

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

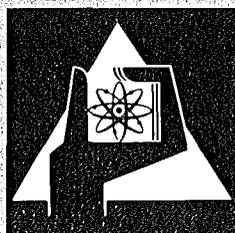
Februar 1974

KFK 1883

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Messung von β_{eff} an den Anordnungen SNEAK-7A und -7B sowie
an Masurca R2 mit der Frequenzanalyse des Reaktorrauschens

W. Väth



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1883

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Projekt Schneller Brüter

Messung von β_{eff} an den Anordnungen SNEAK-7A und -7B sowie
an Masurca R2 mit der Frequenzanalyse des Reaktorrauschens

W. Väth

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Zur Klärung der Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Reaktivitätswerten in Kernreaktoren mit Plutonium-Brennstoff wurde der effektive Anteil verzögerter Neutronen mit der Frequenzanalyse des Reaktorrauschens experimentell bestimmt. Dazu muß - bei Gültigkeit des Punkt-Reaktor-Modells - nur die Gesamtspaltrate bekannt sein. Die Abweichung des Reaktors vom Punkt-Modell auf Grund der Orts- und Energieabhängigkeit des Neutronenflusses wurde durch einen Korrekturfaktor für die Korrelationsamplitude berücksichtigt. Die gemessenen β_{eff} -Werte stimmen gut mit denen einer anderen experimentellen Methode überein; ein zu klein berechnetes β_{eff} korrespondiert mit der Unterschätzung der Materialwerte durch die Theorie.

Measurement of β_{eff} of the assemblies SNEAK-7A and -7B and Masurca R2 by the frequency analysis of neutron noise

Abstract

To understand the discrepancy between the measured and calculated material worths in Pu-fuelled reactors, the effective fraction of delayed neutrons was measured by the frequency analysis of neutron noise. In order to do this (assuming validity of the point reactor model) it is necessary to know only the total fission rate. In addition the space and energy effects of the neutron flux were taken into consideration by introducing a factor into the correlation function. The measured value of β_{eff} agree well with the results of other experimental methods. However, the measured value of β_{eff} is larger than the calculated β_{eff} . This fact corresponds with the discrepancy mentioned above.

Einleitung

Eine mögliche Ursache für die Diskrepanz zwischen gerechneten und gemessenen Reaktivitätswerten von Corematerial eines schnellen Plutonium-Reaktors ist eine falsche Berechnung des effektiven Anteils verzögerter Neutronen. Um dies zu klären, wurde an den Plutonium-Anordnungen SNEAK-7A und 7B /1/ sowie an dem Uran-Core Masurca R2 (CEN de Cadarache) /2/ der Wert für β_{eff} experimentell bestimmt. Zu den Methoden, die eine Bestimmung des β_{eff} gestatten, gehören auch die, die das Reaktorrauschen analysieren. Alle Rauschmethoden liefern die Zerfallskonstante α des prompten Neutronenflusses und das Produkt $\beta_{\text{eff}}^2 \cdot F$. Ist der Wert für β_{eff} gesucht, so muß die Gesamtspaltrate F im Reaktor durch eine andere unabhängige Methode bestimmt sein. Der vorliegende Bericht behandelt kurz die Frequenzanalyse des Reaktorrauschens und die Messung von β_{eff} an den oben genannten Anordnungen.

Formeln für die Frequenzanalyse des Reaktorrauschens

Die Theorie der Korrelationsexperimente in Nulleistungsreaktoren /3,4/ liefert bei Annahme des Punktreaktor-Modells für die durch die Frequenzanalyse des Reaktorrauschens /5/ bestimmte spektrale Kreuzleistungsdichte der Ionisationsströme zweier Neutronendetektoren

$$\text{SKLD}(\omega) = q_1 q_2 W_1 W_2 F \frac{D k^2}{1^2} |H(\omega)|^2 \quad (1)$$

