

KfK 2977
August 1980

Möglichkeiten der Rauschanalyse zur Schadenfrüherkennung in natriumgekühlten schnellen Reaktoren

M. Edelmann
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 2977

Möglichkeiten der Rauschanalyse zur Schadenfrüherkennung
in natriumgekühlten schnellen Reaktoren

M. Edelmann

Schriftliche Fassung eines Vortrags, gehalten auf der
Jahrestagung Kerntechnik 1980, Fachsitzung Früherkennungs-
methoden, Berlin, 25.-27. April 1980

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Possibilities for early failure detection in LMFBR's by noise analysis

Abstract

A short review of potential possibilities for early failure detection in LMFBR's using noise analysis techniques is given together with examples of investigated practical applications. The possibilities of noise analysis techniques for early malfunction detection result from two facts:

1. In general failure of components of a technical plant does not occur suddenly but is preceded by relatively long time pre-failure malfunction. In the early state of a developing disturbance only small effects on measurable process parameters can be expected.
2. Noise analysis and correlation techniques are particularly well suited to detect small changes in systems parameters by analyzing inherent fluctuations of plant signals during normal operation.

Thus, noise analysis techniques have the potential of detecting incipient failures at an early stage providing the possibility to prevent significant failure. This is of particular interest if late or not detected malfunctions could lead to a major accident causing large financial losses or even danger to the public.

Kurzfassung

Der Bericht zeigt in gedrängter Form die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Schadenfrüherkennung an schnellen Reaktoren auf, die sich durch den Einsatz der Rauschanalyse ergeben. Sie folgen aus der Erfahrung, daß das Versagen von Komponenten in technischen Anlagen häufig nicht unvermittelt sondern erst nach einer längeren Vorgeschichte auftritt. In der Frühphase einer Schadensentwicklung sind naturgemäß nur geringfügige Symptome der Schadensursache in den meßbaren Betriebsparametern der Anlage zu erwarten. Die Methoden der Rauschanalyse und Korrelationstechnik sind speziell darauf ausgerichtet, kleine Änderungen des Anlagenzustandes durch Analyse der inhärenten Schwankungen von Meßsignalen zu detektieren und so eine frühe Entdeckung sich anbahnender Störungen und Schäden ohne Beeinträchtigung des Anlagenbetriebes zu ermöglichen. Das ist besonders für Anlagen von Bedeutung, bei denen eine zu spät erkannte Störung einen großen finanziellen Verlust oder sogar eine Gefährdung der Umwelt zur Folge hätte. Die grundsätzlichen Betrachtungen wurden durch eine kurze Darstellung der bisher konkret untersuchten Anwendungsmöglichkeiten ergänzt.

Inhalt

1. Grundgedanken zur Schadenfrüherkennung durch Rauschanalyse
2. Charakterisierung und Informationsgehalt von Rauschsignalen
3. Rauschanalyse an schnellen Reaktoren
4. Anwendungsbeispiele der Rauschanalyse zur Schadenfrüherkennung
5. Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

Möglichkeiten der Rauschanalyse zur Schadenfrüherkennung in natriumgekühlten schnellen Reaktoren

1. Grundgedanken zur Schadenfrüherkennung durch Rauschanalyse

Die Rauschanalyse ist eine Verallgemeinerung der Geräuschanalyse, deren rudimentärste Form auch dem Laien durch Arztbesuche bekannt ist. Wie beim menschlichen Organismus aus Atemgeräusch und Pulsschlag kann grundsätzlich auch bei anderen physikalischen und technischen Prozessen aus den Schwankungen, d.h. dem Rauschen von Zustandsgrößen, auf einen normalen oder gestörten Ablauf geschlossen werden.

Die Verallgemeinerung der Geräuschanalyse betrifft sowohl eine Ausdehnung auf andere, nicht durch menschliche Sinne wahrnehmbare Phänomene als auch eine Verfeinerung der Mess- und Analysemethoden sowie eine Erweiterung des Frequenzbereichs oder der Zeitskala der Signalschwankungen. Es werden im allgemeinen die inhärenten Schwankungen eines Systems ausgenutzt. In besonderen Fällen wird auch zusätzliches "Rauschen" durch eine künstliche Modulation einzelner Parameter erzeugt. Dabei werden nur kleine Störungen aufgeprägt, so daß der normale Prozeß ungestört weiterlaufen kann. Ein wesentlicher Vorteil der Rauschanalyse ist, daß das Untersuchungsobjekt weder abgeschaltet zu werden braucht noch in seinen normalen Funktionen beeinträchtigt wird.

