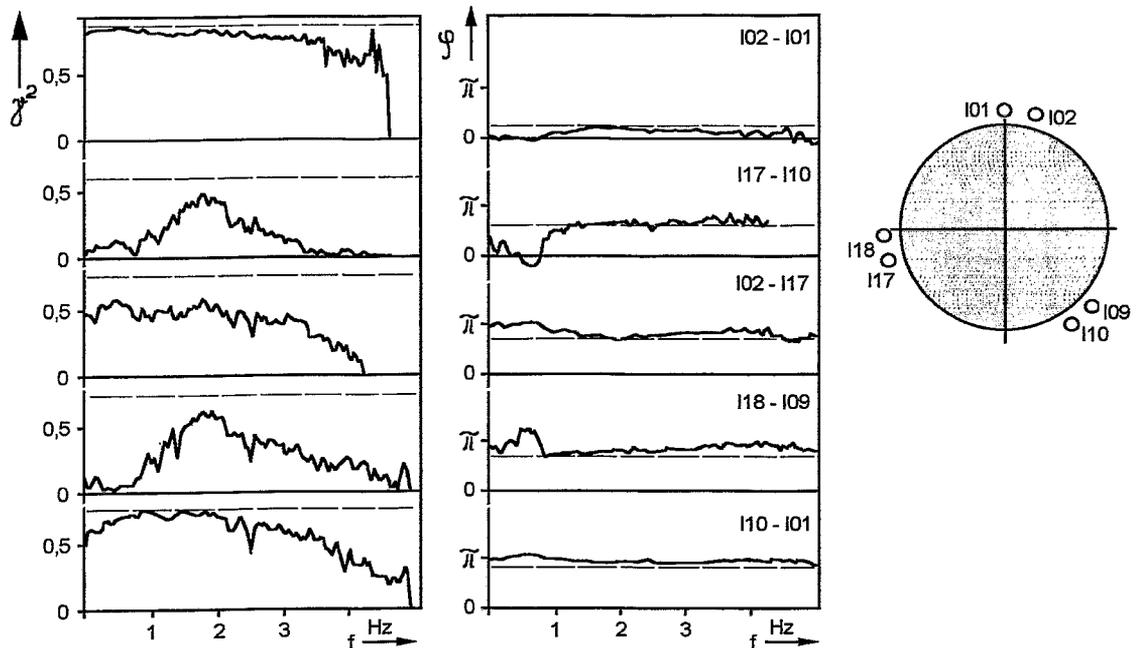
*Normierte Autospektralleistungen der Neutronenfluss-Schwankungen, gemessen in unterschiedlichen Ex-core-Detektorpositionen. Charakteristisch ist die ausgeprägte Resonanzstruktur im Bereich niedrigster Frequenzen, die zu hohen Frequenzen hin mit etwa der 4. Potenz der Frequenz abfällt. Während die Spektren der Ionisationskammern I01, I02, I17 und I18 recht ähnlich sind, existiert im „Sichtbereich“ der Kammern I09 und I10 offenbar ein andersartiger Bewegungsablauf. Insbesondere erreichen die niedrigsten Frequenzanteile dort nur geringere Magnitudenwerte. - Insgesamt ist die Magnitude etwa 60 mal größer als im Normalfall.*

Die Autospektralleistungen in Abb. 4.10 zeigen typisches Verhalten:

- Für Frequenzen unter etwa 1 Hz besteht eine Vielfachresonanz-Struktur, die in benachbarten Positionen relativ ähnlich, für Positionen in größerem Abstand aber deutlich verschieden ist.
- Oberhalb dieser Frequenzgrenze nimmt die Amplitude der Autospektralleistung kontinuierlich mit der 4. Potenz der Frequenz ab, wie es typisch ist für Spektren oberhalb der Resonanzfrequenz.
- In der Umgebung der Ionisationskammerpositionen I09, I10 ist die Amplitude unterhalb 0,5 Hz sichtbar kleiner als in den anderen Positionen und von deutlich anderer Struktur. Offenbar ist der Bewegungsablauf im Sichtbereich dieser Messwertgeber ein anderer<sup>37</sup>.

<sup>36</sup> Die Standardabweichung der Spektralleistung von  $N$  Schätzungen beträgt  $2/\sqrt{N}$ .

<sup>37</sup> Das steht in Verbindung mit Anschlägen, die in Abschnitt 3.5.8 untersucht werden



**Abbildung 4.11**

Kohärenzfunktionen  $\gamma^2$  und Phasenfunktionen  $\varphi$  der Kreuzspektralleistungen von Neutronenfluss-Schwankungen in unterschiedlichen Ex-core Positionen. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Ergebnisse aus einem einfachen physikalischen Modell über den Bewegungsablauf, das in Abschnitt 4.5.5 qualitativ erläutert wird.

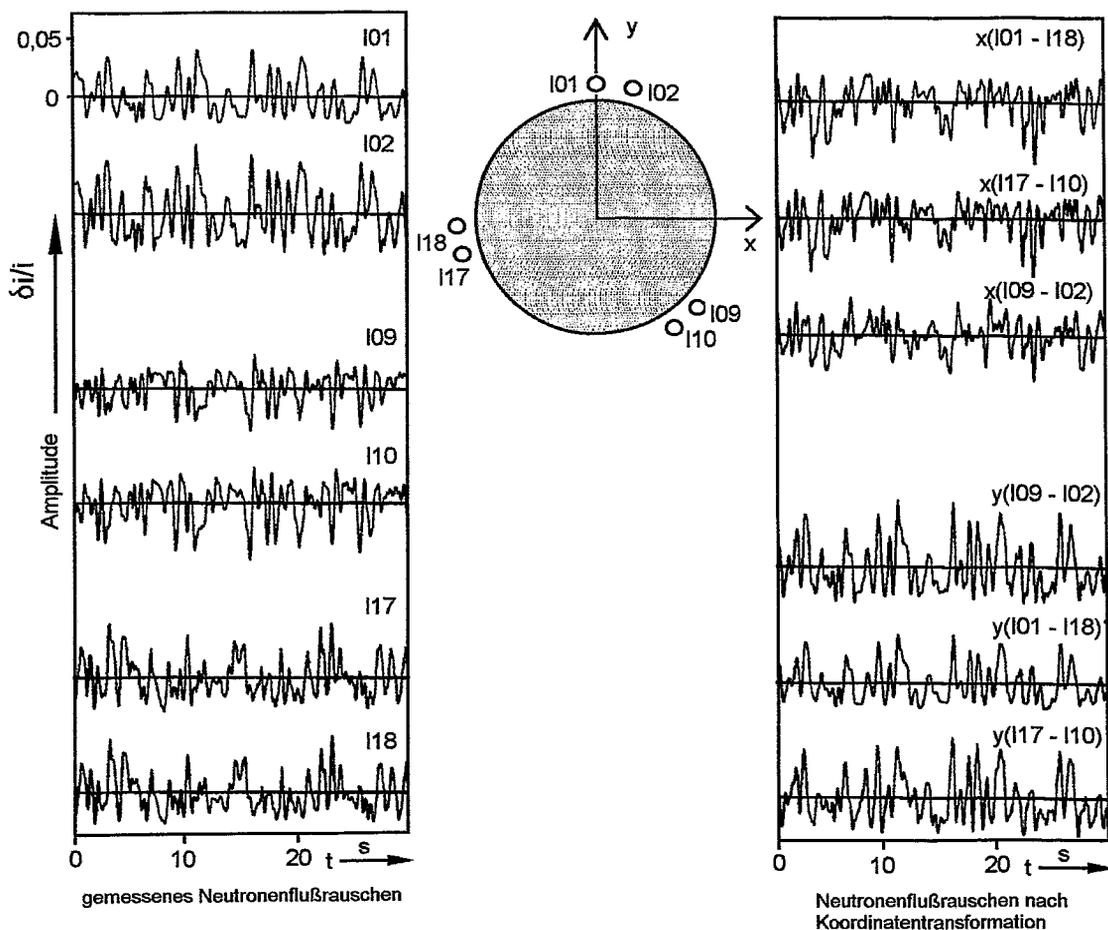
Die Kohärenz- und Phasenfunktionen liefern folgende Aussagen:

- In benachbarten Positionen (I01-I02) und auch in nahezu diametralen Positionen (I02-I17, I01-I10) besteht ein hoher Korrelationsgrad, der bis an vollständige Korrelation heranreicht.
- Bei niedrigen Frequenzen  $< 1$  Hz – d.h. in der Resonanzregion der Autospektralleistungen in Abb. 4.10 – erreicht die Kohärenz für solche Detektorkombinationen, deren Position miteinander eine nahezu rechten Winkel bilden (I10-I17, I18-I09) sehr geringe Werte, so dass die zugehörige Phasenfunktion statistisch unsicher ist.
- Für Frequenzen  $> 1$  Hz erreichen die Phasenfunktionen etwa den Wert des Winkels, den die Messwertgeber miteinander bilden und damit die Werte des physikalischen Modells.
- Dagegen weichen in den Gebieten niedriger Frequenz und geringer Korrelation die Phasenwerte deutlich vom Detektionswinkel ab.

Ganz offensichtlich ist der Prozesscharakter für Frequenzen  $< 1$  Hz deutlich verschieden von den bei höheren Frequenzen. Die Ursache dafür wird ab Abschnitt 4.5.6 mit Hilfe von unüblichen Signalanalyseverfahren ermittelt.

#### 4.5.4 Interpretation der Neutronenfluss-Schwankungen in Ex-core Positionen als Distanzinformation

Bedenkt man den linearen Zusammenhang zwischen den Neutronenfluss-Schwankungen  $\delta i$  und der geometrischen Verschiebung  $\delta x$  der Spaltzone in Abb. 4.6, so kann man unter Verwendung der justierten THIE'schen Formel (4.1) die Neutronenfluss-Schwankungen als Weginformationen handhaben. Dann ist es auch möglich und sinnvoll, das Neutronenflussrauschen, das in unterschiedlichen Detektionswinkeln  $\neq 0$  gemessen wurde, in kartesischen Koordinaten  $x'(t)$ ,  $y'(t)$  zu transformieren und auf ein einheitliches Koordinatensystem  $x(t)$ ,  $y(t)$  umzurechnen.



**Abbildung 4.12**

Normierte Neutronenfluss-Schwankungen, wie sie in verschiedenen Ex-core Positionen gemessen wurden (links), und die aus einer Koordinatentransformation für die Richtungen  $x$ ,  $y$  folgenden Verläufe (rechts). Aus den sechs gemessenen Zeitreihen lassen sich drei voneinander unabhängige Paare  $x'$ ,  $y'$  ermitteln. Die Paare zeigen in überzeugender Weise fast gleiche Struktur, so dass es gerechtfertigt ist, die Neutronenfluss-Schwankungen als Distanzinformation zu interpretieren.

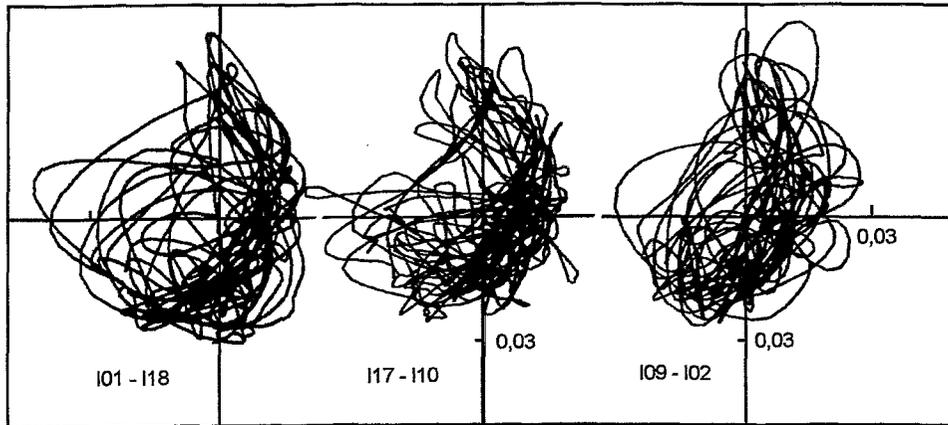
Abb. 4.12 zeigt links das normalisierte Neutronenflussrauschen in sechs verschiedenen Ex-core Positionen. Jeweils zwei der Signale sind ähnlich infolge der unmittelbaren Nachbarschaft ihrer Messpositionen. Rechts sind die auf kartesische Koordinaten umgerechneten Verläufe in  $x$ - und  $y$ -Richtung angegeben. Sowohl das Tripel in  $x$ -Richtung als auch in  $y$ -Richtung sind untereinander überzeugend ähnlich und bestätigen damit den geometrischen Charakter des Ex-core Neutronenflussrauschens.

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Signale in negativer  $y$ -Richtung deutlich begrenzt sind. In dieser Richtung befinden sich die Ionisationskammern I09 und I10, deren Autospektralleistungen von denen in anderen Positionen abweichen<sup>38</sup>.

Auf Grund des geometrischen Charakters der Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen können die transformierten Signale von Abb. 4.12 links zur Darstellung als Lissajous-Figuren in Abb. 4.13 verwendet werden und stellen dann den Bewegungsablauf des geometrischen Spaltzonen-zentrums dar. Tatsächlich sind die drei Kurven in Abb. 4.13, die aus den drei Signalkombinationen resultieren, vergleichsweise ähnlich, differieren aber in Details. Die Ursache dieser Unterschiede sind - wie in [47, 1989] analysiert wurde - auf lokale Effekte durch die

<sup>38</sup> Das steht in Verbindung mit Anschlägen, die in Abschnitt 4.5.8 untersucht werden

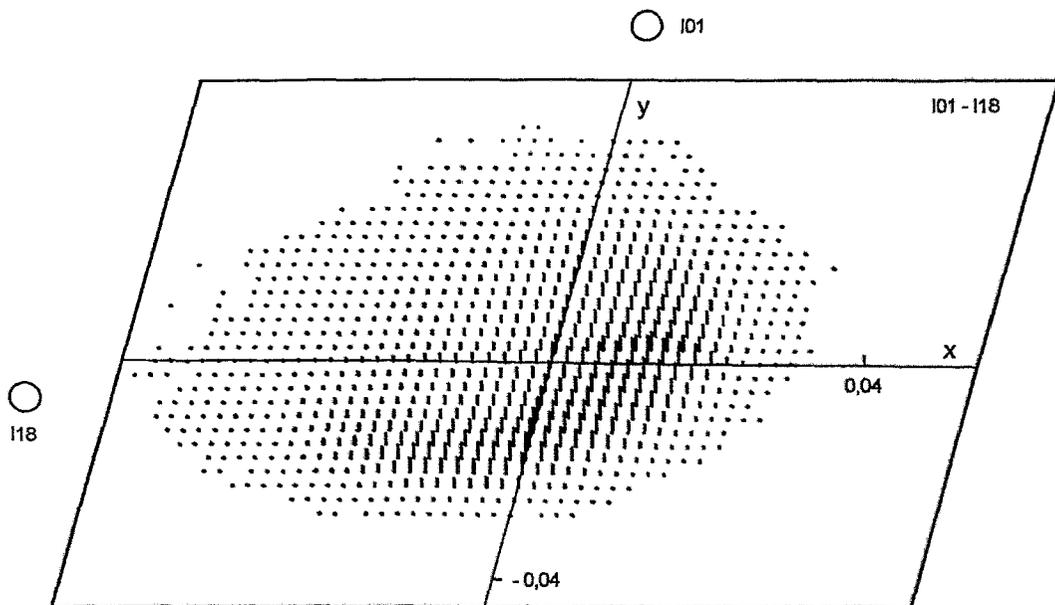
Relativbewegung der Regelemente und einen möglichen Rotationsanteil der Reaktorkorb-  
bewegung zurückzuführen. Ein solcher Rotationsanteil kann praktisch nicht allein über Ex-  
core Neutronenfluss-Schwankungen nachgewiesen werden.



**Abbildung 4.13**

Interpretation der Neutronenfluss-Schwankungen von Abb. 4.12 als Distanzinformation. Aus den für die Koordinatenrichtungen berechneten Verläufen lassen sich drei unabhängige ebene Darstellungen der Bewegung des Spaltzonenzentrums in Form der obigen Trajektorien bilden. Die Ähnlichkeit der drei Darstellungen zeigt die Möglichkeiten und (Genauigkeits-)Grenzen dieser Interpretation. - Auffällig ist die ausgeprägte Aufenthaltshäufigkeit des Schwerpunktes in einem nierenförmig gebogenen Gebiet, dessen Details aber unterschiedlich „gesehen“ werden. Beobachtungsdauer: 1 Minute.