Darin ist

- | | |
|-------|---|
| q_n | die mittlere freigesetzte Ladung pro Nachweis im (Absorptions-)Detektor n |
| W_n | die Empfindlichkeit des Detektors in Nachweisen pro Spaltung im Reaktor |
| F | die Spaltrate im Reaktor |

$D = \frac{\nu(\nu-1)}{\bar{\nu}^2}$ = Diven-Faktor (ν = Anzahl der bei einer Spaltung freigesetzten Neutronen)

k der effektive Multiplikationsfaktor

l die Lebensdauer der prompten Neutronen

und $H(\omega)$ die Nulleistungsreaktor-Übertragungsfunktion (ω = Kreisfrequenz)

Für die spektrale Autoleistungsdichte eines Detektorsignals erhält man

$$\text{SALD}_n(\omega) = q_n^2 \cdot W_n \cdot F \left(R + W_n \cdot \frac{D \cdot k^2}{l^2} |H(\omega)|^2 \right) \quad (1a)$$

Dabei ist R der von Bennett /6/ eingeführte Faktor $\overline{q^2}/\bar{q}^2$, der die Schwankungen der beim Nachweisprozeß erzeugten Ladung berücksichtigt.

Interessiert nur die prompte Kinetik ($\omega \gg \lambda_m$, die Zerfallskonstanten der Vorläuferkerne), so ist

$$H(\omega) = \frac{1}{\alpha + i\omega} \quad \text{mit}$$

$$\alpha = \frac{1-k(1-\beta)}{l}, \quad \text{der Zerfallskonstanten des prompten Neutronenflusses } (\beta = \beta_{\text{eff}}).$$

Am kritischen Reaktor ($k = 1$, $\alpha = \alpha_c = \frac{\beta}{l}$) mißt man also für $\omega \gg \lambda_m$ die spektrale Kreuzleistungsdichte

$$\text{SKLD}(\omega) = q_1 q_2 W_1 W_2 F \cdot \frac{D}{l^2} \cdot \frac{1}{\alpha_c^2 + \omega^2}, \quad (2)$$

die für $\lambda_m \ll \omega \ll \alpha$ konstant ist (Plateau der Reaktorübertragungsfunktion):

$$\text{SKLD}(\text{Plateau}) = q_1 q_2 W_1 W_2 F \cdot \frac{D}{\beta} \quad (3)$$

Für die Mittelwerte der Ionisationskammerströme gilt

$$I_n = q_n \cdot W_n \cdot F \quad (4)$$

Aus Gln.(3) und (4) erhält man dann

$$\frac{SKLD}{I_1 \cdot I_2} = \frac{D}{F \cdot \beta^2} \quad (5)$$

Die Methode liefert (wie alle Rauschmethoden) primär das Produkt $F \cdot \beta^2$ (die Materialkonstante D ist bekannt). Zur Bestimmung von β muß also die Gesamtpaltrate durch eine andere unabhängige Methode (z.B. Spaltratentraversen mit geeichten Detektoren) gewonnen werden. Der große Vorteil der Rauschmethoden liegt darin, daß die Empfindlichkeit der zur Messung verwendeten Detektoren nicht bekannt sein muß. Zur sinnvollen Durchführung einer Messung ist jedoch eine genügend große Empfindlichkeit notwendig. Dies gilt besonders bei Verwendung einer Autokorrelationsmessung, da hier immer erst das Nachweisrauschen (erster Term in Gl.1a) von der gemessenen Leistungsdichte subtrahiert werden muß /5/.