Häufig treten zusätzliche oder Veränderungen der gewöhnlichen Schwankungen von Zustandsgrößen eines technischen Prozesses lange vor einer größeren Störung oder einem Ausfall von Komponenten auf, da Schäden sich meist langsam in einer stetigen Entwicklung herausbilden, an deren Ende erst ein wirkliches Versagen steht. Dieser Umstand bildet die Grundlage für die Schadenfrüherkennung in technischen Anlagen.

Das Rauschen einer Meßgröße ist im allgemeinen eine scheinbar regellose Schwankung ihres Momentanwertes um einen Mittelwert. Die Schwankungsamplitude ist nicht konstant und beträgt größenordnungsmäßig etwa 1 % des Mittelwertes. Während für die normale Prozesskontrolle die Mittelwerte gemessen und das Rauschen weggefiltert wird, benutzt die Rauschanalyse umgekehrt die Schwankungen der Zustandsgrößen eines Systems, da sie allein unter stationären Bedingungen Informationen über das dynamische Verhalten der Anlage liefern können. Durch die ihr eigene "mikroskopische" Betrachtungsweise der Signalschwankungen ist die Rauschanalyse besonders geeignet, die durch sich anbahnende Störungen verursachten kleinen Veränderungen in den überwachten Meßgrößen frühzeitig zu detektieren.

Die Entwicklung und der Einsatz von Früherkennungsmethoden ist besonders für solche Anlagen interessant, bei denen ein Versagen einen großen finanziellen Schaden oder sogar eine Gefährdung der Umwelt mit sich bringen kann. Durch frühzeitige Feststellung sich anbahnender Störungen kann im Prinzip eine Schadensentwicklung begrenzt, d.h. durch Reparatur schadhafter Komponenten in einem frühen Stadium beendet und eine Gefährdung der Außenwelt verhindert werden. Damit können auch die für Reparaturen erforderlichen Kosten und Stillstandszeiten verringert, d.h. außer der Sicherheit auch die Verfügbarkeit einer Anlage erhöht werden.

2. Charakterisierung und Informationsgehalt von Rauschsignalen

An dieser Stelle kann nur eine kurze Erläuterung zum Verständnis der Begriffe gegeben werden. Eine ausführliche Darstellung der theoretischen Grundlagen der Rauschanalyse findet man in Lehrbüchern der mathematischen Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie sowie in Werken zur statistischen Systemtheorie [1-3].

Rauschsignale werden theoretisch als Zufallsfunktionen behandelt. Sie sind nicht analytisch zu beschreiben sondern nur durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. daraus abgeleitete statistische Kenngrößen zu charakterisieren. Allgemein bekannt sind die ersten Momente einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, der Mittelwert und die Varianz der zugehörigen Zufallsgröße. Beide kennzeichnen nur den Amplitudenbereich eines Rauschsignals. Über seinen zeitlichen Verlauf sagen sie nichts aus. Die Varianz ist jedoch ein Maß für die elektrische Leistung eines Rauschsignals bzw. für die Intensität der Schwankungen der zugehörigen Meßgröße. Eine Zunahme des Rauschens führt zur Erhöhung der Varianz. Daraus ergibt sich eine einfache Methode für eine pauschale Überwachung von Rauschsignalen, die kontinuierliche Messung ihrer Varianz. Eine Änderung derselben deutet auf Veränderungen des überwachten Systems, erlaubt jedoch im allgemeinen keine Schlüsse auf die Art der Störung.

Detaillierte Information über einen zu überwachenden Prozeß liefert der zeitliche Verlauf von Rauschsignalen, gekennzeichnet durch ihre Korrelationsfunktion oder ihre spektrale Leistungsdichteverteilung. Diese sind sowohl durch die Störung als auch durch die dynamischen Eigenschaften des Prozesses (beschrieben durch verschiedene Übertragungsfunktionen) bestimmt. Im allgemeinen ist die Separation der beiden Einflüsse schwierig. Sie erfordert ein detailliertes theoretisches Modell sowie den Einsatz von Kreuzkorrelationsmethoden zur experimentellen Bestimmung der Systemparameter.