Die Neutronenfluss-Trajektorien in Abb. 4.13 vermitteln übereinstimmend den Eindruck, dass sich der Reaktorkorb mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem nierenförmig gebogenen Gebiet im 1., 3. und 4. Quadranten befindet, und dass die Bewegungsmöglichkeiten nach recht unten beschränkt sind. Das stimmt wiederum mit dem Gebiet überein, das bevorzugt von den Ionisationskammern I09, I10 erfasst wird und in dem nach Abb. 4.10 die Spektralleistung eine andere Struktur aufweist.

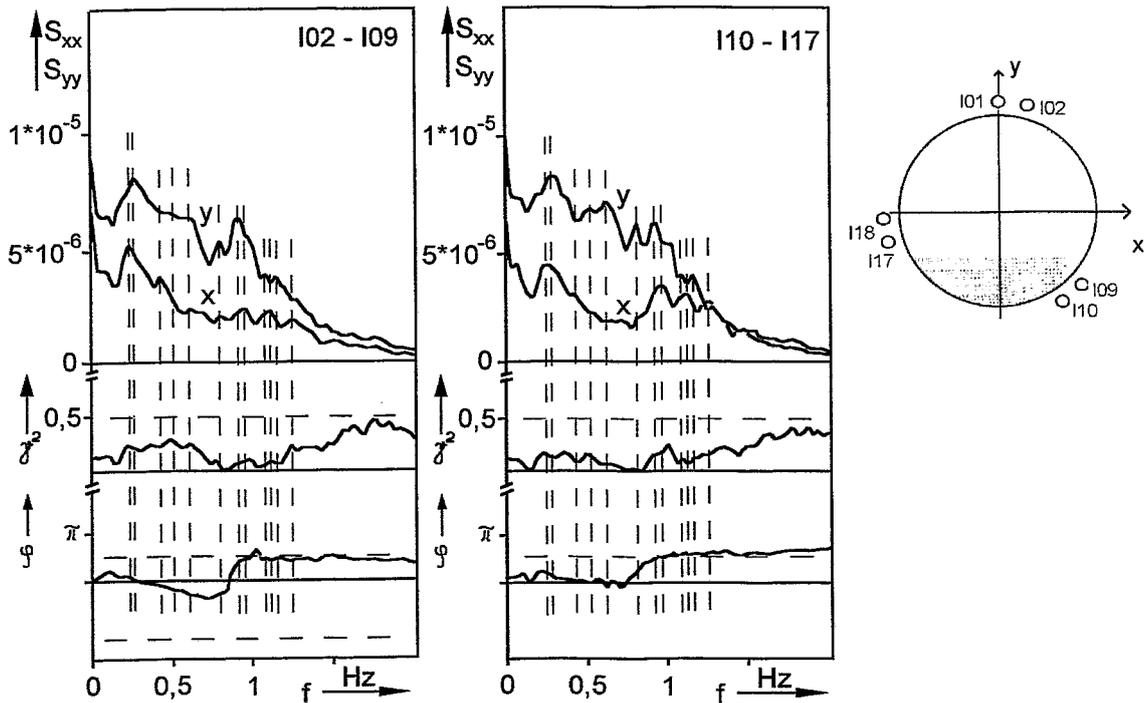


**Abbildung 4.14**

Interpretation der Neutronenfluss-Schwankungen als Distanzinformation: Die zweidimensionale Amplitudenverteilung  $h(x, y)$  der koordinatentransformierten Neutronenfluss-Schwankungen aus den Messpositionen I01 und I18 markieren ein ähnliches Häufigkeitsgebiet wie in Abb. 4.13. - Beobachtungsdauer 30 Minuten.

Den gleichen Eindruck vermittelt die Darstellung der zweidimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung in Abb. 4.14. In dieser Abbildung ist die Häufigkeit für den Aufenthalt des Spaltzonenzentrums in partiellen Flächenelementen der x-y-Ebene angegeben. Diese Darstellung ermöglicht eine längere Beobachtungsdauer und bestätigt das charakteristische Verhalten wie in Abb. 4.13. für einen weitaus längeren Zeitabschnitt.

Autospektralleistungen, Kohärenz- und Phasenfunktionen der transformierten Neutronenflussschwankungen  $x(t)$ ,  $y(t)$  im niederfrequenten Bereich sind in deutlich verbesserter Frequenzauflösung in Abb. 4.15 angegeben.



**Abbildung 4.15**

*Normierte Autospektralleistungen der koordinatentransformierten Ex-core-Neutronenflussschwankungen (lineare Skala) und zugehörige Kohärenz- und Phasenfunktionen im Bereich niedrigster Frequenzen. Bemerkenswert sind die deutlich geringere Amplitude in x-Richtung, die Unterschiedlichkeit der Ausprägung der Resonanzen durch die verschiedene Geberpositionen, die geringere Kohärenz der Geberpaarung 117-110 und die Unterschiedlichkeit des Phasenganges bis 0,7 Hz.*

In der linearen Skalierung zeigen sich eine größeren Anzahl von mehr oder weniger ausgeprägten Resonanzen. In der links dargestellten Signalkombination I02-I09 ist ein etwa linearer Phasengang durch Kohärenzwerte  $> 10\%$  gut gesichert, während die Kombination I17-I09 eine geringere Kohärenz und auch einen kaum wahrnehmbaren Phasengang darbietet. Für geringe Frequenzwerte  $< 1$  Hz erscheint die Bewegung des Reaktorkorbes für positive x-Werte offenbar verzögert.<sup>39</sup> Die charakteristische geringe Kohärenz bei Frequenzen  $< 1$  Hz ist auch in den transformierten Signalen deutlich.

<sup>39</sup> Das steht in Verbindung mit Anschlägen, die in Abschnitt 3.5.8 untersucht werden.

#### 4.5.5 Beschreibung der Kohärenz- und Phasenfunktionen durch ein mathematisches Modell

Die Schlussfolgerungen aus dem Abschnitt 4.5.3 führen zu folgendem mathematischem Modell über den Bewegungsablauf:

- es besteht eine zweidimensionale stochastische Pendelbewegung ohne Vorzugsrichtung aber mit einer Vorzugsdrehrichtung,
- die Auslenkungen aus der mittleren Position sind in erster Näherung für alle Richtungen gleich groß und schwanken statistisch zwischen Null und einem Maximalwert.

Ausgehend von einer in vereinfachter Weise elliptisch angenommenen Trajektorie mit den Auslenkungen

$$x(t) = A * \cos \omega t, \quad y(t) = B * \sin \omega t \quad (4.2)$$

in karthesischen Koordinaten und den Messkoordinaten  $x'(t)$  und  $y'(t)$ , die die Winkel  $\beta$  und  $\beta + \delta$  mit der Richtung  $x$  des Referenzsystems bilden ( $\delta$  ist der Winkel, den die Detektoren zueinander bilden) wird das obige mathematische Modell ausgeführt durch eine Integration der Auto- und Kreuzspektralleistungen über den Winkel  $\beta$  und über die Halbachsen  $A$  und  $B$ . Unter Annahme einer Gleichverteilung  $\beta[0...2\pi]$  und  $A, B[0...M]$  und statistischer Unabhängigkeit dieser Parameter untereinander erhält man:

$$\varphi = \text{Arc tan}\left(\frac{3}{4} \tan \delta\right) \quad (4.3)$$

$$\gamma_{\max}^2 = \cos^2 \delta + \left(\frac{3}{4} \sin\right)^2 \delta \quad (4.4)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die obigen Formeln nur dem variierenden Wasserspalt als Ursache der Neutronenfluss-Schwankungen Rechnung tragen, nicht aber den bei der Bewegung möglichen Reaktivitätseffekt infolge Relativbewegung der Regelelemente. Die mittleren Phasen- und Kohärenzwerte nach den Gleichungen (4.3) und (4.4) sind in Abb. 4.11 als gestrichelte Linien eingezeichnet.

Unter der Annahme zweier unabhängiger Gauß-Verteilungen für die Amplituden  $A$  und  $B$  geht in den obigen Formeln 4.3, 4.4 der Ausdruck  $\frac{3}{4}$  in den Ausdruck  $\pi/4$  über; bei gleichverteiltem Winkel  $\beta[0...2\pi]$  ist der Einfluss der Amplitudenverteilungen von  $A, B$  also vernachlässigbar.

Die Tatsache, dass die experimentell ermittelten Kohärenzwerte tatsächlich das hypothetische Maximum von (4.4) erreichen, stützt daher mit großer Wahrscheinlichkeit die Annahme, dass ein einziger globaler Bewegungsvorgang im Innern des Druckbehälters vorliegt. Das simple Modell zeigt, dass schon die statistische Natur der Bewegung zur Verringerung der Kohärenzwerte führt.

Kohärenz- und Phasenwerte für das niederfrequente Frequenzband  $< 1$  Hz ergeben sich durch Modifikation des obigen Modells in einfacher Weise, indem man die Annahme einer Vorzugsdrehrichtung aufgibt. Mathematisch bedeutet dieses, dass die Gleichverteilung der Amplituden  $A, B$  für eine der Verteilungen auf den Wertebereich  $B[-M...+M]$  ausgedehnt wird. Dann erhält man:

$$\varphi = 0 \quad \text{für } \delta < 90^\circ, \quad \varphi = 180^\circ \quad \text{für } \delta > 90^\circ \quad (4.5)$$

$$\gamma_{\max}^2 = \cos^2 \delta \quad (4.6)$$

Auch diese modelltheoretischen Werte stimmen ganz gut mit dem Befund in Abb. 4.11 überein.

#### 4.5.6 Experimentelle Bestimmung der variierenden Drehrichtung

Die Hypothese einer variierenden Drehrichtung erscheint sowohl interessant als auch erstaunlich, berücksichtigt man die Größe und Masse des Reaktorkorbes einschließlich der Brennstoffkassetten. Sie sollte daher an Hand des experimentellen Materials überprüft werden.

Bei einer Fouriertransformation werden für jeden Frequenzpunkt einzeln komplexe Amplitudenwerte aus jeder Einzelmessung ermittelt. Ein eventuell bestehender kausaler Zusammenhang einzelner Frequenzen wird dabei beseitigt. In den Auto- und Kreuzspektralleistungen, die anschließend gebildet werden, sind die ermittelten Werte lediglich in aufsteigender Folge angeordnet.

Folgerichtig werden dabei jedem Frequenzpunkt die der jeweiligen Messung optimal angepassten Amplitudenwerte zugeordnet. Da eventuelle Frequenzzusammenhänge dann völlig aufgelöst sind, ist es im Sinne der Fouriertransformation formal zulässig, für jeden Frequenzpunkt eine in sich geschlossene elliptische Bahnkurve anzunehmen. Wir betrachten daher im folgenden zunächst nur eine einzige Drehfrequenz  $\omega$  und schreiben für die verallgemeinerten elliptischen Trajektorien:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \rho - B \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin \rho, \\ y(t) &= A \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \rho + B \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos \rho. \end{aligned} \quad (4.7, 4.8)$$

mit A, B als Haupt- und Nebenachsen und  $\rho$  als Orientierung der Hauptachse gegenüber der x-Achse.

Leitet man aus diesem Ansatz (4.7), (4.8) nach Fouriertransformation die Ausdrücke für die Auto-, Kreuzspektralleistungen, und Phasenwerte ab, so lassen sich aus vier Gleichungen die Bestimmungsgleichungen für die elliptischen Parameter  $\rho$ ,  $B/A = \varepsilon$  (Exzentrizität), A und B ermitteln:

$$\tan 2\rho = \frac{2 \operatorname{Re} S_{xy}}{S_{xx} - S_{yy}}, \quad \varepsilon + \frac{1}{\varepsilon} = \frac{S_{xx} + S_{yy}}{\operatorname{Im} S_{xy}}, \quad (4.9, 4.10)$$

$$A = \left| \sqrt{\frac{\operatorname{Im} S_{xy}}{\varepsilon}} \right|, \quad B = A \cdot \varepsilon. \quad (4.11, 4.12)$$

Die nachfolgende exemplarisch beschriebene Prozedur dient zur Ermittlung von Verteilungen der elliptischen Parameter aus den üblichen Einzelschätzungen der Signalverläufe:

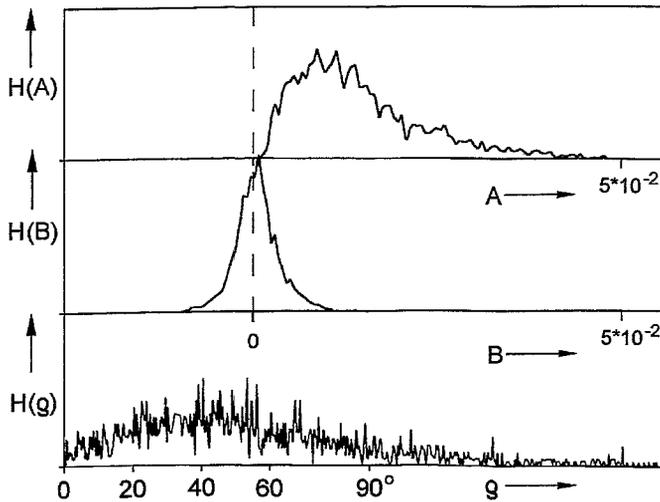
1. Bereitstellung von 100 Einzelschätzungen
2. Koordinatentransformation in karthesische Koordinaten  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,
3. Fouriertransformation dieser Signalverläufe in Real- und Imaginärteile,
4. Bildung der normalisierten Auto- und Kreuzspektralleistungen  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $\operatorname{Re} S_{xy}$ ,  $\operatorname{Im} S_{xy}$  für jede Schätzung,
5. Bestimmung der elliptischen Parameter nach (4.9) bis (4.12) für jede Schätzung,
6. Für schmale Intervalle  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta \rho$ : Summation der Anzahl von Werten, die zwischen  $A + \Delta A$ ,  $B + \Delta B$ ,  $\rho + \Delta \rho$  liegen, separat für die Frequenzbereiche  $< 1,2$  Hz und  $> 1,2$  Hz.
7. Ausführung dieser Prozedur nach Punkt 2 bis 6 für alle 100 Schätzungen.

Das Ergebnis dieser Prozedur sind Häufigkeitsverteilungen  $p(x, x+\Delta x)$  für die Amplitudenwerte  $x$  der Parameter A, B und  $\rho$ .

Die Abbildungen 4.16 a, b zeigen ein typisches Resultat und liefern als Ergebnis:

1. Die Hauptachse A erreicht Wert  $\delta i/i \approx 0,05 \sim 4$  mm für niedrige Frequenzen und  $\delta i/i \approx 0,02 \sim 1,5$  mm für höhere Frequenzen,

2. Im niederen Frequenzbereich ist die Amplitudenhäufigkeitsverteilung der Nebenachse B zentriert und symmetrisch zu Null. Das bedeutet, dass beide Drehrichtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten.
3. Im höheren Frequenzbereich sind die Häufigkeitsverteilungen der Hauptachse und der Nebenachse gleichermaßen positiv und repräsentieren eine konstante Drehrichtung im Uhrzeigersinn.

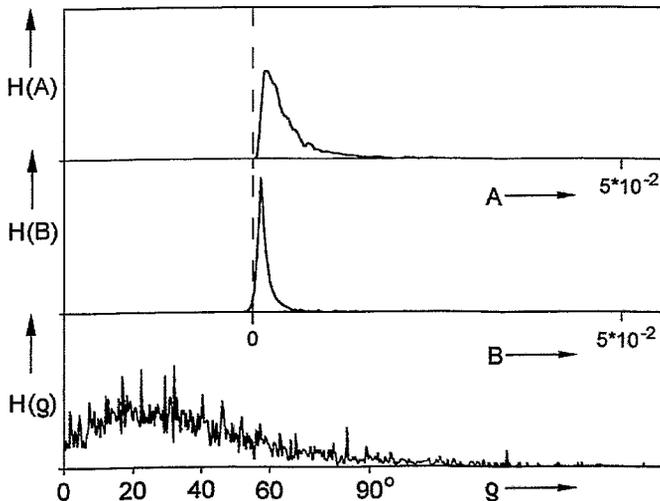


**Abbildung 4.16**

Häufigkeitsverteilungen der Hauptachse A, der Nebenachse B und des Orientierungswinkels  $\rho$  der Hauptachse, wie sie aus der Anpassung der koordinatentransformierten Neutronenfluss-Signale an eine elliptische Bahnkurve aus 100 Schätzungen hervorgehen

**Abbildung 4.16 a:**

Verteilungen nach Summierung aller Häufigkeiten, die für den Frequenzbereich  $0 < f < 1.2$  Hz ermittelt wurden. Für die Nebenachse B ergibt sich eine zentrierte Verteilung: positive und negative Nebenachsen sind gleich wahrscheinlich, d.h. positive und negative Drehrichtung der Trajektorie treten gleich häufig auf.