Aus der Frequenzabhängigkeit der gemessenen spektralen Kreuzleistungsdichte kann leicht die Zerfallskonstante α ermittelt werden (Gl.2). Dabei ist vorausgesetzt, daß die Apparatur genügend breitbandig ist, d.h. im interessierenden Frequenzbereich eine frequenzunabhängige Übertragungsfunktion hat. Bei Messungen an schnellen Reaktoren, deren Zerfallskonstanten $\alpha \gtrsim 10^4$ /sec sind, läßt sich das nicht immer garantieren. Hier hilft die Messung der Kohärenzfunktion /7/:

$$\rho(\omega) = \frac{SKLD(\omega)}{\sqrt{SALD_1(\omega) \cdot SALD_2(\omega)}} \cdot \frac{1}{2} \quad (6)$$

Durch die Normierung der spektralen Kreuzleistungsdichte auf die spektralen Autoleistungsdichten (SALD) wird $\rho(\omega)$ von den Übertragungseigenschaften der Apparatur unabhängig.

Die einfachen Zusammenhänge zwischen den gemessenen Größen und den Reaktorparametern beruhen auf der Annahme des Punktreaktor-Modells. Ist dessen Gültigkeit nicht mehr gewährleistet, so muß bei der Herleitung der Formeln für die Korrelationsfunktion die Orts- und Energieabhängigkeit des Neutronenflusses berücksichtigt werden. Dies liefert im wesentlichen die gleichen Formeln, jedoch erscheint in der Amplitude der Korrelationsfunktion ein Faktor $g \geq 1$ ($= 1$ für den Punktreaktor). Dieser Faktor ist nach /8/ folgendermaßen zu berechnen:

(7)

$$g = \left(\frac{v_1}{k}\right)^2 \left\{ \int dr \int dE \chi(E) \phi_0^+(E, r) \right\}^2 \cdot \int dE \Sigma_f \phi_0(E, r) \cdot \int dr \int dE \Sigma_f \phi_0(E, r)$$

In dieser aus der Diffusionstheorie abgeleiteten Formel bedeuten r den Ort, E die Neutronenenergie, χ das normierte Spaltspektrum, Σ_f den makroskopischen Spaltquerschnitt und ϕ_0 bzw. ϕ_0^+ den räumlichen Grundmode der Flußfunktion bzw. derer adjungierter mit der Normierung

$$\int dr \int dE \phi_0(E, r) \frac{1}{v} \phi_0^+(E, r) = 1 \quad (8)$$

Zur Bestimmung von β ändert sich damit Gl.5 in:

$$\beta = \left[\frac{-g \cdot D}{F} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{\text{SKLD(Plateau)}} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Hierin werden die Mittelwerte der Ionisationskammerströme und die spektrale Kreuzleistungsdichte gemessen (Frequenzanalyse).

Der Diven-Faktor ist hinreichend bekannt. Die Gesamtpalt-rate F muß durch eine von der Frequenzanalyse unabhängige Methode bestimmt sein. Bei der Berechnung des Korrekturfaktors ist der Ort des Detektors und sein Einfluß auf das Reaktorsystem nicht berücksichtigt.

Apparatur und Durchführung der Messung

Das Blockschaltbild der Meßanordnung zur Durchführung einer Frequenzanalyse ist in Abb.1 zu sehen. 2×2 He³-Zählrohre, die mit 400 V Batterien im Strombereich (keine Gasverstärkung) betrieben werden, befinden sich in Coremitte (Pos. 17-19 der Anordnungen SNEAK 7A bzw. 7B). Schwankungen und Mittelwerte der Ionisationskammerströme werden getrennt verstärkt. Die Ausgänge von zwei Bandpaßfiltern, die aus den Stromschwankungen den gewünschten Frequenzbereich herausziehen, werden miteinander multipliziert und dieses Produkt integriert. Diese Spannung liefert - dividiert durch die Integrationszeit und die Bandbreite sowie die Verstärkungen - die spektrale Kreuzleistungsdichte. Die Messung der integrierten Spannung bzw. der Mittelwerte der Ionisationsströme erfolgt über einen Analog-zu-Frequenz-Konverter, Impulzzähler und Drucker. Da zur Messung von β die spektrale Leistungsdichte absolut gemessen werden muß, wird, um von den Verstärkungsfaktoren loszukommen, vor und nach jeder Messung die Apparatur mit Referenzsignalen geeicht bzw. überprüft. Außerdem werden 4 Signale (Wechsel- und Gleichspannungssignal beider Detektorkanäle) auf Magnetband aufgezeichnet. Die Auswertung dieser Signale mit einem Zwei-Kanal-Frequenzanalysator (Weston Boonshaft & Fuchs 711 CL) bestätigte die on-line gemessene spektrale Kreuzleistungsdichte. Die Apparatur selbst zeigte einen Frequenzverlauf, der einem Tiefpaß entspricht, dessen Grenzfrequenz bei ~ 300 Hz liegt. Diese obere Grenze ergibt sich aus der Kapazität von Zählrohr und Kabel und dem Eingangswiderstand der Verstärker. Durch Bildung der Kohärenzfunktion (Gl.6) war es jedoch möglich, die Zerfallskonstante α des prompten Flusses zu bestimmen.