Die bei bestimmten Störfällen zu erwartenden Rauschphänomene können unter Umständen vorher durch Simulation bestimmt werden. Auf diese Weise kann ein Katalog von statistischen Kenngrößen genau definierter Rauschsignale für verschiedene Störfallsituationen erstellt werden, der bei betriebsmäßiger Überwachung einer Anlage die sofortige Identifikation der Störung ermöglicht, wenn in den stochastischen Kenngrößen eines Rauschsignals Abweichungen vom Normalzustand festgestellt werden. Anderenfalls kann in solch einem Fall ein besonderes Untersuchungsprogramm zur Ermittlung der Ursache für die beobachteten Anomalien in Gang gesetzt werden. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen können dann zusammen mit den Veränderungen des Rauschens in den Störfallkatalog aufgenommen werden, so daß im Wiederholungsfall eine sofortige Identifikation der Störung möglich ist.

3. Rauschanalyse an schnellen Reaktoren

Die allgemeinen Grundlagen und Techniken der Rauschanalyse gelten für schnelle und thermische Reaktoren gleichermaßen. Auch die für die Schadenfrüherkennung in Betracht kommenden Meßgrößen sind weitgehend gleich. Abweichungen vom Normalzustand des Reaktors können sich frühzeitig im Rauschen des Neutronenflusses, der Kühlmitteltemperatur, des Kühlmitteldruckes sowie durch Veränderungen des Schwingungszustandes und des Schallfeldes bemerkbar machen.

Diese Größen hängen schon im Normalbetrieb naturgemäß von den konstruktiven Merkmalen, den nuklearen Eigenschaften und der Betriebsweise eines Reaktors ab. Je nach Reaktortyp sind auch unterschiedliche Störfälle oder Störfallabläufe möglich. Ebenso ist zu erwarten, daß die Auswirkungen vergleichbarer Störungen im Frühstadium auf die unterschiedlichen Rauschsignale reaktorspezifisch sind.

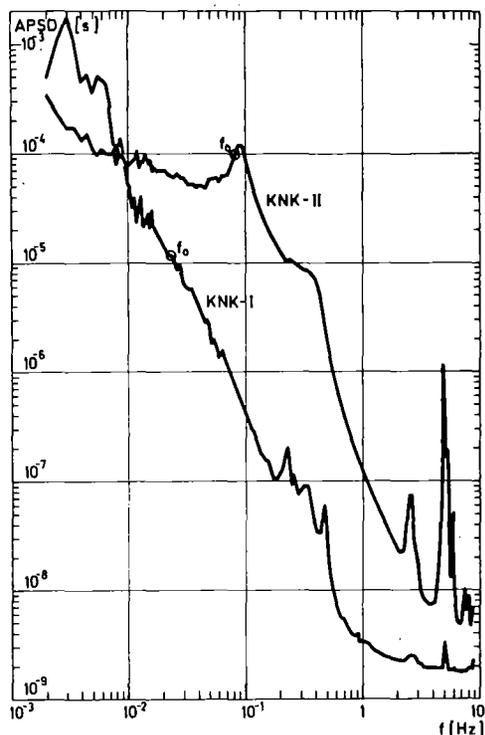


Abb. 1 Normierte Autospektren des Leistungsrauschens von KNK-I und -II.

Als Beispiel sind in Abb. 1 die spektrale Verteilung des Leistungsrauschens für den Reaktor KNK mit dem ersten und zweiten Core gezeigt. Sie unterscheiden sich deutlich, obwohl die Betriebsweise des Reaktors in beiden Fällen die gleiche ist und der Primärkreis nicht geändert wurde. Die Brennelementkonstruktionen beider Cores sind jedoch sehr verschieden, so daß sich neben veränderten nuklearen Eigenschaften auch ein anderes Schwingungsverhalten der Brennstäbe in der turbulenten Kühlmittelströmung ergibt. Eine quantitative Aufteilung der spektralen Leistungsverteilung hinsichtlich der ursächlichen Rauschquellen ist noch im Gange.