**Abbildung 4.16 b**

Verteilungen nach Summierung aller Häufigkeiten, die für den Frequenzbereich  $1,2 \text{ Hz} < f < 5$  Hz ermittelt wurden. Für Haupt- und Nebenachse ergeben sich einseitige Verteilungen: beide Hauptachsen sind positiv, d.h. der Drehsinn ist stabil positiv.

Auf diese Weise ist der variierende Drehsinn der Reaktorkorbbewegung eindeutig nachgewiesen.

Das Ergebnis hinterlässt die dringliche Frage nach der Ursache der Drehrichtungsumkehr, denn immerhin hat der beladene Reaktorkorb eine Masse von einigen Tonnen.

Die Ursache der Drehrichtungsänderung konnte jedoch mit Hilfe der Analyse der Spektralleistungen allein der Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen nicht aufgeklärt werden.

#### 4.5.7 Analyse der Kreuzspektralleistung von Neutronenfluss und nichtnuklearen Messgrößen

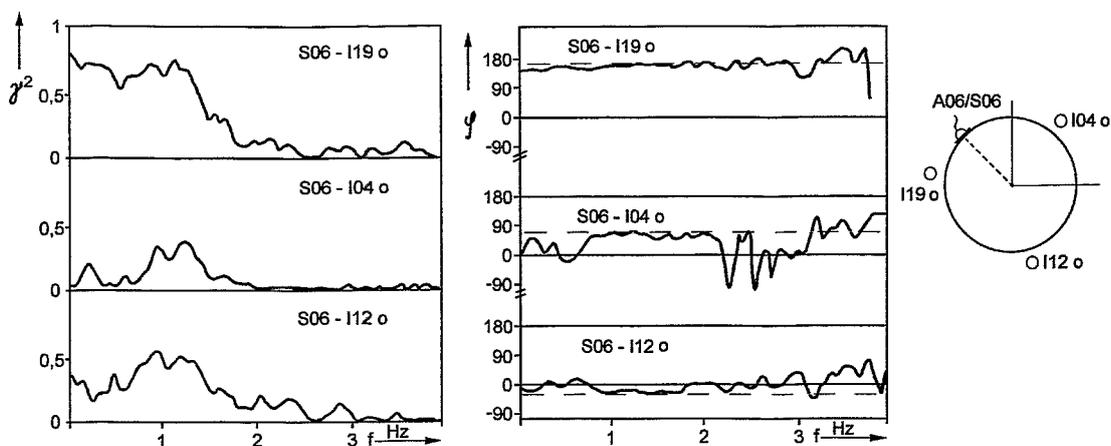
Wie bereits erwähnt waren kurz vor Jahresende 1985 die Rauschanalysesysteme im KKW Greifswald rekonstruiert und um einige Beschleunigungsmessstellen, n- $\beta$ -Emissionsdetektoren und Druckmessstellen erweitert worden. Erste Rauschmessungen fanden über Weihnachten statt.<sup>40</sup>

Wie bereits in [14, 1977] berichtet können die gelegentlich in Beschleunigungssignalen auftretenden Schallereignisse durch Amplituden-Demodulation in eine Einhüllende umgewandelt werden, die als eine Art Leitsignal bezüglich eines transienten Prozesses fungieren kann und damit geeignet ist, diesen transienten Prozess genauer zu erfassen und zu analysieren. Als geeignete Detektorpositionen waren im Kapitel 3 die Regelementschutzrohre ermittelt worden. Aus den Anregungsexperimenten, die GRUNWALD und Mitarbeiter zur Untersuchung der Vibrationseigenschaften des Druckbehälters und zur Identifikation von Schwingungsparametern durchgeführt haben [52, 1985], aber auch Untersuchungen zur Schallausbreitung am ersten Kreislauf des WWER-440/230 durch GIERA [53, 1990]<sup>41</sup> hatte sich ferner ergeben, dass auch am Druckbehälter erfasste Schallereignisse ähnlich hilfreiche Dienste leisten können: Feststellung eines ursächlichen Zusammenhanges des untersuchten Prozesses und seiner Auswirkungen durch Ermittlung des Korrelationsgrades zu anderen Messgrößen.

Im Falle der anomalen Reaktorkorbbewegungen ist das Schallsignal an der Position A06 in Höhe der Labyrinthdichtung außen am Druckgefäß (s. Abb. 4.1) von besonderer Bedeutung gewesen. Grund für die Installation war die Vermutung, in dieser Position neben der Druckbehälterschwingung auch Anschlag- oder Reibgeräusche als Folge der Korbbewegung erfassen zu können. Unerwartet hat dann WEISS eine Korrelation zwischen dem daraus abgeleiteten Schallpegelsignal und den bereits untersuchten Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen gefunden, die völlig andere physikalische Ursachen hat. Der Druckbehälter ist zwischen Kühlmiteleintritts- und -austrittsöffnungen mit einer Labyrinthdichtung versehen, die den unvermeidbaren Kühlmittel-Leckstrom durch Formierung einer hochturbulenten Strömung minimiert. Bewegungen des Reaktorkorbes erzeugen Variationen der Spaltbreite im Takt der Bewegung, wodurch die Bypass-Strömung in ebendiesem Takt moduliert wird. Die turbulente Leckströmung ihrerseits erzeugt dann an- und abschwellende Strömungsgeräusche, die an der Außenfläche des Druckbehälters als Körperschall erfasst werden können. Tatsächlich war bei der Wiedergabe des Beschleunigungssignals A06 über Lautsprecher im Frequenzband um 600 Hz ein an- und abschwelliges Strömungsrauschen hörbar, dessen Modulation mit den Neutronenfluss-Schwankungen der nächstgelegenen Ionisationskammer I19 einherging. Der korrekte Nachweis wird wieder über Untersuchungen zur Kohärenz zwischen den aus A06 abgeleiteten Schallpegelsignal S06 und den Neutronenfluss-Schwankungen in Ex-core Positionen geführt. Abb. 4.17 zeigt die hohe Signalverwandtschaft des Schallpegelsignals mit der nächstgelegenen I-Kammer I19 und die deutlich geringere Ausprägung der Korrelation zu den weiter entfernten I-Kammern I04 und I12. Weil die Messpositionen von A06 und I19 nur einen geringen Winkel einschließen, ist die Signalverwandtschaft auch unterhalb 1 Hz gut ausgeprägt im Unterschied zu den anderen Signalkombinationen. Auch die Phasenfunktionen unterstreichen den ursächlichen Zusammenhang dieser Signalkombinationen. Sie erreichen im Gebiet ausgeprägter Korrelation – unter Berücksichtigung des durch die Amplitudendemodulation bedingten Phasenganges und des Detektionsvorzeichens – die Größe des geometrischen Winkels, den die Positionen des Messwertaufnehmer zueinander bilden.

<sup>40</sup> Auf Grund verminderten Bedarfs war in diesem Zeitraum eine Lastabsenkung möglich.

<sup>41</sup> Über den Nachweis von losen Teilen im Primärkreislauf der Reaktoren des KKW Greifswald gibt es nur interne Berichte, da ein Befund während der Inbetriebnahme des Blockes 2 zum „Staatsgeheimnis“ erklärt worden war.

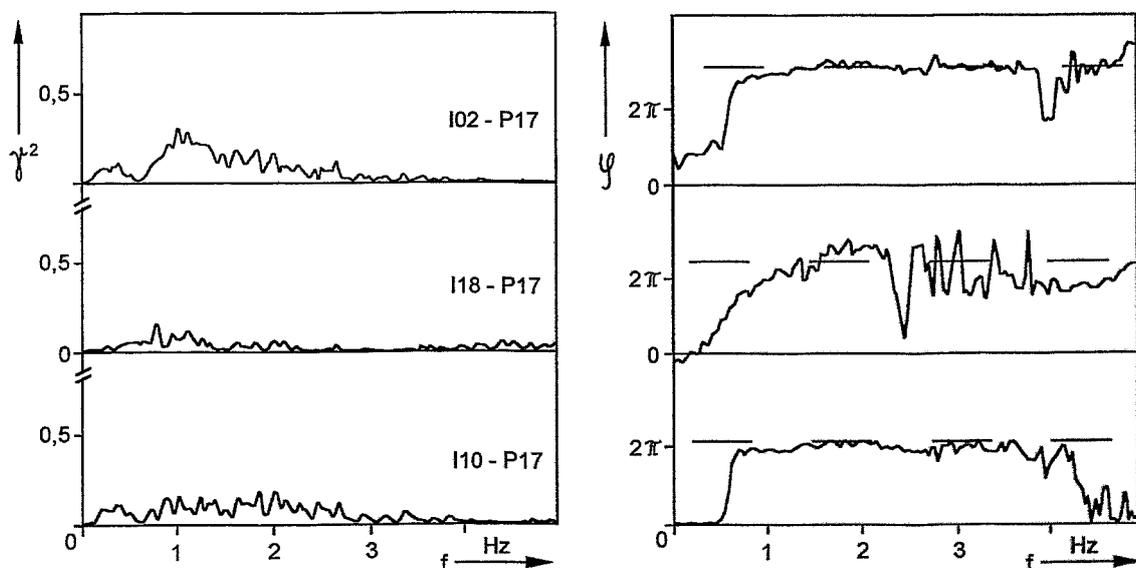


**Abbildung 4.17**

Kohärenz- und Phasenfunktionen von Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen und dem Schallpegelsignal S06, das durch Amplitudendemodulation aus dem Beschleunigungssignal A06 abgeleitet worden ist. Die unterbrochenen Linien stellen diejenigen Phasenwerte dar, die sich als Differenz der Detektionswinkel zwischen Ionisationskammer und Beschleunigungsaufnehmer (nach Korrektur des unterschiedlichen Phasenganges der verwendeten Messlinien) ergeben.

Der diagnostische Wert dieser Information ist größer als auf den ersten Blick erwartet, denn daraus folgt unmittelbar, dass sich der gesamte Reaktorkorb bewegt. Alle Informationen, die vor diesem Befund ermittelt wurden, ließen nämlich offen, ob sich nur die Spaltzone oder der gesamte Korb bewegt.

Ein ganz ähnliches Resultat liefern Korrelationsuntersuchungen der Kombination von Neutronenfluss-Schwankungen und Kühlmitteldruckschwankungen<sup>42</sup>, wie Abb. 4.18 zeigt.



**Abbildung 4.18**

Kohärenz- und Phasenfunktionen zwischen den Neutronenfluss-Schwankungen in Ex-core-Positionen (I02, I10, I18) und den Druckschwankungen im Kühlmittleintrittsbereich des RDB (P17). Im Frequenzbereich oberhalb 1 Hz erreicht die Phasenfunktion die Winkeldifferenz zwischen der Position der Ionisationskammern und dem Ort der Einbindung der Impulsleitung der Druckmessstelle P17 in den Druckbehälter.

<sup>42</sup> Während der normalen Reaktorkorbschwingungen war auch in Langzeitversuchen (geringer statistischer Fehler!) keine Korrelation dieser Art gefunden worden.

Zum physikalischen Verständnis dieses Nachweises ist es nötig, auf die geometrische Position hinzuweisen, an der die Druckschwankungen gemessen werden. Die Öffnung der Impulsleitung der Druckmessstelle P17 befindet sich in Richtung  $\{-y\}$  des verwendeten (in Abschnitt 4.5.4 eingeführten) Koordinatensystems etwas unterhalb der Labyrinthdichtung an der Druckbehälter-Außenwand. Ob die dort registrierten zu den Neutronenfluss-Schwankungen korrelierten Anteile der Druckschwankungen eine Folge der modulierten Bypass-Strömung sind oder eine direkte Folge des bewegten Reaktorkorbes ist dabei unbekannt. Der Korrelationsgrad ist vergleichsweise niedrig und nur bezüglich der I-Kammerposition I02, die etwa gegenüber dem Ort des Impulsleitungsanschlusses liegt, statistisch gesichert für Frequenzen  $>1$  Hz. Die Phasenfunktion erreicht auch hier wieder in etwa den Wert des Detektionswinkels.

#### 4.5.8 Analyse der Anschläge, die gelegentlich in den Beschleunigungssignalen an der Druckbehälter-Oberfläche auftreten

Nach der Komplettierung des Rauschanalysesystems am Block 2 gegen Jahresende 1985 durch Beschleunigungsaufnahmen an der Wand des Druckbehälters und an den Regelementschutzrohren sowie durch Incore-Neutronenfluss-Detektoren war eine Messung mit besonderem Informationsgehalt kurz nach dem Anfahren des Blockes und der Wiedereinschaltung der Hauptkühlmittelpumpen aufgezeichnet worden. Es wurden auffällige Anschläge bemerkt, die gleichzeitig in allen Positionen von Beschleunigungsaufnehmern sowohl am Druckbehälter als auch an der Schutzrohren wahrgenommen wurden. Obwohl unterschiedlich in ihrer Amplitude war ihre Signalform in allen Messpositionen überaus ähnlich. Die Einhüllende des Signals vom Regelementschutzrohr in der Position 09-40 war besonders signifikant und wurde daher zur Triggerung der Messwerterfassung aller verfügbaren Messgrößen verwendet.

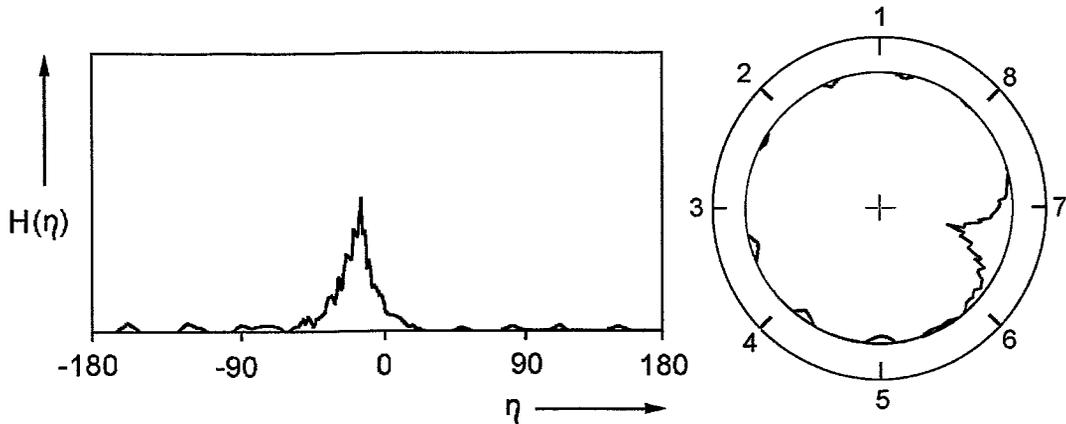
Die zuerst untersuchte Frage war die nach der Auslenkung des Reaktorkorbes beim Auftreten des Anschlaggeräusches. Dieser Zustand gibt den Ort der Auslenkung des Reaktorkorbes aus seiner Ruhelage zum Zeitpunkt des Anschlages wieder und konnte nach dem vorliegenden Erkenntnisstand über den Distanz-Charakter der Excore-Neutronenfluss-Schwankungen über die justierte Thie'sche Formel (4.1) aus den koordinatentransformierten Signalverläufen bestimmt werden. Von besonderem Interesse ist dabei, ob Anschläge jeweils bei gleicher Auslenkung auftreten oder nicht.