Fehler und Fehlerquellen

Alle Größen, die zur Bestimmung von β nach Gl.7 notwendig sind, haben eine gewisse Ungenauigkeit. Die statistischen, durch die endliche Meßzeit bedingten Fehler der Strommittelwerte und vor allem der spektralen Leistungsdichte können durch eine genügend lange Meßzeit so klein gehalten werden, daß sie gegen die systematischen Fehler zu vernachlässigen sind. Dies gilt vor allem für schnelle Reaktorsysteme, da dort die spektrale Leistungsdichte mit größerer Bandbreite gemessen werden kann als an thermischen Systemen (größerer Frequenzbereich für das Plateau der Reaktorübertragungsfunktion). Näheres über den Zusammenhang zwischen statistischem Meßfehler und Bandbreite bzw. Meßzeit findet man in /5/ und /9/.

Alle gemessenen und gerechneten Größen zur Bestimmung von β (Gl.7) wirken nur mit ihrem halben relativen Fehler auf die Genauigkeit des gesuchten β . Dieselbe Methode kann dazu verwendet werden, die absolute Reaktorleistung zu messen. Dann jedoch muß der Anteil verzögerter Neutronen bekannt sein. In diesem Fall gehen die relativen Fehler der Größen direkt, der von β sogar mit dem Faktor 2 in den Fehler der Reaktorleistung ein.

Genauigkeit der einzelnen Meßgrößen in Gl.7:

Durch die Eichung der Apparatur mit Gleich- bzw. Wechselspannungssignalen bekannter Amplitude wird die Ungenauigkeit der Verstärkung automatisch kompensiert. Somit sind die Mittelwerte der Ionisationskammerströme um höchstens 1% falsch. Wesentlich ungenauer ist die Bestimmung der spektralen Kreuzleistungsdichte. Zwar werden auch hier die Verstärkungsfaktoren mit einem Referenzsignal bestimmt; hinzu kommen jedoch noch die Fehler der Bandbreite der Bandpaßfilter und der Fehler der Multiplizierstufe. Die Ungenauigkeit der Bandbreite liegt bei etwa 4%. Die Genauigkeit der Multiplikation hängt stark von der Aussteue-

rung (Annäherung der Parabeläste durch Geradenstücke) und dem Korrelationsgrad zwischen den beiden Kammersignalen ab. Bei typischer Aussteuerung und einem Korrelationsgrad $\rho \approx 0,85$ (SNEAK-7B) wird ein Fehler von 5% erwartet. Zusammen mit der Genauigkeit des Referenzsignals ist der Fehler der gemessenen spektralen Kreuzleistungsdichte $\lesssim 10\%$.

Da die Spaltleistung zum größten Teil von einem Isotop (Masurca R2: U^{235} , SNEAK: Pu^{239}) erzeugt wurde, konnte der für das jeweilige Isotop gemessene Divenfaktor /10/ verwendet werden.