Für die Schadenfrüherkennung durch Rauschanalyse sind die folgenden Schritte nötig:

- 1- Messung des normalen betrieblichen Rauschuntergrundes und seiner Abhängigkeit vom Betriebszustand und der Betriebsdauer des Reaktors,
- 2- Identifikation der Ursachen für das normale Rauschen (Rauschquellen) und quantitative Bestimmung ihrer Beiträge zum Rauschen verschiedener Meßgrößen,
- 3- Untersuchung der Effekte möglicher Störungen auf die verschiedenen Rauschsignale,
- 4- Ermittlung der für den Nachweis einer Störung geeigneten Signale und des für die Diagnose optimalen Analyseverfahrens,
- 5- Bestimmung der Alarmgrenzwerte aus dem spezifischen Störsignal und dem Untergrundrauschen.

Die Schritte 1,2 und 5 setzen voraus, daß mindestens ein Reaktor eines zu überwachenden Typs in Betrieb und für die entsprechenden Messungen zugänglich ist. Im Gegensatz zu den thermischen Reaktoren ist diese Voraussetzung für schnelle Reaktoren nicht erfüllt. Die Möglichkeiten zur Schadenfrüherkennung an schnellen Reaktoren müssen daher anders abgeschätzt werden.

Einerseits können die mit der Rauschanalyse an thermischen Leistungsreaktoren gesammelten Erfahrungen zum Teil auf schnelle Reaktoren übertragen werden. Andererseits erfordern die Schritte 3,4 und 5 nicht in jedem Fall einen Reaktor. Viele Störfälle können oder müssen aus technischen oder Sicherheitsgründen in Modellversuchen oder durch Simulation und theoretische Studien untersucht werden. Darauf wird später am Beispiel von lokalen Kühlungsstörungen und Kühlmittelsieden innerhalb eines Brennelements näher eingegangen.

Die Untersuchung von Methoden zur Überwachung einzelner Brennelemente kann befriedigend in kleineren Forschungsreaktoren mit hinreichend prototypischen Testbrennelementen durchgeführt werden. So konnten wichtige Erkenntnisse durch Experimente am Reaktor KNK gewonnen werden, der vor allem auch zur Entwicklung und Erprobung der Meßtechnik und On-line Analyseverfahren gute Möglichkeiten sowie einen vorläufigen Ersatz für die Entwicklungsschritte 1 und 2 für die Frühschadenserkennung an einem schnellen Brutreaktor bot |4-9|.

Zu den im Grundsatz auf schnelle Reaktoren übertragbaren Erkenntnissen der Untersuchungen an thermischen Reaktoren sind alle Schwingungseffekte von Corebauteilen zu zählen, insbesondere Anomalien im Schwingungsverhalten von Brennelementen und Regelstäben, die einen Reaktivitätseffekt haben und damit Leistungsrauschen erzeugen oder über Schwingungsmessungen am Reaktor-druckbehälter, an den Primärleitungen oder den Regelstabantrieben erfaßt werden können. Entsprechende Untersuchungsergebnisse des französischen Schnellbrutreaktors Phenix [10] stützen diese Aussage. Auch die Anwendung akustischer Überwachungsmethoden, etwa zur Bestimmung loser Teile im Primärkreis sollte an schnellen Reaktoren grundsätzlich die gleichen Möglichkeiten wie an thermischen Reaktoren bieten. Hierzu sei auf die Literatur und die anderen Vorträge dieser Fachsitzung verwiesen [23]. Die Entwicklungsschritte 3-5 werden nachfolgend in ausgewählten Beispielen illustriert.

4. Anwendungsbeispiele der Rauschanalyse zur Schadenfrüherkennung

Die umfassendste Information über den Zustand eines Reaktors liefern die Signale von Neutronendetektoren da der Neutronenfluß von vielen Größen abhängt und das Neutronen- oder Leistungsrauschen auch die Dynamik des Reaktors enthält.