In der Abbildung 4.19 ist dieser Zustand durch den Winkel  $\eta_t$  des Polarkoordinatensystems  $(r_t, \eta_t)$  charakterisiert, wobei der Auslenkwinkel aus  $\eta_t = \text{Arc tan}(y_t/x_t)$  ermittelt wird, wenn  $x_t, y_t$  die Auslenkung zum Zeitpunkt des Maximums des Schallpegels darstellt.

Links in Abb. 4.19 ist die experimentell ermittelte Häufigkeitsverteilung  $H(\eta, \eta + \Delta\eta)$  für das Auftreten des Schallereignisses im Winkelintervall  $\eta, \eta + \Delta\eta$  für den Wertebereich  $-180^\circ < \eta_t \leq +180^\circ$  angegeben, wobei  $\eta_t = 0$  die x-Achse charakterisiert. Es zeigt sich, dass sich die Anschlagereignisse auf das Intervall zwischen  $-45^\circ$  und  $0^\circ$  konzentrieren, um ein Zentrum bei  $-22^\circ$ . Zusätzlich treten Anschläge in anderen Auslenkungspositionen mit deutlich geringerer Häufigkeit auf.

Rechts in Abb. 4.19 ist die experimentell ermittelte Häufigkeitsverteilung auf die Innenseite eines Kreises abgewickelt, und in einem äußeren Kreis sind die Positionen der Führungskeile im unteren Teil des angegebenen Druckbehälters eingezeichnet. Diese Darstellung erweckt den Eindruck, dass es einen Zusammenhang zwischen den Auslenkungsorten zum Zeitpunkt des Anschlages und den Orten der Führungskeile gibt. Eine vollständige Übereinstimmung beider Orte kann nicht erwartet werden, da – wie bereits erwähnt – die Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen neben der Auslenkung des Korbes auch Anteile örtlich unterschiedliche An-

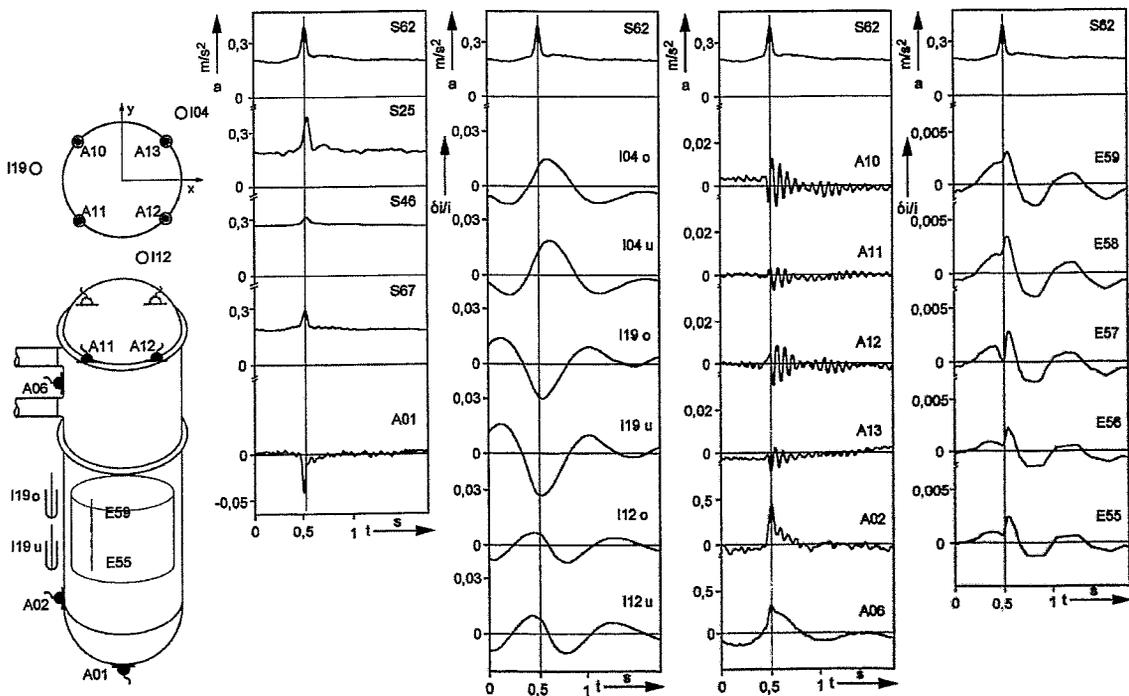
teile enthalten, die durch Relativbewegungen der Regelemente oder Brennstoffkassetten hervorgerufen werden.



**Abbildung 4.19**

- Links: Häufigkeitsverteilung  $H(\eta)$  der Anschläge, die im Körperschallsignal S62 detektiert werden, als Funktion des Auslenkungswinkels  $\eta$ , des Reaktororbzentrums. Der Auslenkungswinkel wurde aus den koordinatentransformierten Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen mit einer Auflösung  $\pm 1^\circ$  ermittelt. Die Anschläge sind im Bereich um  $-22^\circ$  (zwischen den Führungskeilen 6 und 7) konzentriert.
- Rechts: Darstellung der obigen Häufigkeitsverteilung in Polarkoordinaten. Die Nebenmaxima der Verteilung stimmen ungefähr mit den eingetragenen Positionen der Führungskeile überein.

Zur Ermittlung statistisch gut gesicherter Mittelfunktionen werden im folgenden nur diejenigen durch Triggerung erfassten Messwertfolgen herangezogen, die einer Auslenkung im Bereich um  $-22^\circ$  zugehören. Die resultierenden Mittelfunktionen in Abb. 4.20 repräsentieren den häufigsten Anschlagprozess.



**Abbildung 4.20**

Mittelfunktionen aus 180 Einzelmessungen, wobei das Körperschallsignal S62 (Regelementposition 09-52) als Triggersignal verwendet wurde.

Der typische Anschlagprozess von Abb. 4.20 zeigt folgende Eigenschaften:

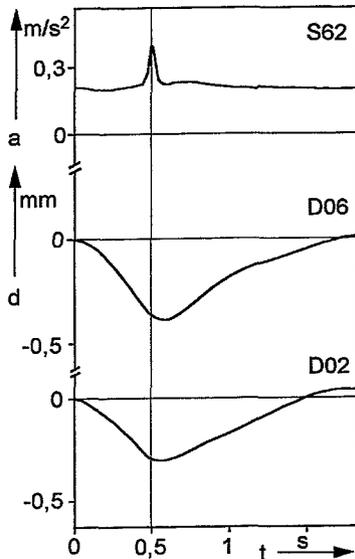
1. Der Anschlagprozess ist ein globaler Bewegungsvorgang; er äußert sich in allen physikalischen Parametern und in allen Messpositionen:
  - Im wesentlichen gleichzeitig erscheinen in den Signalen S62, S25, S46 und S67 der vier instrumentierten Regelelementschutzrohre impulsförmige Ereignisse. Der genaue Zeitpunkt, zu dem sie ihr Maximum erreichen, ist nur wenig unterschiedlich.
  - Kurze Zeit (etwa 20 ms) vor dem eingezeichneten Triggerzeitpunkt tritt ein deutlich ausgeprägter negativer Beschleunigungsimpuls im Signal A01 am Boden des Druckbehälters auf. Die Zeitverzögerung der Schallpegelsignale gegenüber diesem Impuls ist eine Folge der Tiefpassfilterung bei der Demodulationsprozedur und also nur scheinbar. Die Dirac-Form des Beschleunigungsimpulses B01 zeugt jedoch von einer Stoßanregung des gesamten Druckgefäßes.
  - Die Beschleunigungssignale A10 ...A13 am Druckbehälterflansch in der dritten Spalte zeigen eine typische Stoßanregung der Balken-Mode-Pendelschwingung des gesamten Druckbehälters als Folge des Anschlags. Die dabei angeregte Eigenfrequenz von etwa 12,6 Hz war schon bei früheren Anregungsexperimenten [52, 1985] identifiziert worden und wird wesentlich beeinflusst durch die Steifigkeit der Ringauflage.
  - Auch die Beschleunigungssignale an der Druckbehälter-Oberfläche A02 und A06 zeugen von der Stoßanregung. Während in der unteren Position A02 die Eigenfrequenz gut ausgeprägt ist, dominiert in der oberen Position A06 ein niederfrequenter Anteil, und die Signalform ist ähnlich der der Neutronenfluss-Schwankungen I04u,l und I12u,l. Aus dem umgekehrten Vorzeichen von A02 und dem der Neutronenfluss-Schwankungen der nahegelegenen Ionisationskammern I19u,l folgt unmittelbar, dass sich Reaktorkorb und Druckgefäß beim Stoß entgegengesetzt bewegen.
2. Die Bewegung des Reaktorkorbes induziert eine Pseudo-Bewegung der freihängenden Regelelemente relativ zum Reaktorkorb wie in Abb. 4.1 skizziert. Diese Relativbewegung befindet sich in Gegenphase zur Korbbewegung und kann durch Analyse von Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen nicht nachgewiesen werden. Dagegen sind die n-β-Emissionsdetektoren, die sich in ihrer In-core Position mit der Spaltzone mitbewegen, empfindlich bezüglich der Relativbewegung benachbarter Regelelemente. Experimentelle und numerische Untersuchungen der Regelelementschwingungen bei anomalen Reaktorkorbbewegungen sind von Altstadt und Mitarbeitern durchgeführt worden [54, 1991], [55, 1993].

In der rechten Spalte von Abb. 4.20 sind die anschlag-korrelierten Signalverläufe von In-core Neutronenfluss-Schwankungen angegeben, deren Detektoren sich in nur 15 cm Abstand vom nächsten Regelelementzentrum befunden haben.

- Sie präsentieren die wohlbekannte Eigenfrequenz des Regelelementes von etwa 1,5 Hz, die deutlich verschieden ist von der in den Ex-core Positionen gefundenen Schwingung von etwa 0,8 Hz.
- Bemerkenswert ist die Impulsstruktur zur Zeit des Anschlages, für die es keine direkte Erklärung gibt, es sei denn eine Schockreaktion der Detektoren (Anschlagempfindlichkeit).
- Ebenso bemerkenswert ist die mehrfach eckige Signalform, die nach dem Anschlag im Core auftritt und besonders in der untersten Position besonders markant ist. Leider kann die Hypothese nicht geprüft werden, inwieweit die zugehörige Trajektorie des benachbarten Regelelementes das Hexagon des Führungskanals abbildet, denn die erforderliche zusätzliche Messinformation senkrecht zur vorhandenen ist auch durch

Separationsansätze aus den vorliegenden anderen Signalverläufen nicht extrahierbar. Jedoch entsteht auch so schon der Eindruck, dass die Relativbewegung des Regелеlementes durch den Führungskanal begrenzt sein kann.

3. Ferner kann eine ergänzende Information zum Verhalten des anschlag-korrelierten Verlaufs aus den Beschleunigungssignale A02, A06 abgeleitet werden, indem diese Signal-



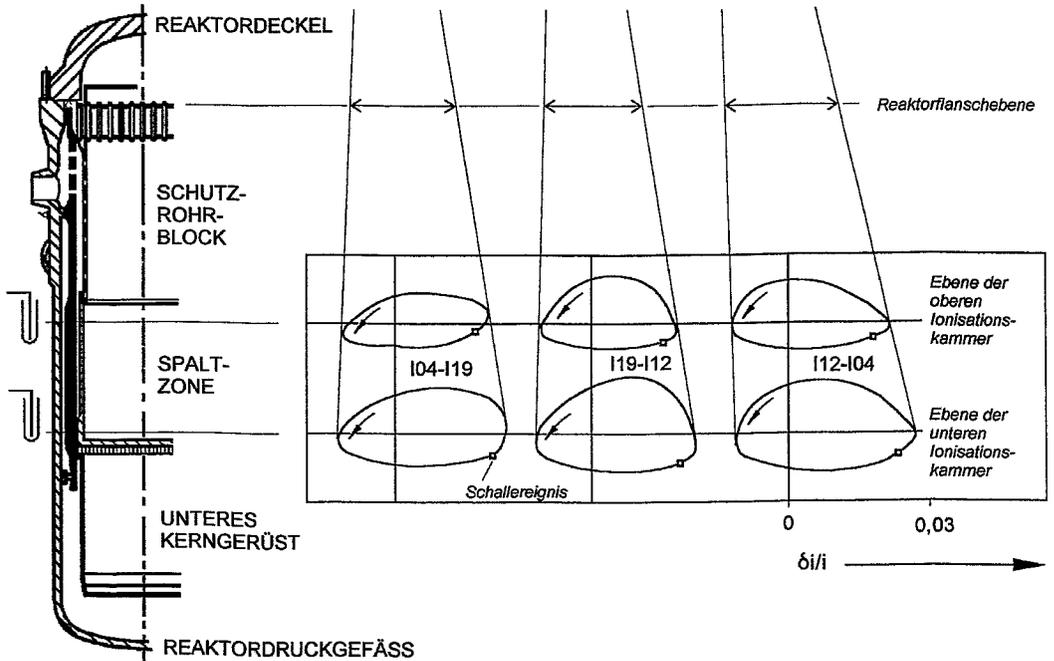
**Abbildung 4.21**

Durch zweimalige Integration nach der Zeit werden aus den Beschleunigungen A06 und A02 von Abb. 4.20 Distanzsignale erzeugt, die die Bewegung des Druckgefäßes als Folge des zur Triggerung benutzten Anschlages beschreiben. Obwohl die Messpositionen sich oberhalb und unterhalb der Ringauflage befinden, haben die dort registrierten Auslenkungen gleiches Vorzeichen, d.h. die Bewegung erfolgt in gleicher Richtung. Bedauerlicherweise waren in orthogonaler Richtung keine Beschleunigungsaufnehmer installiert.

Verläufe wie in Abb. 4.21 durch zweimalige Integration in Wegsignale D02, D06 überführt werden. Diese stellen dann die Wegauslenkung von etwa 0,3 mm dar, die der Druckbehälter als Folge des intern stattfindenden Anschlages ausführt. Da sich beide Detektorpositionen zwar übereinander, aber ober- und unterhalb der Ringauslage befinden, ist zu vermuten, dass sich der RDB nach dem Anschlag als Ganzes bewegt.

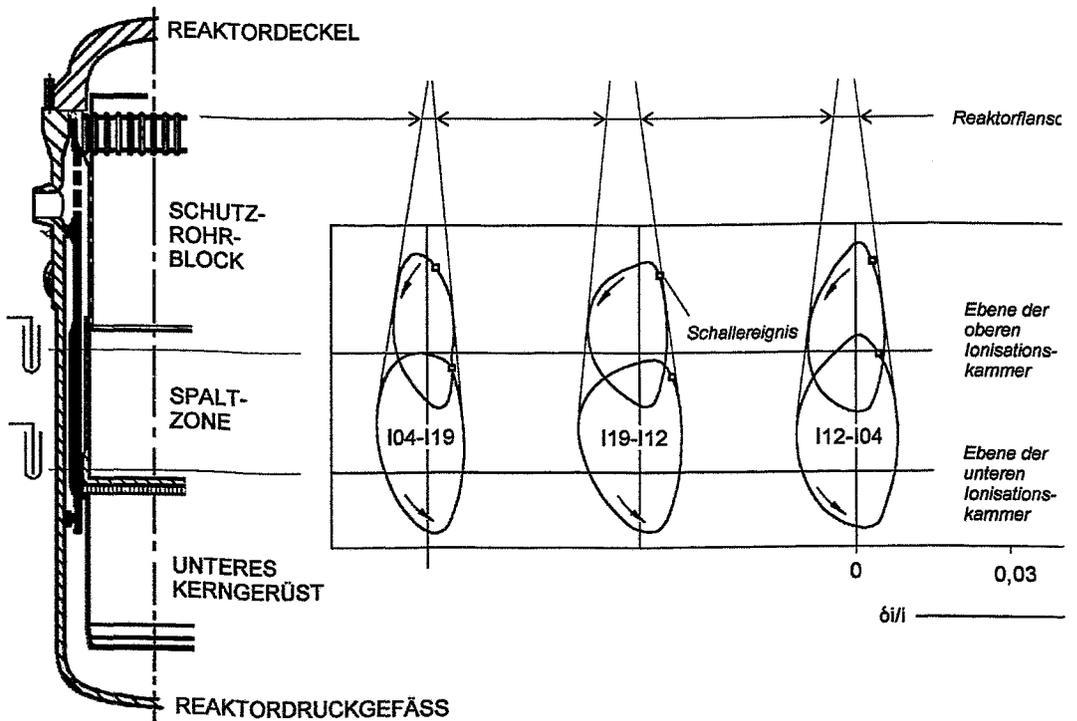
4. Um durch die Installation zusätzlicher Messwertgeber möglichst weitere Ergebnisse aus den Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen abzuleiten, wurden in den Messorten I04, I12 und I19 spezielle Ionisationskammern<sup>43</sup> eingesetzt, die jeweils eine Messkammer in Höhe Oberkante und Unterkante der Spaltzone enthielten. In den Abbildungen 4.22 und 4.23 sind unter Verwendung der Signalverläufe der Neutronenfluss-Schwankungen die mittleren Trajektorien in Höhe Oberkante und Unterkante der Spaltzone dargestellt, und zwar für alle möglichen Detektorpaarungen und in der Projektion in x-Richtung (Abb. 4.22) und in y-Richtung (Abb. 4.23). Dabei ist der Anschlagzeitpunkt jedesmal markiert. Die Trajektorien stellen geschlossene Bahnkurven von 1,2 Sekunden Dauer dar. Die Kurven sind in den jeweils zugehörigen Messebenen eingezeichnet, wobei natürlich die obere Bahnkurve eine geringere Amplitude haben muss, folgt man der Vorstellung einer Pendelbewegung mit Drehpunkt in Höhe der Auflage des Reaktorkorbes.
- Die verschiedenen Detektorpaarungen sehen Details der Bewegung infolge Überlagerung mit lokalen Prozessen durchaus unterschiedlich, darauf war schon mehrfach hingewiesen worden.
  - Die Auslenkungen in x-Richtung sind mehr als doppelt so groß wie in y-Richtung.
  - Die dargestellte Periode der Trajektorien ist rechtsdrehend.
  - Zeichnet man aber in Abb. 4.22 die Tangenten an die übereinander liegenden Bahnkurven und extrapoliert die Tangenten bis zur Ebene der Flanschauflage, so müssten sich die Tangenten dort kreuzen. Das ist bei weitem nicht der Fall: der Pendelbewegung scheint eine Parallelverschiebung des Reaktorkorbes überlagert zu sein. Das gilt für die Bewegung in x-Richtung (Abb. 4.22) ganz ausgeprägt, weit weniger aber für die Bewegung in y-Richtung (Abb. 4.23).