Der Korrekturfaktor g , die Abklingkonstante α_c und der eff. Anteil verzögerter Neutronen β_{eff} wurden in einer zweidimensionalen Multigruppenrechnung in Zylindergeometrie mit dem KFK/INR-Gruppensatz berechnet /11/. Da für den Reaktor Masurca R2 keine Daten zur Berechnung von g vorlagen, wurde der Wert von SNEAK 7B verwendet. Bei der Berechnung des Korrekturfaktors wurde nicht berücksichtigt

- a) der Einfluß des Detektorstandorts auf die Korrelationsamplitude und
- b) die Störung der Neutronenflußverteilung im Reaktor durch die Detektoren.

Da die Korrektur nur 20% beträgt und damit vergleichbar mit den Fehlern der gemessenen Größen ist, dürften die Vernachlässigungen keinen wesentlichen Einfluß auf den Wert für β_{eff} haben. Durch die Wahl der Zentralposition für die Detektoren konnte erreicht werden, daß beide den Reaktor auf die gleiche Art und Weise "sehen"; dies zeigt sich darin, daß die gemessene spektrale Kreuzleistungsdichte keinen imaginären Anteil aufweist. Mit dem Fehler für die Reaktorleistung /1/ ergibt sich dann für β_{eff} eine Ungenauigkeit von $\lesssim 6\%$.

Ergebnisse

Zur Bestimmung von β_{eff} (nach Gl.9) wurde die spektrale Kreuzleistungsdichte in einem Frequenzband gemessen, das im Plateau der Reaktorübertragungsfunktion ($\lambda_m \ll \omega \ll \alpha_c$) und im Plateau der Übertragungsfunktion der Apparatur ($\omega_1 \ll \omega \ll \omega_2$) lag. Außerdem wurde die SKLD(ω) über den gesamten Frequenzbereich (Abb.2) gemessen, um die Güte der Apparatur zu prüfen. Diese Messung zeigt deutlich die untere Grenzfrequenz $\omega_1 \approx 1 \text{ sec}^{-1}$ der Wechselstromverstärker und die obere Grenzfrequenz $\omega_2 = \frac{1}{RC} \approx 2000 \text{ sec}^{-1}$ der Detektorkanäle, die durch die Kombination des Eingangswiderstandes R und der Zählrohrkapazität C gebildet wird. Durch die Bildung der Kohärenzfunktion $\rho(\omega)$ (ebenfalls in Abb.2) konnte außerdem - wenn auch nicht so genau wie mit einer speziell für eine α -Messung ausgelegten Apparatur - die Zerfallskonstante α_c gewonnen werden.

In der folgenden Tabelle werden die an den Reaktoren Masurca R2, SNEAK-7A und -7B gefundenen Werte mit den entsprechenden berechneten Größen /11/ und den Werten aus der β_{eff} -Messung mit einer Cf-²⁵²-Quelle /1/ verglichen.

	Masurca *	SNEAK	
	R2	7A	7B
Messung am	2./3.3.1971	8.1.1971	20./21.7.1971
Anzeige des Linearkanals $\angle 10^{-7} \text{ A} /$	"Pilot" 0,25	"AEG 2" 2,0	"AEG 1" "AEG 2" 5,82 1,8
Reaktorleistung	(30 W) *	19,3 W \pm 5%	45,6 W \pm 5%
$\frac{I_1 I_2}{\text{SKLD}}$ (Plateau)	$1,56 \cdot 10^7 \text{ sec}^{-1}$ $\pm 10\%$	$1,11 \cdot 10^5 \text{ sec}^{-1}$ $\pm 10\%$	$3,1 \cdot 10^7 \text{ sec}^{-1}$ $\pm 10\%$
Empfindlichkeit W	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_c = \frac{\beta}{\lambda}$	Rechnung	-	$1,98 \cdot 10^4 \text{ sec}^{-1}$
	Rausch- analyse	$2,2 \cdot 10^4 \text{ sec}^{-1}$ ($\pm 5\%$) +	$1,65 \cdot 10^4 \text{ sec}^{-1}$ ($\pm 10\%$) +
Diven-Faktor	$0,795 \pm 1\%$	$0,815 \pm 2\%$	$0,815 \pm 2\%$
g	1,18	1,17	1,18
β_{eff}	Rechnung	-	$3,59 \cdot 10^{-3}$
	Cf ²⁵² - Quelle	-	$4,16 \cdot 10^{-3} \pm 5\%$
	Rausch- analyse	$(12,5 \cdot 10^{-3})$ *	$4,21 \cdot 10^{-3} \pm 6\%$