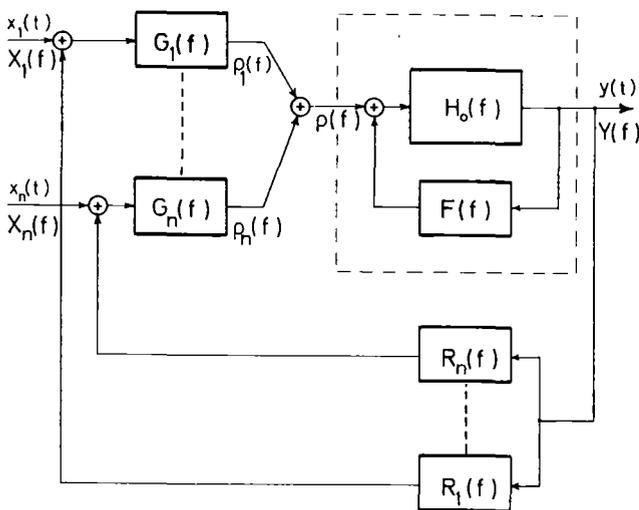


Abb. 2 Blockschema zum Leistungsrauschen

Die Abb. 2 zeigt eine modellmäßige Darstellung dieser Zusammenhänge, wie sie zur Analyse und Interpretation des Leistungsrauschens benutzt wird. Das Gesamtsystem wird in einzelne Übertragungsglieder (Blöcke) zerlegt, deren dynamische Eigenschaften durch frequenzabhängige Übertragungsfunktionen beschrieben werden. Die primären Rauschquellen $X(f)$ -z.B. Schwankungen der Eintrittstemperatur bzw. der Dichte des Kühlmittels, mechanische Schwingungen- liefern Beiträge $\rho_i(f)$ zum Reaktivitätsrauschen $\rho(f)$, das als stochastisches Eingangssignal für den Reaktor zu betrachten ist. Die Übertragungsfunktionen $G_i(f)$ beschreiben den Reaktivitätseffekt der primären Rauschquellen, die z.T. durch

das Leistungsrauschen $Y(f)$ gemäß den äußeren Rückkopplungs-Übertragungsfunktionen $R_i(f)$ bedingt oder beeinflusst sein können. Ausgangssignal ist das Leistungsrauschen $Y(f)$. Es folgt aus dem Reaktivitätsrauschen durch Multiplikation mit der Übertragungsfunktion des intern rückgekoppelten Reaktors

$$H(f) = \frac{H_0(f)}{1 - F(f) \cdot H_0(f)}$$

Die Neutronensignale bieten einen weiteren Vorteil. Wegen der starken Kopplung zwischen den einzelnen Zonen eines schnellen Cores ist das auf den Mittelwert bezogene Rauschsignal praktisch ortsunabhängig. Ein an beliebiger Stelle im oder außerhalb des Cores gemessenes Neutronensignal ermöglicht damit im Prinzip eine Überwachung auf alle Störungen, die einen Reaktivitätseffekt bewirken. Voraussetzung dazu ist jedoch, daß die verschiedenen Störungen spezifische Veränderungen des Rauschens hervorrufen (z.B. Resonanzlinien), durch die sie beispielsweise in der spektralen Leistungsdichte identifizierbar sind.

Ein wegen seiner Bedeutung für die Sicherheit schneller Reaktoren ausführlich untersuchter Störfall ist Sieden des Kühlmittels hinter einer lokalen Verstopfung der Kühlkanäle in einem Brennelement [11]. Experimente [12] mit elektrisch beheizten Brennelementmodellen zeigten, daß dabei aufeinanderfolgend einzelne Na-Dampfblasen entstehen und wieder vollständig kollabieren. Die Blasen bewirken Schwankungen der Kühlmitteltemperatur am Brennelementaustritt, nahezu periodische Reaktivitätsschwankungen infolge des Na-Voideffekts und Geräuschspitzen beim Kollabieren. Alle drei Effekte können als Grundlage für die Siededetektion dienen und wurden eingehend untersucht [13-15]. Es zeigte sich dabei, daß für die meisten Brennelemente das Sieden durch ein spezielles Verfahren zur Analyse des Neutronenrauschens, bei dem die Beschränkung der Siedesignale auf ein bestimmtes Frequenzband ausgenutzt wird, innerhalb von 3 Sekunden, d.h. vor Eintritt eines Brennelementschadens festgestellt werden kann. Für die restlichen Elemente ist der ortsabhängige Voidkoeffizient bei dem angenommenen Rauschuntergrund für den Siedennachweis zu klein, so daß sie auf andere Weise überwacht werden müßten. Für die alternativen Methoden, Sieden mit Hilfe der Kollabierungsgeräusche, des Temperaturrauschens oder durch Kreuzkorrelation [16] von akustischen und Neutronensignalen nachzuweisen, stehen genaue Angaben noch aus. Endgültige Aussagen bezüglich der am besten geeigneten Nachweismethoden können nur durch Messungen an einem zu überwachenden Reaktor oder durch einen prototypischen Siedeversuch in einem Testreaktor, z.B. KNK-II, getroffen werden.