<sup>43</sup> Sonderanfertigung der AKJ4 aus der Fabrikation des IBJ Swierk (Polen) auf Grund der speziellen Order der Bearbeiter.



**Abbildung 4.22**

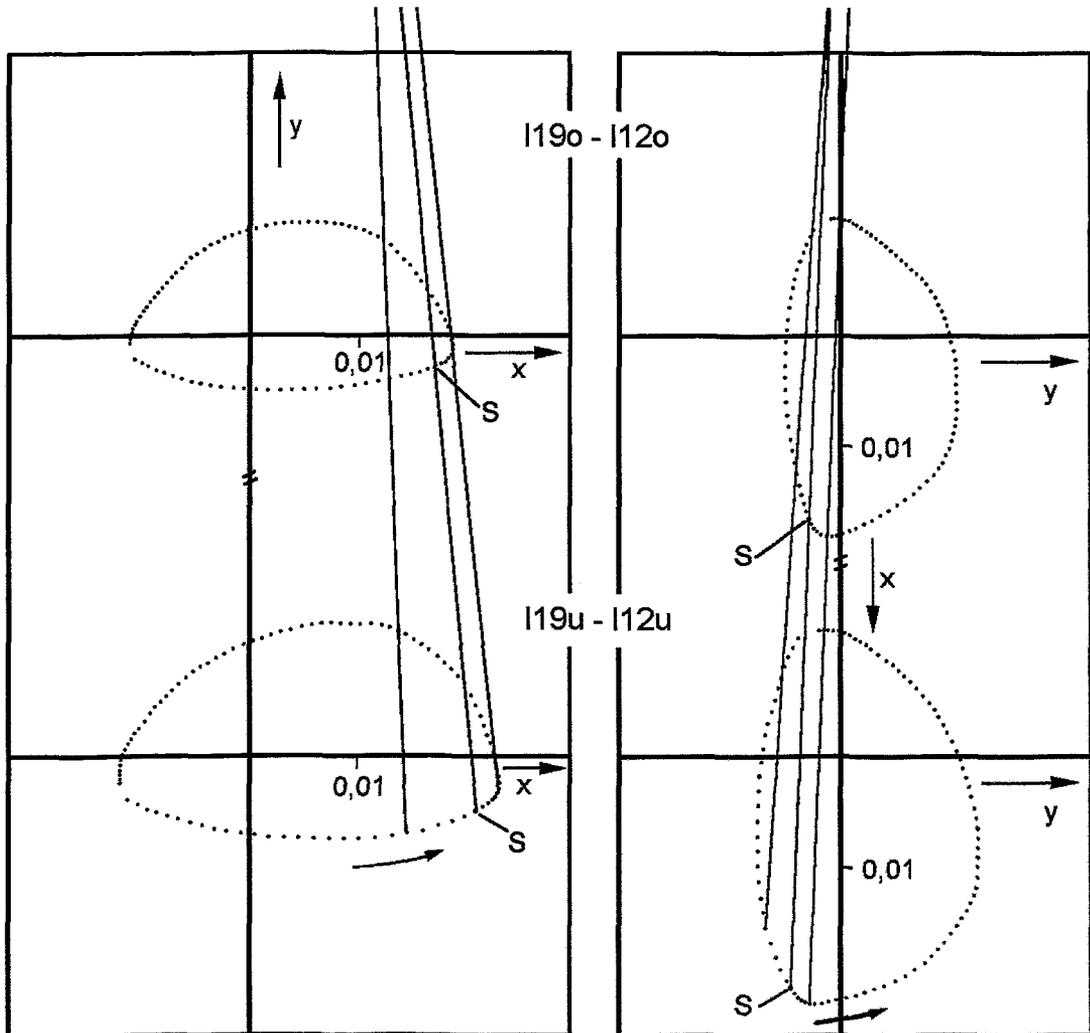
Mittlere Trajektorien des Reaktorkorbschwerpunktes, wie sie von den Ex-core-Neutronenfluss-Signalen wahrgenommen werden, mit der Extrapolation der  $x$ -Amplituden.



**Abbildung 4.23**

Wie Abb. 4.22, aber mit der Extrapolation der  $y$ -Amplituden.

- Die Detektorpaarung I04-I12 erweckt den Eindruck, dass der Reaktorkorb beim Bewegungsablauf schief hängt. Auch das gilt besonders für die x-Richtung<sup>44</sup>.
5. In Abb. 4.24 wird an einem Beispiel der Bewegungsablauf vor und nach dem Anschlag, wie er durch die Neutronenfluss-Trajektorien beschreiben wird, in seinem zeitlichen Ablauf dargestellt, indem die Bahnkurven als Punktfolge gleichen Zeitabstandes dargestellt ist. Geringe Bewegungsgeschwindigkeit entsprechen dann einer engen Punktfolge, größere Punktabstände entsprechen größeren Geschwindigkeiten. Die Tangenten sind eingezeichnet für den Zeitpunkt des Schallereignisses S sowie 100 ms zuvor und 100 ms danach.

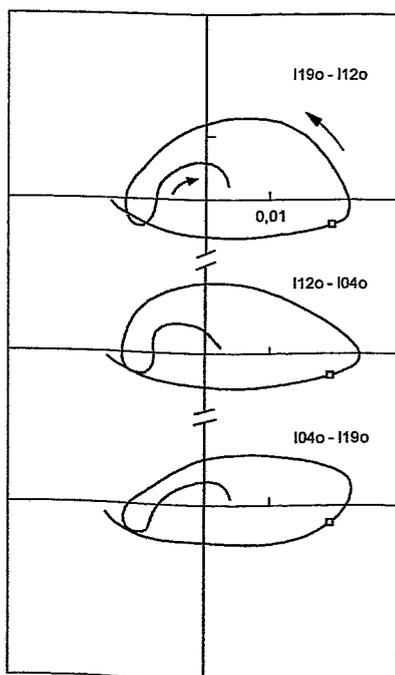


**Abbildung 4.24**

Detaillierte Darstellung der mittleren Neutronentrajektorie, wie sie die Ex-core-Neutronenfluss-signale in Höhe Oberkante und Unterkante der Splatzzone wahrnehmen. Der Zeitpunkt des Anschlages ist durch „S“ markiert. Die entsprechenden Punkte in oberer und unterer Ebene jeweils 100 ms vor und 100 ms nach dem Anschlag sind wie in den vorigen Abbildungen miteinander verbunden und charakterisieren den Bewegungszustand vor und nach dem Aufprall. Es ist deutlich erkennbar, dass sich der gesamte Reaktorkorb kurz nach dem Aufprall parallel verschiebt, während zuvor eine Pendelbewegung stattgefunden hat.

<sup>44</sup> Daraus könnte eine einseitige Belastung in der Flanschauflage des Reaktorkorbes folgen. Im Inspektionsbefund war eine einseitige Abarbeitung der Flanschauflage festgestellt worden.

- Die Darstellung zeigt, dass vor dem Anschlag eine Pendelbewegung dominiert, charakterisiert durch nichtparallele Tangenten. Die Geschwindigkeit beträgt in Höhe Unterkante Spaltzone etwa 7 mm/s.
  - Nach dem Anschlag verläuft über eine Zeitspanne von mindestens 100 ms die Bewegung des Reaktorkorbes parallel, und die mittlere Geschwindigkeit beträgt nur noch 1,5 mm/s.
  - Der Reaktorkorb verliert demzufolge beim Anschlag etwa 95 % seiner kinetischen Energie und gibt diese im wesentlichen an den Druckbehälter ab. Geringere Teile der Energie können auch zu Verschiebungen der Brennstoffkassetten als Folge ihrer Trägheit und zu Materialabtragungen (untere Führungskeile, Flanschauflage des Reaktorkorbes, Federrohrsegmente und Labyrinthdichtung) führen.
6. Abschließend werden in Abb. 4.25 die kompletten Trajektorien aus den Signalverläufen der Neutronenfluss-Schwankungen von Abb. 4.20 betrachtet. Es zeigt sich sehr deutlich, dass die mittlere Trajektorie ihre Drehsinn etwa 0,8 Sekunden nach dem Anschlag ändert.



**Abbildung 4.25**

*Vollständige Neutronenfluss-Trajektorien unter Verwendung der Mittelfunktionen von Abb. 4.20 in Höhe Oberkante der Spaltzone. Nach dem Anschlag bewegt sich der Reaktorkorb noch eine gewisse Zeit im gleichen Drehsinn und ändert erst später die Drehrichtung.*

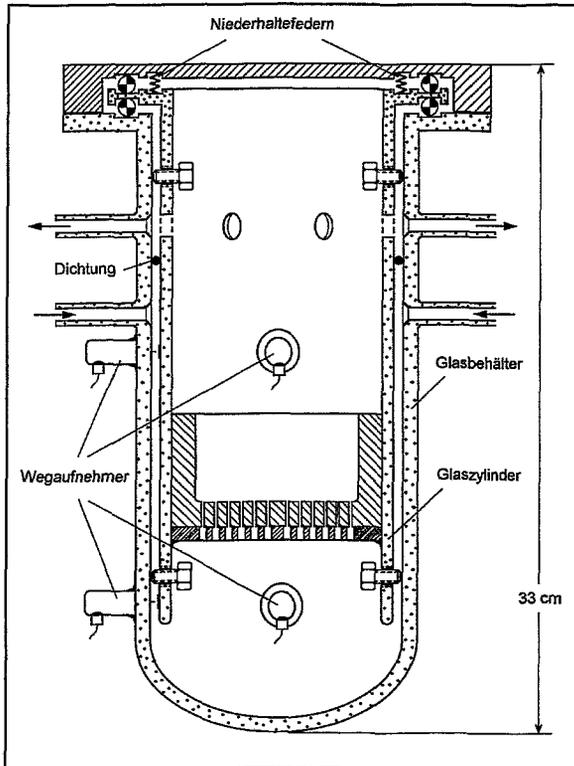
Da eine Analyse der Spektralleistung der Neutronenfluss-Schwankungen für die 180 Messdatenfolgen, aus denen die Mittelfunktionen abgeleitet wurden, ganz ähnliche Kohärenz- und Phasenfunktionen liefert wie in Abschnitt 4.5.3 beschrieben, ist der hier erfolgte Nachweis der Umkehr des Drehsinnes als eine Folge der Anschläge eine letzte wichtige Ergänzung zur Aufklärung der Vorgänge bei den anomalen Reaktorkorbschwingungen.

Für eine Überwachung reicht es beim vorliegenden Wissensstand tatsächlich aus, die Kohärenz- und Phasenbeziehungen zu überwachen, um sicher zu sein, dass sich der grundlegende Charakter des Schwingungsprozesses nicht geändert hat.

Wie allerdings die Anschläge, die dadurch erzeugten Belastungen des Druckgefäßes und mögliche Auswirkungen auf die zuverlässige Funktionsweise der internen Komponenten vom Standpunkt der Reaktorsicherheit aus zu bewerten sind, ist damals (1986) trotz mehrfacher dringlicher Hinweise der Bearbeiter an den Betreiber von diesem aus uns nicht bekannten Gründen nicht untersucht worden. Vielmehr wurden die aus den Mittelfunktionen folgenden Untersuchungsergebnisse ignoriert mit dem Hinweis, dass das sowjetische Allunionsinstitut lediglich eine Überwachung der mittleren Schwankungsamplitude empfohlen und festgelegt habe, dass erst bei deren Veränderung weitere Untersuchungen und ggf. auch Maßnahmen nötig seien.

#### 4.5.9 Experimentelle Untersuchungen an einem Labormodell

Um das prinzipielle physikalische Verhalten eines unzureichend eingespannten Reaktorkorbes im Innern des Druckbehälters zu untersuchen, wurde ein sehr einfaches Labormodell entwickelt wie in Abb. 4.26 skizziert.



**Abbildung 4.26**

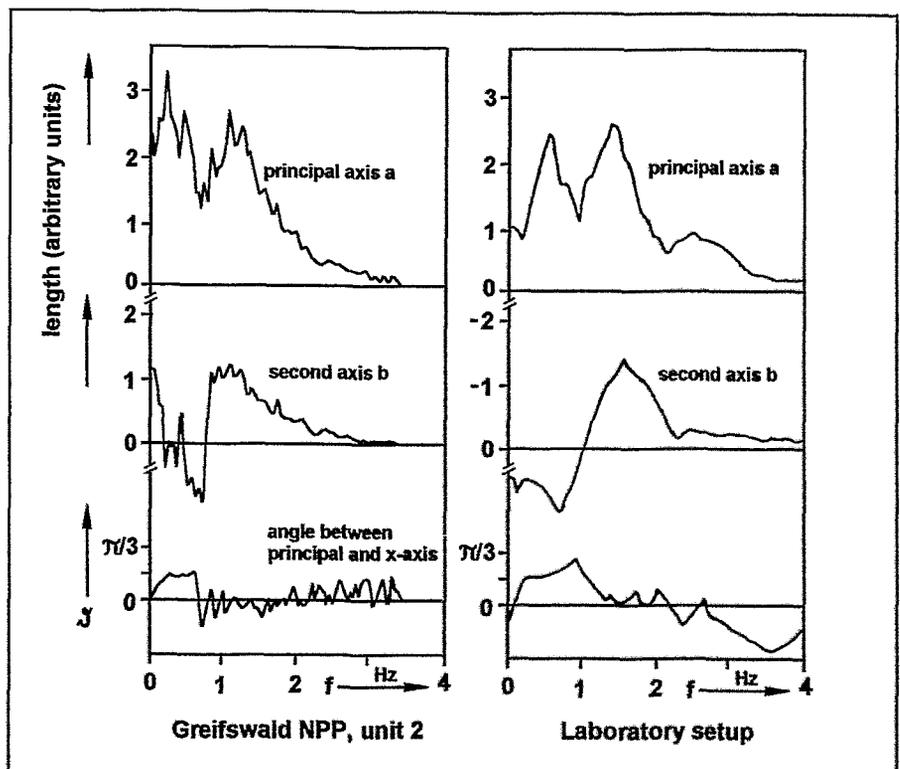
Gläserne Versuchsanordnung zur direkten experimentellen Untersuchung der strömungsinduzierten anomalen Reaktorkorbschwingungen unter Verwendung von Wegaufnehmern in orthogonalen Messpositionen in zwei verschiedenen Höhenpositionen.