*) Die Messung an Masurca ist nur der Vollständigkeit wegen mitaufgeführt, da für das Core, an dem die Messung durchgeführt wurde, keine Leistungseichung vorlag. Der β_{eff} -Wert beruht auf der Verwendung der angegebenen Nennleistung.

+) Die Fehler für α_c geben die Ungenauigkeit an, mit der die Kohärenzfunktion an den theoretischen Verlauf (Gültigkeit des Punktreaktormodells vorausgesetzt) angepaßt werden konnte.

Diskussion der Ergebnisse

Die Messung der Abklingkonstanten α an Masurca und SNEAK-7B war problemlos im Gegensatz zu der von SNEAK-7A. Hier lag wegen der großen Empfindlichkeit der Ionisationskammern die Abschneidefrequenz der Kohärenzfunktion sehr nahe an der Grenzfrequenz des Magnetbandgeräts. Die Diskrepanz von 20% zur Rechnung ist daher möglicherweise dem Experiment zuzuschreiben.

Mögliche Ursache für den offensichtlich zu großen β_{eff} -Wert von Masurca wäre eine Flußverschiebung im Core und Reflektor durch den Einbau eines weiteren Brennelements, der notwendig war, um den Reaktivitätseffekt der Ionisationskammern zu kompensieren. Durch diese Flußverschiebung wäre dann der Linearkanal nicht mehr geeicht und dadurch die angegebene Leistung falsch.

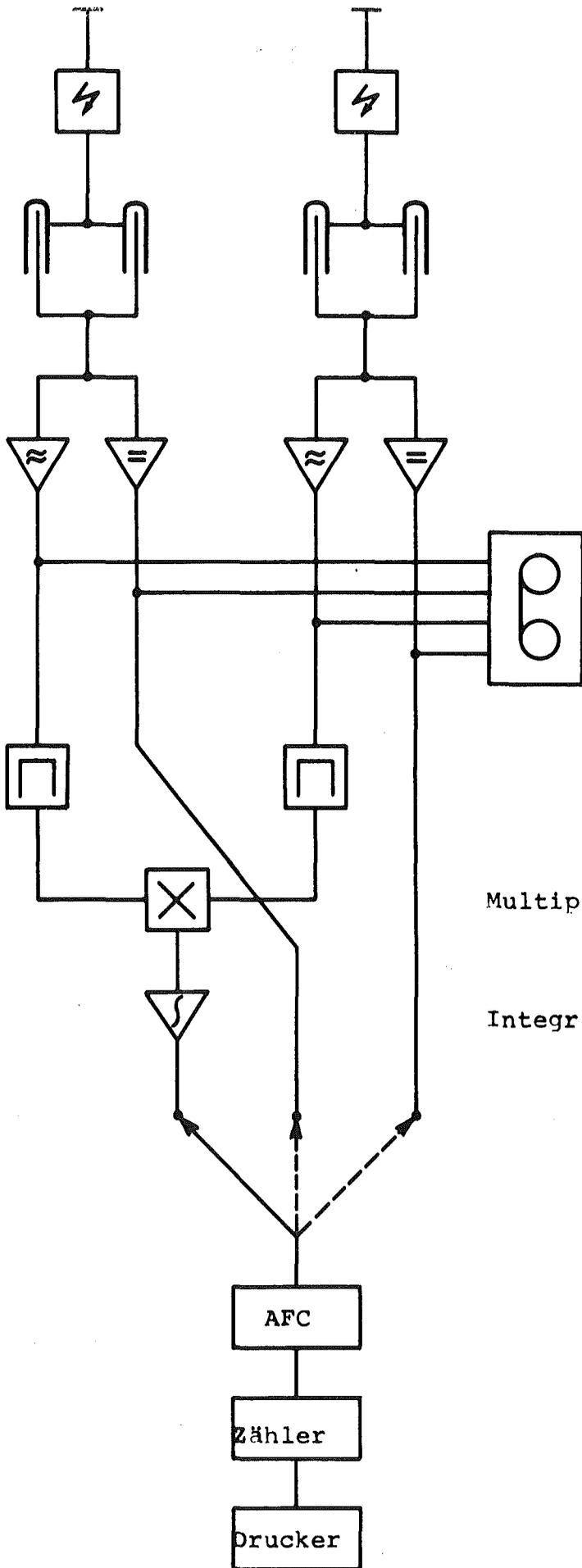
Die gefundenen Werte für β_{eff} an den Anordnungen SNEAK-7A und -7B liegen um 17% bzw. 15% höher als die berechneten Werte, stimmen jedoch sehr gut mit den ebenfalls experimentell gewonnenen Werten überein, die die Messung mit der Cf^{252} -Quelle liefert.