Wegen der schweren Schäden, die Kühlungsstörungen in einem BE verursachen können, ist man bestrebt, lokale Reduktionen der Kühlung schon vor dem Sieden des Kühlmittels zu detektieren. Das ist deshalb ein Problem weil eine axial wenig ausgedehnte Verstopfung nur eine sehr kleine Reduktion des Kühlmitteldurchsatzes durch das ganze BE verursacht, selbst wenn sie einen großen Teil des BE-Querschnitts erfaßt [17]. Dadurch können im Bereich der Verstopfung große Überhitzungen auftreten, ohne daß die am BE-Kopf gemessene mittlere Kühlmitteltemperatur sich wesentlich ändert. Die Störung ist nur mit empfindlichen Methoden zur Messung des Kühlmitteldurchsatzes oder der Aufheizspanne möglich.

Die Rauschanalyse bietet zwei komplementäre Möglichkeiten, lokale Kühlungsstörungen festzustellen. Die eine beruht darauf, daß der radiale Temperaturgradient im Kühlmittel hinter einer Blockade zusätzliches Rauschen erzeugt, das in der Brennelementaustrittstemperatur nachgewiesen werden kann [18]. Die zweite Methode [19] eliminiert die gemessenen Temperaturschwankungen derart, daß über den Momentanwert der Austrittstemperatur eine empfindliche und schnelle Anzeige einer Kühlungsstörung erfolgt (was durch Filtern allein nicht erreicht werden kann). Diese Methode beruht auf der Messung der Ursachen für das Temperaturrauschen und der Simulation des Brennelements durch einfache elektronische Bauelemente. Damit können simulierte Temperatursignale zur Kompensation der wirklichen Meßsignale erzeugt werden. Das kompensierte Temperatursignal reagiert nur auf Durchsatzänderungen des Kühlmittels. Die an KNK-II erreichte Empfindlichkeit liegt unter 1 % des Kühlmitteldurchsatzes. In Abb. 3 sind Proben eines gemessenen und kompensierten Signals wiedergegeben.

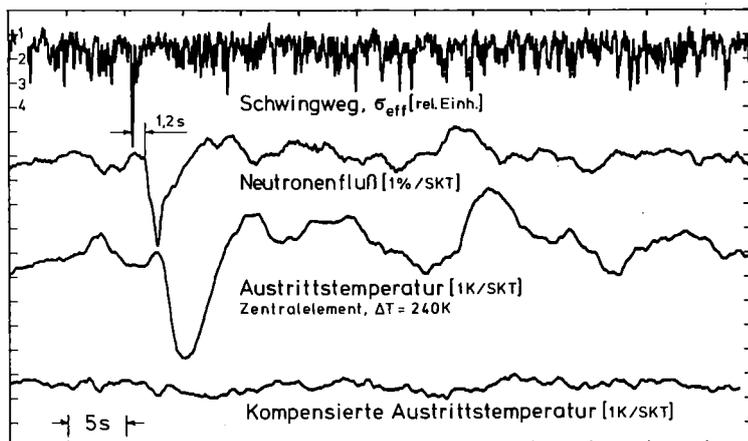


Abb. 3 Rauschsignale von KNK-II

ben Rauschmessungen wesentlich beigetragen [20,21]. Dem in der Abb. 3 ebenfalls dargestellten Effektivwert eines Schwingwegaufnehmersignals war zu entnehmen, daß den Reaktivitätsstörungen im Abstand von etwa 1 Sekunde mechanische Erschütterungen im Reaktor vorausgingen. Damit konnten sowohl Natriumsieden als auch mechanische Vorgänge im Core als Ursache ausgeschlossen werden. Als einzige war die Erklärung durch im Kühlmittel mitgeführte Schutzgasblasen mit den Beobachtungen verträglich, die dann auch durch ein gezieltes Versuchsprogramm bestätigt wurde. Dem kompensierten Temperatursignal ist zu entnehmen, daß im Kühlmittel des betreffenden Brennelements weniger als 0,5 % Gas enthalten waren.