Anstelle der Federrohrsegmente sind hier sechs variable Spiralfedern eingesetzt. Um eine ausreichende Beweglichkeit auch bei geringer Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen ist der Korbflansch auf Kugeln gelagert. Die Dichtung besteht aus Gummi.

In diesem Modell sind nur die allerwichtigsten Strukturkomponenten realisiert. Die Niederhaltefedern wurden so eingestellt, dass sich im Rahmen des einstellbaren Wasserdurchsatzes sowohl Bewegungslosigkeit als auch schlingende Bewegungen des inneren Glaszylinders ergab. Mit Hilfe des Schraubenspiels wurde der Frequenzbereich eingestellt. Im Falle der schlingenden Be-

wegung ist eine deutliche Verschiebung der zentralen Achse des inneren Zylinders zu beobachten.

**Abbildung 4.27:** Haupt- und Nebenachsen  $a$ ,  $b$  sowie der Orientierungswinkel  $\vartheta$  zwischen Hauptachse und  $x$ -Achse wie sie am Block 2 des KKW Greifswald (links) und am Laborversuchsstand ermittelt wurden. Zur Verdeutlichung der Ähnlichkeit sind die Vorzeichen der Nebenachse unterschiedlich gewählt.



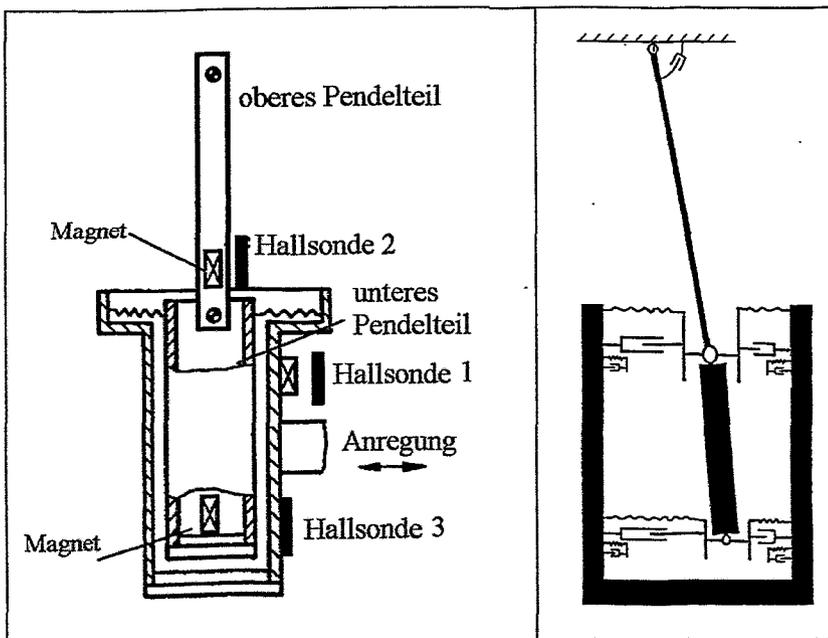
Die in orthogonalen Positionen gemessenen Wegauslenkungen wurden einer Kreuzspektralanalyse unterzogen. Aus dem Kreuzleistungsspektrum wurden die Parameter A, B und  $\rho$  einer elliptischen Bahnkurve nach den Gln. (4.9) bis (4.12) ermittelt. Das Ergebnis zeigt Abb. 4.27. Mit Ausnahme des umgekehrten Drehsinnes, gekennzeichnet durch das Vorzeichen der Nebenachse B, ist die Ähnlichkeit der Ergebnisse bemerkenswert.

Am Labormodell konnte außerdem gezeigt werden, dass der Drehsinn durch das einströmende Wasser beeinflusst werden kann. Verändert man die Richtung des einströmenden und auf den inneren Zylinder prallenden Wassers, kann der Drehsinn umgekehrt werden.

#### 4.5.10 Regelelementschwingungen bei anomalen Reaktorkorbbewegungen

Die anschlag-korrelierten Signalverläufe der In-core Neutronenfluss-Schwankungen in Abb. 4.20, rechte Spalte, werfen die Frage auf, ob die Anschläge der Regelelemente an die benachbarten Brennstoffkassetten auch auf anderem Wege verifiziert werden können. Als Anhaltspunkt für diese Untersuchungen dienten die überraschenden und zunächst unverstandenen experimentell ermittelten, nahezu linearen Phasenbeziehungen sowohl von In-core Neutronenfluss-Schwankungen in unterschiedlichen, weit voneinander entfernten Messpositionen untereinander als auch zwischen In-core und Ex-core Neutronenfluss-Schwankungen.

Dazu wurden von ALTSTADT u.a. [54, 1991], [55, 1993] einerseits experimentelle Untersuchungen an einem einfachen physikalischen Modell nach Abbildung 4.28 durchgeführt, wobei der äußere Behälter über einen Shaker angeregt wurde und Anregung ebenso wie die Bewegung des Pendels im Führungskanal unter Verwendung von Relativwegaufnehmern bei unterschiedlich intensiver Anregung gemessen wurde.



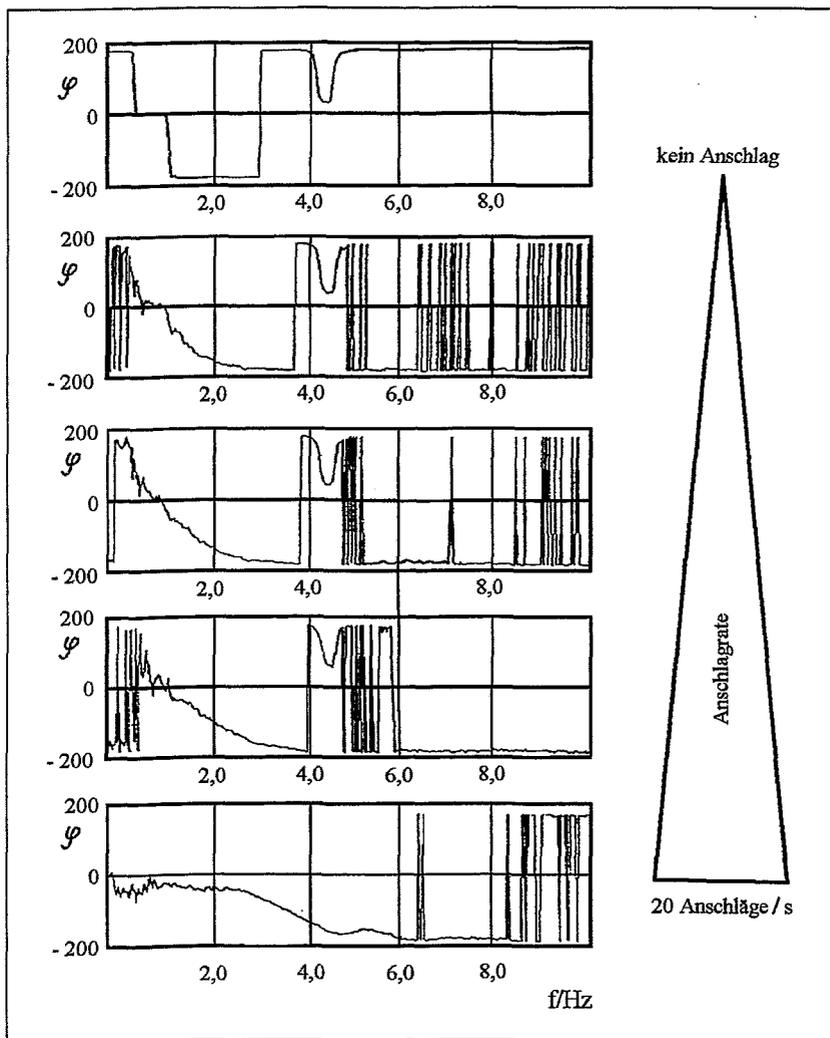
**Abb. 4.28**

Physikalisches (links) und theoretisches Pendelmodell zur Untersuchung der nichtlinearen Bewegungsvorgänge, die ein Pendel ausführt, das sich innerhalb eines zu Schwingungen angeregten Zylinders befindet und durch Anschläge des Führungskanales zu Schwingungen angeregt wird.

Untersucht werden Kohärenz- und Phasenbeziehungen zwischen Anregung (Hallsonde 1) und Bewegungsablauf (Hallsonden 2 und 3).

(Nach ALTSTADT [54, 1993].)

Die dabei auftretenden freien und Anschlagbewegungen des Doppelpendels können andererseits durch einen Satz von Bewegungsgleichungen beschrieben werden mit einem zeitlich veränderlichen Spalt zwischen Pendel und Kanalwand, wobei beim Erreichen der Spaltbreite Null zwischen verschiedenen linearen Lösungen hin- und hergeschaltet wird. Aus mit Hilfe des Simulationscodes NLSYS simulierten Zeitreihen werden dann Auto- und Kreuzspektralleistungen ermittelt.



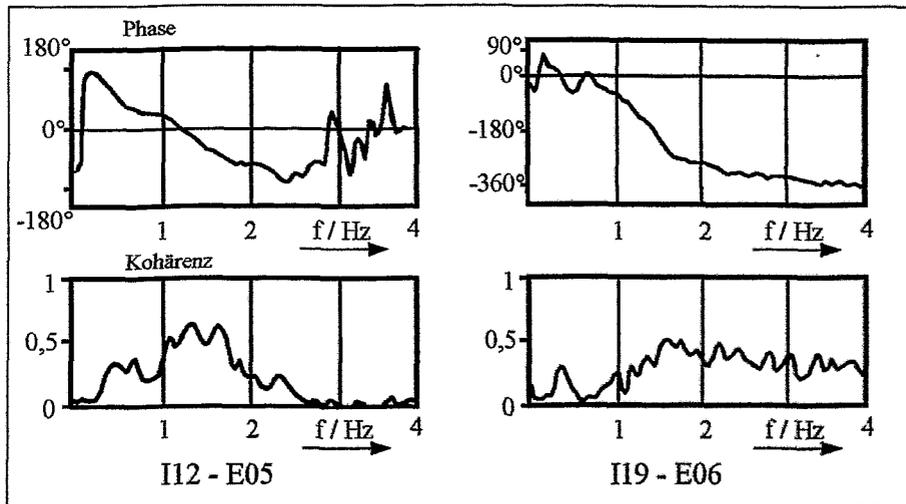
**Abbildung 4.29**

Experimentell ermittelte Phasenfunktionen  $\varphi(f)$  zwischen Anregung des Führungskanals und der Pendelschwingung in Abhängigkeit von der Anzahl der Anschläge des Pendels an den Führungskanal (Anschlagrate)

Modellexperimente und Simulation zeigten übereinstimmend, dass mit wachsender Anschlagrate die Phasenbeziehung zwischen Wegerregung und Relativverschiebung des Pendelfußpunktes zunehmend linearer wird, wie in Abb. 4.29 dokumentiert.

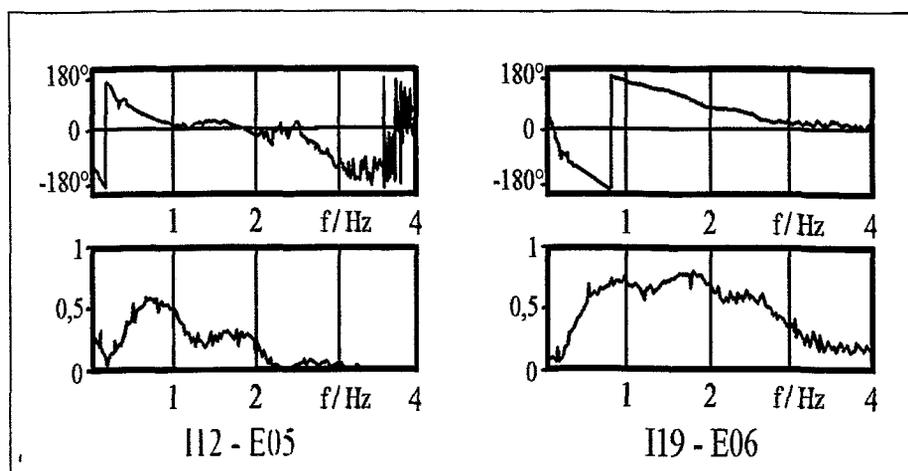
Einzelheiten des Verfahrens sind in [55, 1993] beschrieben.

Abb. 4.30a zeigt typische Phasen- und Kohärenzbeziehungen zwischen In-core und Ex-core Neutronenrauschen, wie sie am Block 2 des KKW Greifswald zu Jahreswechsel 1985/86 gefunden wurden. Sowohl der etwa lineare Phasengang als auch die Struktur der Kohärenzfunktion erwecken den Eindruck eines Transporteffektes. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Signalkombinationen resultieren aus den in den unterschiedlichen In-core Positionen der Regelelemente bestehenden Anregungsbedingungen in Richtung der Messpositionen.



**Abbildung 4.30a**

Phasengang und Kohärenz im Kreuzspektrum von Ex-core und In-core Neutronenrauschen bei anomalen Reaktorkorb-bewegungen.



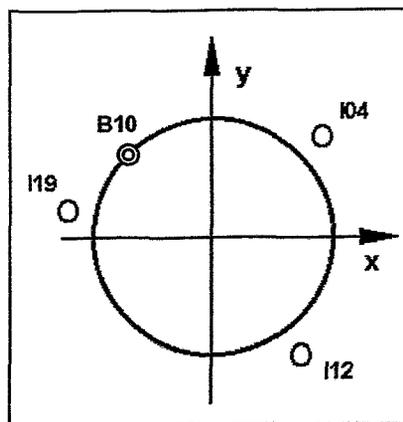
**Abbildung 4.30b**  
Phasengang und Kohärenz im Kreuzspektrum der Wegerregung und Pendelbewegung, an obige Messergebnisse angepasst durch Variation von Anregungsintensität und Spaltweite.

Abb. 4.30b zeigt die zugehörigen Simulationsergebnisse, die sich durch Variation der Modellparameter Spaltweite und rms-Wert der Anregung erzielen lassen. Nicht ganz so gut gelingt eine Anpassung der Kohärenz- und Phasenbeziehungen des In-core Neutronenrauschens verschiedener Positionen, da deren jeweilige Umgebungsbedingungen recht unterschiedlich sein können. Insbesondere die experimentell ermittelte Kohärenz kann durch lokale Rauschteile auch erhebliche vermindert sein.

Die methodische Bedeutung dieser Untersuchungen und Ergebnisse besteht in der Erkenntnis, dass nicht nur die bekannten „Transporteffekte“ (Transport von Kühlmittelschwankungen oder Borsäurekonzentrationschwankungen) in Kernreaktoren lineare Phasenbeziehungen im Kreuzleistungsspektrum zur Folge haben, sondern dass auch ein nichtlinearer Bewegungsprozess überaus ähnliche Abbildungen in Phasengang und Kohärenz des Kreuzleistungsspektrums liefern kann.

#### 4.6 Phänomenologische Beschreibung des normalen Schwingungsverhaltens<sup>45</sup>

Alle bisher im Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse und Phänomene bezogen sich auf den Betriebszustand der anomalen Reaktorkorbbewegungen am Block 2 des KKW Greifswald. Nach der Generalinstandsetzung im Oktober 1986 und nochmals im Juni 1988 konnte das normale Schwingungsverhalten untersucht werden, da inzwischen auch die Regelelementschwingungen beseitigt worden waren. Die Spektralleistungen der Neutronenfluss-Schwankungen konnten erstmals bis zu niedrigen Werten von  $10^{-12}$  untersucht werden, ein Pegel, der zuvor infolge der Restanteile von Anschlägen der Regelelemente nicht aufgelöst werden konnte. Durch die



**Abbildung 4.31**

Schematische Darstellung der Detektorpositionen am Block 2 des KKW Greifswald bei normalem Schwingungsverhalten und bei voller Leistung im Oktober 1986 und Juli 1988.