Diese Unterschätzung des effektiven Anteils verzögerter Neutronen durch Rechnungen korrespondiert mit der eingangs erwähnten Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Materialwerten.

Literatur

- /1/ E.A. Fischer, P.E. McGrath:
Physics Investigation of Two Pu-Fueled Fast Critical Assemblies; KFK-Bericht Nr.1939
- /2/ J.Y. Barré et al.:
Reactor Physics and Fast Power Breeders: Masurca Core R/Z Program; ANS Topical Meeting on New Developments in Reactor Physics and Shielding, Sept. 12-15, 1972
- /3/ H. Borgwaldt, D. Stegemann:
A Common Theory for Neutronic Noise Analysis Experiments in Nuclear Reactors; Nukleonik 7, 313, (1965)
- /4/ H. Borgwaldt:
Einheitliche Theorie der Korrelationsexperimente in Nulleistungsreaktoren; Externer Bericht INR-4/66-5
- /5/ W. Väth:
Bestimmung reaktorphysikalischer Parameter aus der Frequenzanalyse des Reaktorrauschens; Diplomarbeit, Technische Universität Karlsruhe, 1966
- /6/ E.F. Bennett:
The Rice Formulation of Pile Noise; Nuclear Science and Engineering, Vol. 8, (1960)
- /7/ W. Seifritz:
Die Bestimmung von kinetischen Reaktorparametern durch die Polaritätskorrelation des Neutronenrauschens im Frequenzbereich; Externer Bericht INR-4/69-24
- /8/ M. Otsuka, T. Iijima:
Space-Dependent Formula for Rossi- α Measurements; Nukleonik 7, 488, (1965)

- /9/ J.S. Bendat:
Principles and Applications of Random Noise Theory;
John Wiley & Sons, New York, (1958)
- /10/ B.C. Diven, H.C. Martin, R.F. Taschek, and J. Terrell:
Multiplicities of Fission Neutrons; Physical Review,
101, 3, February 1956
- /11/ E.A. Fischer:
Private Mitteilung