Als abschließendes Beispiel sei noch erwähnt, daß die Rauschanalyse auch zur Kontrolle der Funktionsbereitschaft von Sicherheitsinstrumentierungen eines Reaktors eingesetzt werden kann. Für Neutronen- und Temperaturmeßkanäle zur Überwachung der BE-Austrittstemperaturen wurde gezeigt, daß Kreuzkorrelationsmessungen mit Signalen der jeweiligen Rauschquellen die Möglichkeit bieten, die Empfindlichkeit und die Ansprechzeit der Meßkanäle einschließlich der Meßwertaufnehmer laufend zu kontrollieren [22].

5. Zusammenfassung

Grundsätzliche Möglichkeiten zur Schadenfrüherkennung durch Rauschanalyse an schnellen Reaktoren ergeben sich zum einen durch eine Betrachtung der Schadensentwicklung, die meist eine längere Vorgeschichte mit kaum im Erscheinung tretenden Symptomen aufweist, und aus dem Wesen der Rauschanalyse, deren Methoden speziell dazu dienen, Information aus kleinen Schwankungen von Meßgrößen zu gewinnen.

Zum anderen lassen Parallelen zwischen thermischen und schnellen Reaktoren z.T. eine Übertragung von Untersuchungsergebnissen und praktische Schlußfolgerungen bezüglich der Schadenfrüherkennungsmöglichkeiten für beide Reaktorclassen zu. Schließlich haben gezielte Untersuchungen an schnellen Versuchsreaktoren und Brennelementmodellen sowie theoretische Untersuchungen für sicherheitsrelevante Störfälle explizit den Nachweis erbracht, daß die Rauschanalyse ein großes Potential zur Schadenfrüherkennung an den schnellen Reaktoren der Zukunft besitzt. Die Möglichkeiten hierfür sind noch längst nicht ausgelotet. Der Aufwand für die Forschung auf diesem Gebiet ist, gemessen etwa an den Forschungsprogrammen zur Untersuchung der Folgen hypothetischer Störfälle, bei weitem zu gering. Für die jetzt im Bau befindlichen französischen Superphenix - Reaktoren sind Überwachungseinrichtungen auf der Basis der Rauschanalyse bereits vorgesehen.

Die Abb. 3 zeigt noch ein weiteres Ergebnis der Rauschanalyse an KNK-II. Bei Reaktorleistung oberhalb 50 % NL traten vereinzelt Leistungseinbrüche von wenigen Sekunden Dauer und Amplituden von einigen Prozent der stationären Leistung auf, die gelegentlich auch zur Abschaltung des Reaktors durch das Reaktimeter führten. Der Einbruch ist im Signal eines Neutronendetektors und der Kühlmitteltemperatur deutlich erkennbar. Die Ursache dieser Störung war zunächst nicht bekannt. Zu ihrer Aufklärung ha-