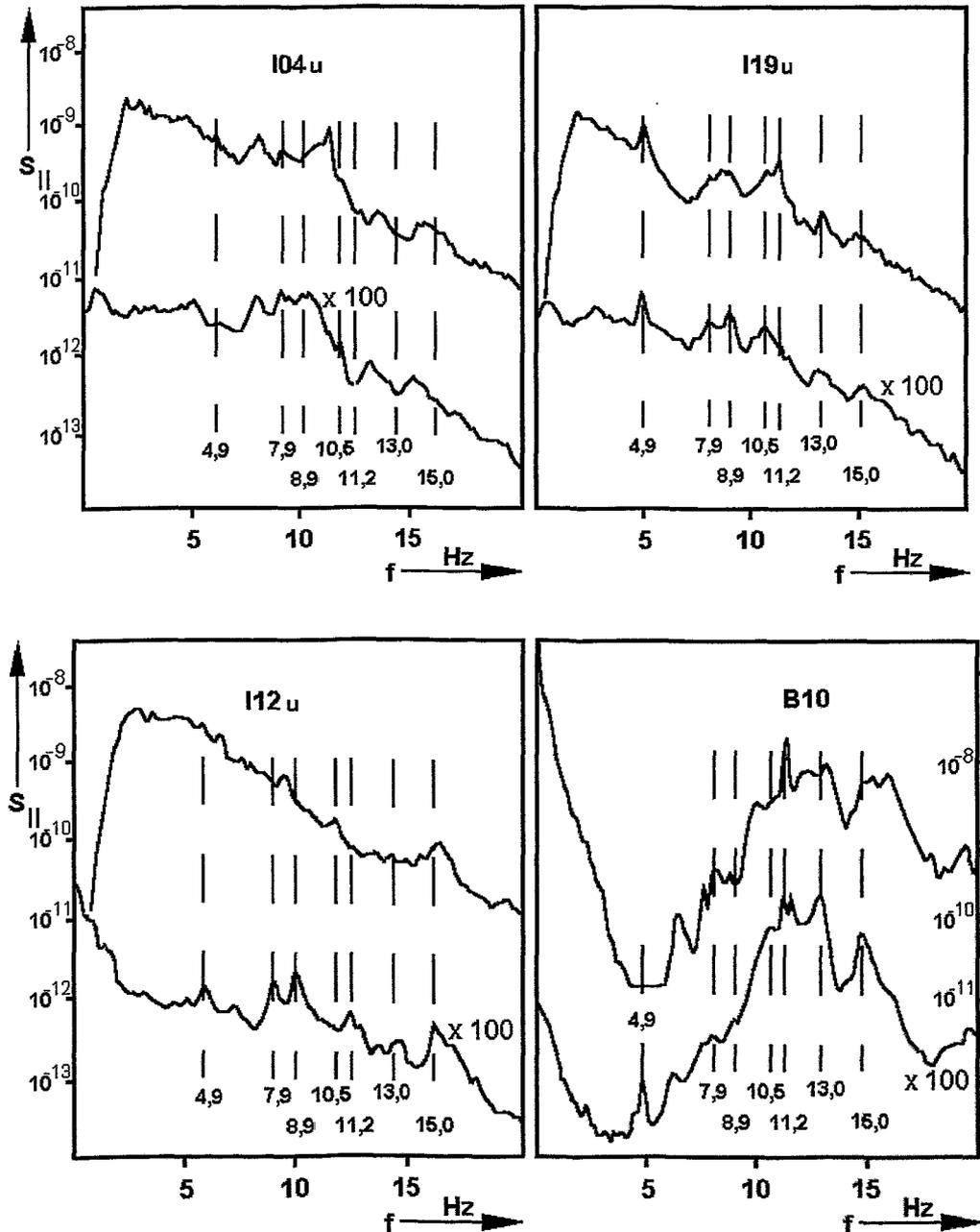
Reparaturen der Führungskeile und -nuten sowie durch Einbau von neuem Federrohrsegmenten waren auch die anomalen Bewegungsmöglichkeiten nicht mehr gegeben, wie im folgenden überzeugend nachgewiesen wird.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind hier nur in dem Umfang dargestellt, in dem sie die Unterschiedlichkeit der Schwingungen und ihre Normalität repräsentie-

<sup>45</sup> Dieses Schwingungsverhalten wurde bei späteren Untersuchungen im KKW Dukovany [56] allgemein bestätigt.

ren. Ausführlicher ist in [56, 1998] darüber berichtet.

Für die Untersuchungen im Oktober 1986 standen nur die drei Ex-core Ionisationskammern und ein Beschleunigungsaufnehmer B10 am Druckbehälterflansch bereit, siehe Abbildung 4.31. Im Juli 1988 waren dagegen Doppel-Ionisationskammern<sup>46</sup> in Höhe Ober- und Unterkante der Spaltzone verfügbar.



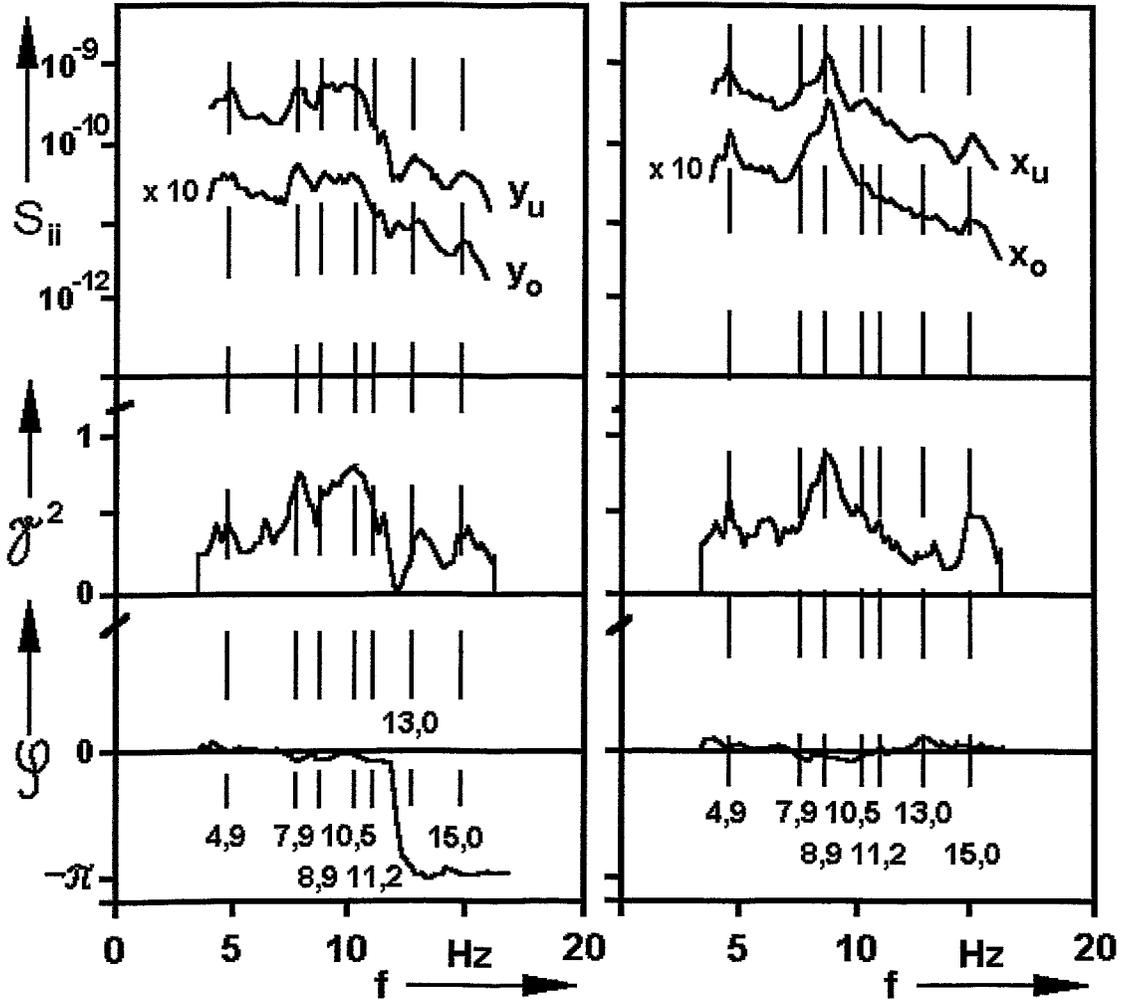
**Abbildung 4.32**

Normalisierte Autospektralleistungen der Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen und der Beschleunigung B10 (am Reaktorflansch) nach der Reparatur des Blockes 2 im KKW im Oktober 1986 (oben) und im Juli 1988 (unten). Die Resonanz im Gebiet um 8 Hz rührt vom Schwingverhalten der Hauptkühlmittelpumpen her und spaltet sich im Laufe der Zeit auf. Eine ähnliche Aufspaltung ist im Beschleunigungssignal B10 im Bereich um 11 Hz erkennbar.

<sup>46</sup> Die Ionisationskammersignale sind hochpassgefiltert aufgezeichnet worden, um die Signaldynamik nicht durch das Magnetbandgerät zu beschneiden.

Die Autospektralleistungen beider Untersuchungszeiträume sind in Abb. 4.32 angegeben. Die signifikanten Resonanzen bei 4,9 Hz, 7,9 Hz, 8,9 Hz, 10,5 Hz, 11,2 Hz, 13,0 Hz und 15,0 Hz sind in allen folgenden Abbildungen markiert. Mit Ausnahme der Resonanzen im Gebiet von 8 bis 9 Hz sind diese Frequenzen nahezu identisch mit denen an anderen WWER-440-Blöcken [56, 1998].

Anschaubarer sind die Darstellungen aus der Kreuzspektralanalyse  $S_{ou}$  der koordinatentransformierten Neutronenfluss-Schwankungen  $x_{ou}$ ,  $y_{ou}$  in Höhe Ober- und Unterkante der Spaltzone vom Juli 1988 in Abb. 4.33.



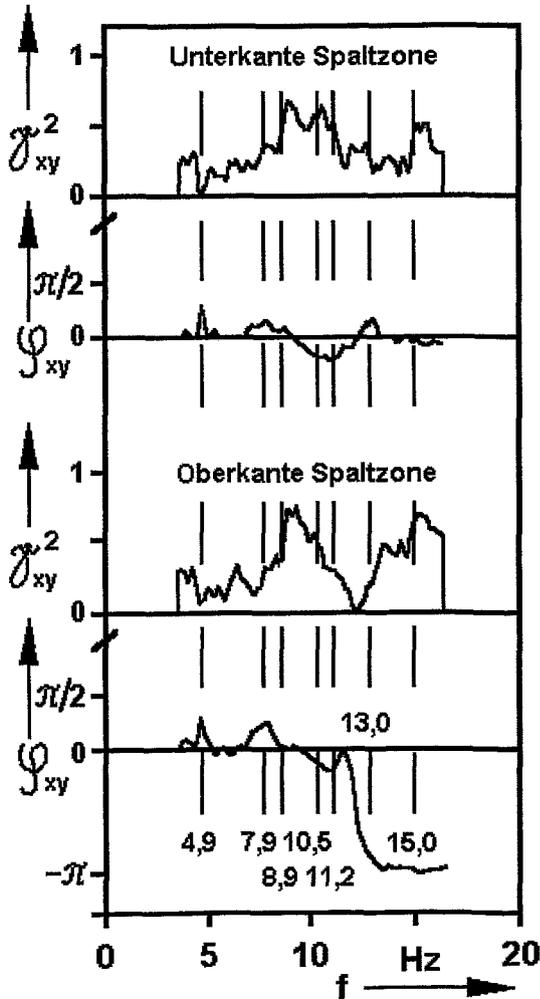
**Abbildung 4.33**

Normalisierte Autospektralleistungen und zugehörige Kohärenz- und Phasenfunktionen der koordinatentransformierten Neutronenfluss-Schwankungen in Höhe Oberkante und Unterkante der Spaltzone (Juli 1988, KKW Greifswald Block 2). Zur Verbesserung der Rechengenauigkeit sind die Neutronenfluss-Schwankungen bandpassbegrenzt.

Abb. 4.33 zeigt:

1. Die Ähnlichkeit der Spektren in oberer und unterer Position und die Größe der Signalverwandtschaft  $\gamma^2$  rechtfertigt die Koordinatentransformation.
2. In x-Richtung dominiert die Resonanzfrequenz 8,9 Hz, während in y-Richtung die Frequenzen 7,9 Hz und 8,9 Hz gleich gut ausgeprägt sind.

3. Die Phasenfunktionen  $\varphi_{ou}$  sind in beiden Richtungen bis etwa 12 Hz ähnlich.
4. Unerwartet und unerklärlich ist die Tatsache, dass die 8,9 Hz-Resonanz in x-Richtung in Höhe Oberkante der Spaltzone größer ist als weiter unten.
5. Überraschend ist auch der unterschiedliche Phasengang  $\varphi_{ou}$  in x- und y-Richtung oberhalb 12 Hz. Der Übergang zwischen geringer Phasendifferenz zu Gegenphasigkeit in y-Richtung ist wie üblich begleitet von sehr geringen Kohärenzwerten.



**Abbildung 4.34:**

Kohärenz  $\gamma_{xy}^2$  und Phasenfunktion  $\varphi_{xy}$  der koordinatentransformierten Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen in Höhe Ober- und Unterkante Spaltzone.

Während in Höhe Unterkante die Phase um Null variiert, erreicht sie in der Oberkante sprunghaft für Frequenzen > 12 Hz den Wert  $180^\circ$ .

(KKW Greifswald Block 2, Juli 1988)

Die Ergebnisse der Abb. 4.33 werden in Abb. 4.34 durch Kohärenz und Phasengang zwischen den Richtungen x, y in beiden Messebenen ergänzt. Überraschend ist die Tatsache allgemein geringerer Kohärenzwerte in Höhe Unterkante der Spaltzone, obwohl hier die um den Faktor 2 größeren Spektralleistungen vorliegen. Oberhalb 12 Hz ist der Drehsinn oben negativ und unten positiv.

Aus dem Ergebnis der Kreuzspektralanalyse von Abb. 4.34 können in bekannter Weise die Haupt- und Nebenachsen A, B und die Orientierung der Hauptachse einer elliptisch angenommenen Drehbewegung ermittelt werden. Sie sind in Abb. 4.35 dargestellt.

1. Die Verläufe von Haupt- und Nebenachse sind in oberer und unterer Messebene paarweise ähnlich.
2. Das Verhältnis der Amplituden in oberer und unterer Messebene liegt bei 2:3 und

stimmt ungefähr mit dem Verhältnis des Abstandes von der Flanschauflage überein.

3. Der Drehsinn wechselt in oberer und unterer Messebene in gleicher Weise.
4. Die Orientierung der Hauptachse schwankt in beiden Messebenen in gleicher Weise und nur geringfügig um  $45^\circ$ .

Im ganzen zeigt sich, dass im Frequenzbereich von 8 bis 16 Hz Schwingungserscheinungen auftreten, die dem Reaktorkorb, der Spaltzone und auch dem Reaktordruckbehälter zugeordnet werden können. Ordnet man sie allein dem Reaktorkorb zu, so folgt aus der Thie'schen Formel (4.1) eine Gesamtamplitude  $\approx 60 \mu\text{m}$ . Ähnliche Werte sind aus den Untersuchungen von BASTL und Mitarbeitern [37, 1974] bekannt.