Batterien 400 V

He³-Zählrohre im Strom-
betrieb Texlium 339 S

Wechsel-Gleichstromver-
stärker
Keithley 103 bzw. 603

Magnetbandgerät
AMPEX FR 1300

Bandpassfilter
KROHN-HITE 330 M

Multiplizierstufe }
Integrierstufe } Analogrechner-
bausteine
EAI TR 10

Dymec 2210

Abb.1 Blockschaltbild der Apparatur

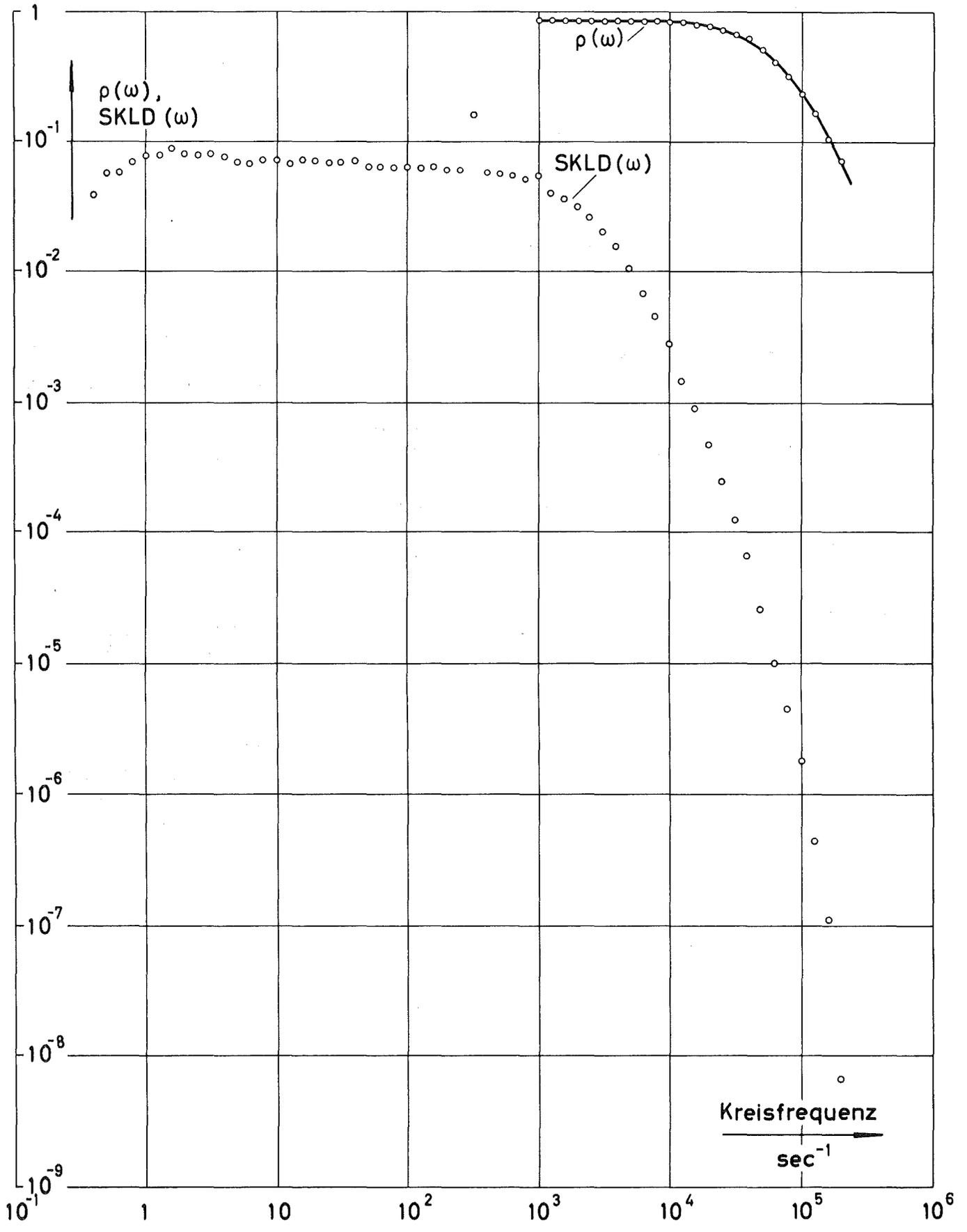


Abb.2 Spektrale Kreuzleistungsdichte (willkürlich normiert) und Kohärenzfunktion; gemessen an SNEAK-7B