Literatur

- | 1 | M.S. Bartlett
An Introduction to Stochastic Processes
Cambridge University Press (1966)
- | 2 | H. Schlitt, F. Dittrich
Statistische Methoden der Regelungstechnik.
Bi.-Hochschultaschenbücher 526, Bibliogr.
Inst. (1972)
- | 3 | J.S. Bendat, A.G. Piersol
Measurement and Analysis of Random Data
J. Wiley & Sons (1968)
- | 4 | M. Edelmann et al., Die Analyse des Reaktorrauschens - Hintergründe,
Methoden und Zielsetzung, KFK Nachrichten 2/3 1976, 34, Kernforschungs-
zentrum Karlsruhe (1976)
- | 5 | P. Hoppé, F. Mitzel
Noise Analysis Performed at the Sodium Cooled Power Reactor KNK I
for Malfunction Diagnosis and Plant Surveillance, Proc. SMORN II in:
Progr. Nucl. Energy 1/2-4 (1977) 427
- | 6 | P. Hoppé, Analyse des Neutronenrauschens an natriumgekühlten Reaktoren zur Erkennung von Funktionsstörungen, KFK-Bericht 2589 (1978)
- | 7 | F. Mitzel, P. Hoppé, Theoretical and Experimental Analysis of Fast Reactor Transfer Functions For the Identification of Plant Dynamics and Core Parameters, Proc. Int. Fast Reactor Safety Technol. Meeting, Seattle, Washington, U.S.A. (1979) Vol. 3,1296
- | 8 | W. Väth, Criss Power Spectral Density- A Method for Correlating Signal Components from Different Frequency Ranges, KFK-Bericht 2794 (1978)
- | 9 | H. Massier, NOASYS- Ein System zur On-line Analyse von Rauschsignalen, KFK-Bericht 2585 (1978)
- | 10 | Y. Tigeot, G. le Guillou, Neutron Noise Induced by Vibration on the French Phenix LMFBR, Proc. SMORN II in: Progr. Nucl. En. 1/2-4 (1977) 487
- | 11 | W. Peppler, Sodium Boiling in Fast Reactors - "State of the Art"
ASME Symp. Thermal Hydraulic Aspects of Nucl. Reactor Safety, Atlanta, Georgia, U.S.A. (1977)
- | 12 | A.J. Brook, F. Huber, W. Peppler, Temperature Distribution and Local Boiling Behind a Central Blockage in a Simulated FBR-Subassembly, Proc. Int. Meet. Fast Reactor Safety and Related Physics, Chicago (1976)
- | 13 | L. Krebs, G. Weinkötz Detection of Local Boiling in an LMFBR Sub-assembly by Temperature Fluctuation Analysis, Proc. SMORN II in: Progr. Nucl. En. 1/2-4 (1977) 507
- | 14 | J. Ehrhardt, Nachweis bandbegrenzter Komponenten in verrauschten Signalen durch Überwachung der spektralen Auto- und Kreuzleistungsdichten, KFK-Bericht 2559 (1978)

- [15] G. le Guillou, R. Berger, M. Brunet, Boiling Detection in Fast Reactors by Noise Analysis, Proc. SMORN II in: Progr. Nucl. En. 1/2-4 (1977) 409
- [16] S.A. Wright, R.W. Albrecht, M. Edelmann
Cross Correlation of Neutronic and Acoustic Noise Signals From Local Boiling, Ann. Nucl. Energy 2, 367 (1975)
- [17] P. Basmer, B. Dorr, D. Kirsch, R. Meyder, K. Schleisiek
Experiments on Local Blockages, Meeting Liq. Metal Boiling Working Group, Risley, Oct. 1-3, 1975
- [18] G. Weinkötz, H. Martin, L. Krebs, Detection of Cooling Disturbances in the Fuel Elements of an LMFBR by Temperature Fluctuation Analysis, IAEA/NPPCI Spec. Meet. on Procedures and Systems for Assisting an Operator During Normal and Anomalous Nucl. Power Plant Operation Situations, München 1979
- [19] M. Edelmann, Simulation of Fuel Element Thermal Hydraulics for Sensitive Monitoring of Coolant Flow, IAEA/NPPCI spec. Meet. wie unter |18|
- [20] P. Hoppé, H. Massier, F. Mitzel, W. Väh, Untersuchungen zum Gaseintrag an KNK-II, KFK-Bericht 2867 (1979)
- [21] M. Edelmann, P. Hoppé, F. Mitzel, W. Väh,
Two-Phase Flow Effects Observed in a Sodium Cooled Reactor, Transactions ANS 1980 Ann. Meet., Las Vegas, U.S.A. (1980)
- [22] M. Edelmann
Two On-Line Methods for Routine Testing of Neutron and Temperature Instrumentation of Power Reactors KFK 2316 (1976)
- [23] Jahrestagung Kerntechnik 1980, Fachsitzung Früherkennungsmethoden. Deutsches Atomforum e.V.