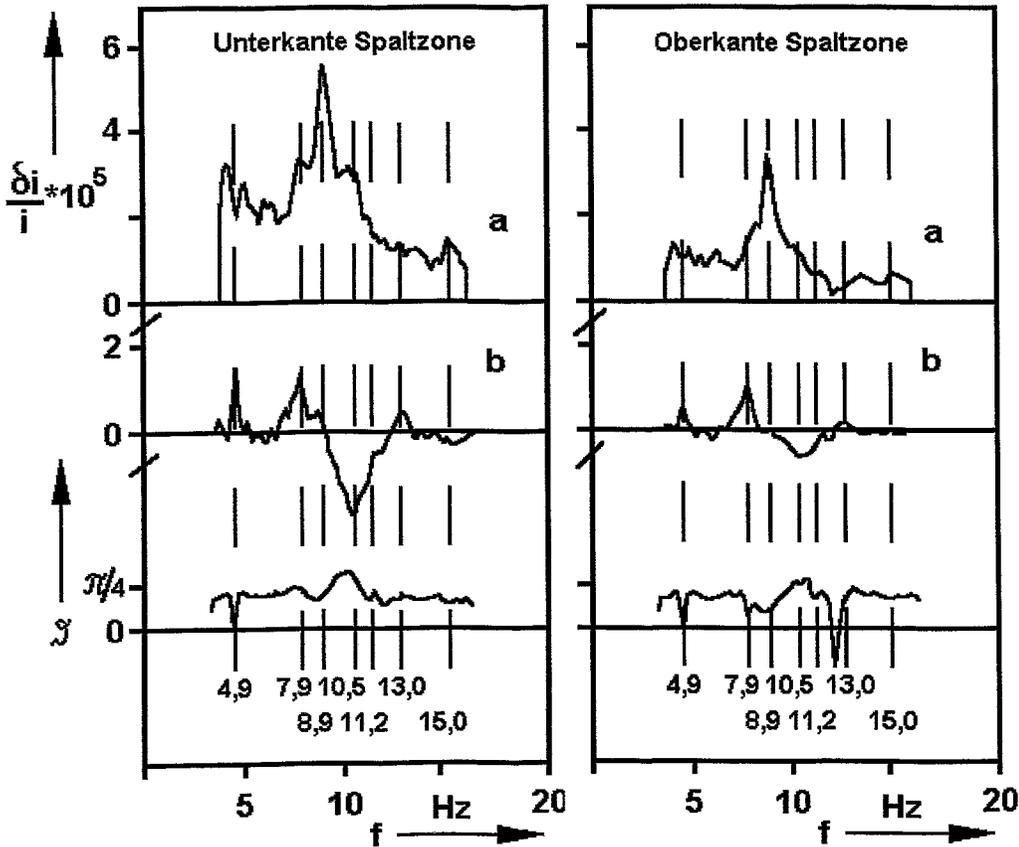


Abbildung 4.35

Ellipsenparameter (Hauptachse  $a$ , Nebenachse  $b$  und Winkel  $\rho$  zwischen  $x$ -Achse und Hauptachse) in Höhe Ober- und Unterkante Spaltzone, errechnet aus den Kreuzspektren der koordinatentransformierten Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen (KKW Greifswald, Block 2, Oktober 1988)

## 5. Abschließende Bemerkungen

Beide mechanischen Schwingungsphänomene, die in diesem Bericht beschrieben sind, haben in der Vergangenheit an WWER-Reaktoren Betriebsstörungen an den Druckbehälter-Einbauten der WWER-440/230-Reaktoren hervorgerufen. Sie äußern sich deutlich in Ex-core-Neutronenfluss-Schwankungen und können, sofern die eindeutig identifiziert sind, durch eine konventionelle Analyse der zugehörigen Spektralleistung überwacht werden. Die Nachweispflichtigkeit ist ausreichend für eine Fehlerfrüherkennung.

Die Betriebsstörungen und Beschädigungen, die durch diese Schwingungen von Reaktoreinbauten hervorgerufen werden, weisen deutlich auf die Vorteile hin,

- die ein Mess-System, das in größerem Umfang mit Sensoren für unterschiedliche physikalische Größen in unterschiedlichen Positionen ausgerüstet ist, bietet, und
- das sowohl konventionelle als auch unübliche Signalanalyse-Verfahren anbietet, die geeignet sind, zusätzliche Informationen über den Schwingungsprozess wie Anschläge, Transienten, wiederholte Abläufe und deren Häufigkeit zu ermitteln.

Bei Anwendung solcher prozess-geführter Signalanalysemethoden wird der Fachmann in die Lage versetzt, aus experimentellen Befunden auf die diagnostische Bedeutung eines Schwin-

gungsprozesses, auf Komponentenbelastungen, auf zu erwartende Beschädigungen und auf vorzubereitende Reparaturtechnologien zu schließen.

## 6. Danksagung

Der vorliegende Bericht basiert auf den Arbeiten der Abteilung Reaktordiagnostik im ehemaligen Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf, die unter der Leitung von P. LIEWERS mehr als 30 Jahre lang die Einsatzvorbereitung und den Betrieb der WWER-Kraftwerks-Reaktoren auf ostdeutschem Gebiet kritisch begleitet hat. Die zugehörigen wichtigsten Originalarbeiten der Mitarbeiter sind im nachfolgenden Quellenverzeichnis enthalten.

Die Fachkollegen H. ABEL, U. KUNZE, U. NESTLER, F. REINHOLD und M. STREICH aus dem Kernkraftwerk (KKW) Greifswald und auch J. HEYER und R. JANKE aus dem Kernkraftwerksanlagenbau (KAB) Berlin haben über viele Jahre Sensorinstallation, Systemwartung und eine große Anzahl von Messungen oft unter schwierigen Bedingungen durchgeführt. Fruchtbare wissenschaftliche Diskussionen haben die Herren S. COLLATZ aus den Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf (ZfK) und K. MEYER von der Ingenieurhochschule Zittau beige-steuert. Die Herren H.-F. BRINCKMANN, (ZfK), K.-H. LOTH † (KAB), G. PFEIFFER und A. STURM (KKW) haben die diagnostischen Arbeiten in administrativen und Genehmigungsfragen beständig unterstützt. Ihnen allen ist an dieser Stelle nachdrücklich Dank zu sagen.

## 7. Quellenverzeichnis

- [1] KTA 3201.4, Komponenten des Promärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung, Regeländerungsentwurf Juni 1997
- [2] KTA 3204, Reaktordruckbehälter-Einbauten, in der Fassung 6/1998
- [3] Advances in safety related diagnostics and early failure detection systems, Report of a technical committee meeting organized by the IAEA and held in Vienna, November 20-24, 1995, IAEA-J4-TC698
- [4] Sydow, J., Betriebserfahrungen und Störfallgeschichte des Kernkraftwerkes Greifswald, Blöcke 1 bis 4, im Zeitraum 1974 bis 1990, Teil I: Energietechnik 41 (1991), 105, Teil 2: Energietechnik 41 (1991), 223
- [5] Hessel, G., H.-E. Köppen, P. Liewers, P. Schumann, F.-P. Weiß, Development of nuclear power plant noise diagnostics into a process-measuring method, Nuclear Technology 68 (1985), 102
- [6] Hessel, G., P. Liewers, P. Schumann, F.-P. Weiß, A noise diagnostic system for operator advice, Nuclear Safety 29 (1988), 293
- [7] Lehmann, R., U. Kunze, K.-D. Schulz, Influence of operational data evaluation on the enhancement of nuclear power plant safety and availability, Kernenergie 31 (1988), 381
- [8] Kunze, U., Anwendung der Rauschdiagnostik im KKW „Bruno Leuschner“ Greifswald zur Anlagenüberwachung, Kernenergie 32 (1989), 329
- [9] Kunze, U., H. Abel, M. Barz, Vibration monitoring of the reactors at Greifswald NPP, paper presented at IMORN 20, Istanbul, Turkey, 1988
- [10] Saito, K., A noise pattern library effort in Japan, Progress in Nuclear Energy, Vol. 1 (1977), 713-721

- [11] BArch DG12/MA 1258, MKE. Fragen der Leitung und Planung, 1.1.-31.12.1975, Information in Vorbereitung auf den Besuch von Sitzlack (MKE, Abt. EW, Rau, 28.04.1975), Meldung des Schadens an die IAEA
- [12] Grabner, A.; P. Liewers, P. Schumann; Einige aktuelle Probleme der Signalanalyse bei der Anwendung der Rauschdiagnostik zur Schadensfrüherkennung, Kernenergie 19 (1976), 362
- [13] Buttler, E.; H.-D. Giera, A. Grabner, H. Otto, P. Liewers, P. Schumann; Ein Rauschanalysesystem zur Schadensfrüherkennung an Kernkraftwerken mit Druckwasser-Reaktor. - Kernenergie 20 (1977), 389
- [14] Grabner, A.; P. Liewers, P. Schumann; Decomposition of Noise Signals Composed of Many Similar Components, Progress in Nuclear Energy Vol. 1 (1977), 615
- [15] Grunwald, G.; P. Liewers, P. Schumann, F.-P. Weiß; Experimental Investigation of Flow-Induced Control Element Movements by Noise Analysis, NPPCI-Proceedings Vol. 1, Vienna 1978, 291
- [16] Nestler, Ulrich, persönliche Mitteilung, KKW Greifswald/Siemens-KWU, 1975
- [17] Jablonska, Jadwiga, persönliche Mitteilung, IBJ Swierk, Polland, 1977
- [18] Teräsvirta, R., IVO Power Engineering Ltd, Finn, persönliche Mitteilung, June 1998
- [19] Paszit, I., O. Glöckler, On Neutron Noise Diagnostics of Pressurized Water Reactor Control Rod Vibrations, I. Periodic Vibrations, Nucl. Sci. Engng. 85 (1983), 167 - II. Stochastic Vibrations, Nucl. Sci. Engng. 88 (1984), 77 - III. Application at a Power Plant, Nucl. Sci. Engng. 99 (1988), 313
- [20] Buttler, E.; A. Grabner, P. Liewers, H. Otto, P. Schumann, F.-P. Weiß; Zusammenstellung der Ergebnisse von Rauschuntersuchungen am Block 2 während der Inbetriebnahme und Wiederinbetriebnahme. - RPP-16/75, 1975, VD X/11/76
- [21] Zenker, Manfred, persönliche Mitteilung, FZR Rossendorf, 1992
- [22] Kurzbericht vom 06.05.1975 zur Situation am Reaktorblock 1, KKW Greifswald 1975
- [23] Abschlussbericht der Schadenskommission des KKW Bruno Leuschner Greifswald vom 17.02.1976, KKW Greifswald 1976
- [24] BArch DG12/MA 1258, MKE. Fragen der Leitung und Planung 1.1.-31.12.1975, Information über den Stand der Arbeiten zur Schadensbeseitigung im KKW „BL“ vom 6.6.75 (Siebold an Wambutt)
- [25] BArch DG12/MA 1258, MKE. Fragen der Leitung und Planung, 1.1.-31.12.1975, Information für Siebold vom 25.6.1975 (Krause)
- [26] Bewer, H.-J.; P. Schumann; Zur Rauschdiagnostik an Kreiselradverdichteranlagen im VEB PCK Schwedt mit Hilfe des Programmsystems INPS. - ZfK-539, 1984
- [27] Bartel, R., Zur Darstellung kleiner Auslenkungen eines zentralen Absorbers durch entsprechende Randbedingungen für die induzierten Flussdichteschwankungen, Kernenergie 25 (1982), 163
- [28] Schumann, P.; S. Billhardt; Digitale Demodulation von Schallsignalen mittels Hilbert-Transformation. - RPD-4/91, ZfK Rossendorf, 1991
- [29] Collatz, S., Zur Berechnung von Neutronenflussstörungen in hexagonalen Reaktorgittern bei Bewegung einer Reaktorkassette, Kernenergie 24 (1981), 2
- [30] Meyer, K., Zur Abbildung stochastischer Schwingungen von Arbeitskassetten eines Druckwasserreaktors in den Schwankungen der Neutronenflussdichte, Kernenergie 25 (1982) Teil 1: 204, Teil 2: 290

- [31] Hennig, K., G. Grunwald, Treatment of Flow-Induced Pendulum Oscillations, Kernenergie 27 (1984), 286
- [32] Altstadt, E., G. Grunwald, M. Scheffler, F.-P. Weiß, Analytische Modellierung mechanischer Schwingungen von Primärkreislauf-Komponenten des Druckwasserreaktors WWER-440 mit finiten Elementen, FZR-172, März 1997
- [33] Schumann, P., Experimental investigation of the confidence of the ordinary coherence function, paper presented at IMORN-24, Oybin, Germany, 1993
- [34] Wach, D., G. Kozaly, Investigation of the joint effect of local and global driving sources in incore-neutron noise measurements, Atomkernenergie 23 (1974), 244
- [35] Reiche, Christian, persönliche Mitteilung, ZfK Rossendorf, 1975
- [36] Fry, N.D., R.C. Kryter, J.C. Robinson, Analysis of Neutron density Oscillations resulting from core barrel Motion of the Palizades Nuclear Power Plant, ORNL-TM-4570, 1974
- [37] Bastl, W., V. Bauernfeind, The estimation of vibration of reactor internals by Noise Analysis on non-nuclear parameters, Specialist's Meeting on Reactor Noise SMORN-I, Rome 1974
- [38] Fry, D.N., R.C. Kryter, J.C. Robinson, Palizades Trip Report, submitted to the U.S. Atomic Energy Commission, August 29, 1973
- [39] Liewers, P., W. Schmitt, P. Schumann, F.-P. Weiß, Detection of Core Barrel Motion at WWER-440-Type Reactors, Progress in Nuclear Energy Vol. 21 (1988), 89
- [40] IAEA Advanced Incident Reporting System, Event Report N° 0006081, November 1, 1987
- [41] VEK Kernkraftwerk "Bruno Leuschner", Kombinatstandard ES 40-1005, Schwingungsüberwachung von Reaktoren des Typs WWER, Entwurf November 1987
- [42] Lehmann, R., U. Kunze, K.-D. Schulz, Influence of operational data evaluation on the enhancement of nuclear power plant safety and availability, Kernenergie 31 (1988), 381
- [43] Kunze, U., Anwendung der Rauschdiagnostik im KKW "Bruno Leuschner" Greifswald zur Anlagenüberwachung, Kernenergie 32 (1989), 329
- [44] Kunze, U., H. Abel, M. Barz, Vibration monitoring of the reactors at Greifswald NPP, paper presented at IMORN 20, Istanbul, Turkey, 1988
- [45] Kunze, U., Siemens/KWU, persönliche Mitteilung, 1998
- [46] Thie, J. A., Power reactor noise, American Nuclear Society 81-65375, 1981, Kapitel 8
- [47] Schumann, P., F.-P. Weiß; The Influence of Control Element Movement due to Abnormal Core Barrel Motion on Ex-core Neutron Noise at WWER-440-Type Reactors. - IAEA-NPPCI-Specialist's Meeting, Dresden, June 20-22, 1989, Proceedings, 227
- [48] Schumann, P., Zur Abschätzung des Einflusses von relativen Regelementbewegungen bei anomalen Reaktorkorbbewegungen, Kernenergie 33 (1990), 223
- [49] Liewers, P.; W. Schmitt, P. Schumann, F.-P. Weiß; Systematic Analysis of Noisy Signals in the Nuclear Reactor Noise Diagnosis of Abnormal Core Barrel Motion. - 8-th International IMEKO Symposium on Technical Diagnostics, Dresden, September 23-25, 1992
- [50] Schumann, P., Praktische Signalanalyse in der Rauschdiagnostik, Dissertation B, Akademie der Wissenschaften der DDR, 1988
- [51] Liewers, P., W. Schmitt, P. Schumann, F.-P. Weiß, Abbildung anomaler Reaktorkorbbewegungen in externen Neutronenflussschwankungen, Kernenergie 32 (1989), 338

- [52] Grunwald, G.; G. Hessel, P. Schumann, S. Döge, H.-J. Hardtke, F. Holzweißig; Schwingungsuntersuchungen am Reaktordruckgefäß WWER-440; Kernenergie 28 (1985), 18
- [53] Giera, H.-D., Zwischenbericht über Rauschmessungen bei der Inbetriebnahme des Blockes 5 im KKW Greifswald, RPD-7/90, ZFK-Rosendorf 1990
- [54] Altstadt, E.; G. Grunwald, P. Liewers, P. Schumann, F.-P. Weiß; Analytical Model for the Description of Control Element Vibration occurring during Abnormal Core Barrel Motion at WWER-440 Type Reactors and for the Interpretation of Phase Relations between In-core and Ex-core Neutron Noise.- Third International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management held at Southampton Institute, 2-4 July 1991, Proceedings
- [55] Altstadt, E., F.-P. Weiß, Experimental and numerical investigations of control element vibration during abnormal core barrel motion at WWER-440 type reactor, Proceedings of the 1993 Simulation Multiconference on the International Simulators Conference, March 29 - April 1, Key Bridge Marriott, Arlington, Virginia; Simulation Series Vol. 12, N° 4, (1993), 48
- [56] Altstadt, E., Th. Mössner, P. Schumann, Adjustment of the vibration model by comparison of simulated and measured data and the use of this model for failure simulation at Dukovany NPP, unit 1, Technical Report N° F04 of PHARE Project PH.1.03/95, Forschungszentrum Rosendorf, December 1998