

KFK-230

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Januar 1965

KFK 230

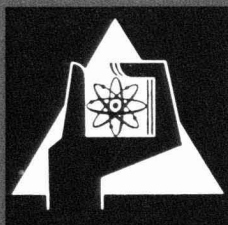
Abteilung Reaktorbetrieb

Ermittlung der Übertragungsfunktion des Reaktors FR 2 durch
Oszillatormessungen und durch Messung der Übergangsfunktion

H. W. Glauner

Geellschaft für Kernforschung m.b.H.
Zentralbibliothek

20. Aug. 1965



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Ermittlung der Übertragungsfunktion des Reaktors FR 2 durch Oszillatormessungen und durch Messung der Übergangsfunktion

Aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe

Von H. W. Glauner

Einleitung

Der Forschungsreaktor FR 2 ist ein Natururan-Reaktor vom Tank-Typ. Die Brennelemente sind zylindrische Vollstäbe aus metallischem Uran. Zur Kühlung und als Moderator dient Schwerwasser.

Ist $G_0(s)$ die Übertragungsfunktion des kalten Reaktors und $H(s)$ die einer internen Rückführung, so ist die Übertragungsfunktion des gesamten Systems

$$G(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s) \cdot H(s) \cdot N} \quad (1)$$

N ist die Reaktorleistung. $s = j\omega$ ω = Kreisfrequenz

Als Rückführungen wirken beim FR 2 die Temperatureffekte von Uran und Moderator sowie über längere Zeiten gesehen der Xe-Effekt.

Die Messung von $G(s)$ wird zuerst beschrieben. Anschließend folgt zum Vergleich die analytische Ermittlung.

Vorbereitungen zu den Messungen

Der mechanische Oszillator bestand aus einem Cd-Rohr von 42 mm Durchmesser, in dessen unterem Ende ein weiteres Cd-Rohr steckte, das durch einen Antrieb auf und ab bewegt werden konnte. Der Absorbenteil bildete mit dem elektrischen Antrieb eine Einheit, die von oben in den Zentralkanal des FR 2 eingesetzt wurde. Nach oben war der Kanal durch einen Stopfen verschlossen; durch eine Bohrung im Stopfen führten die Steuerleitungen und die Energieversorgung für den Getriebemotor (s. Abbildung 2).

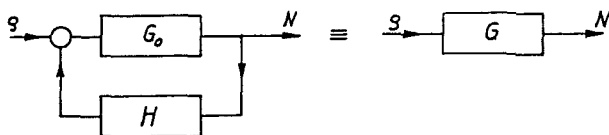


Abbildung 1. Blockschaltbild des Reaktors mit Rückführung

Im Gegensatz zu den bei kleiner Leistung durchgeführten Oszillatormessungen [1] mußte jetzt der ganze Getriebe- und Steuermechanismus in den Corebereich verlegt werden, damit der Kanal durch den Stopfen nach oben strahlendicht abgeschlossen werden konnte.

Der beabsichtigte Betrieb bei 12 MW brachte eine Reihe von Fragen mit sich, die kurz beschrieben werden sollen:

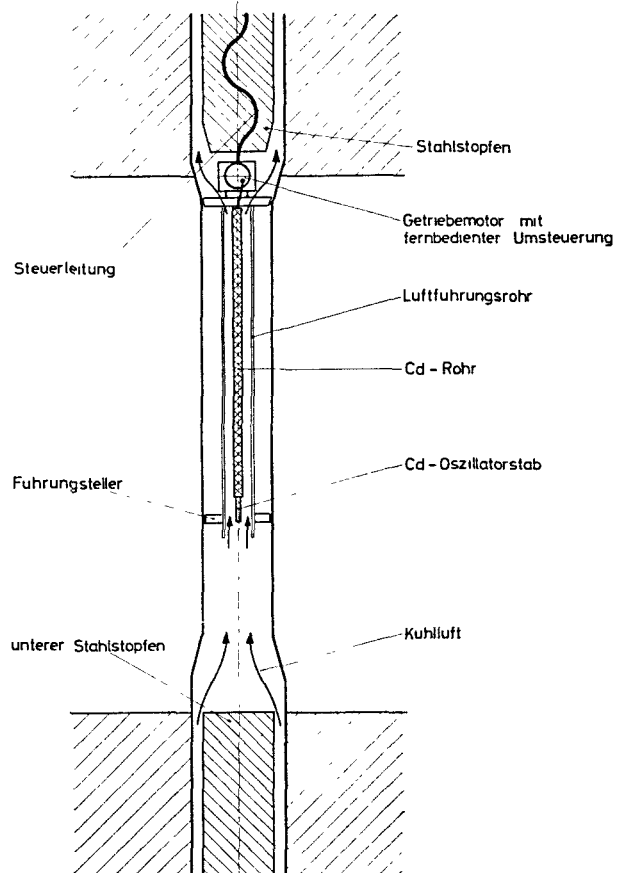


Abbildung 2. Reaktivitätsoszillator im Zentralkanal

1. In Coremitte ist die Strahlendosis etwa $1,5 \cdot 10^8$ rad/h bei 12 MW Reaktorleistung. Für den Absorber war dadurch eine relativ starke Erwärmung zu erwarten, die eine Kühlung erforderlich machte. Die Kühlung von Reaktor-Einbauten ist durch Luft möglich, die von unten nach oben den Zentralkanal durchströmt; die Luftmenge ist über Stellventile einregulierbar.

Es wurden deshalb einige Vorversuche gemacht. Dazu wurden an verschiedenen Stellen des Cd-Rohres Thermoelemente angebracht und ein Luftführungsrohr über das Cd-Rohr gezogen. Bei schrittweise gesteigerter Reaktorleistung wurde dann die Absorberrtemperatur in Abhängigkeit von der Kühlluft-Durchsatzmenge bestimmt. Ein weiterer Parameter war die Breite des Kühlpaltes vom Lüftungsrohr. Als günstig ergaben sich schließlich folgende Verhältnisse bei 12 MW-Reaktorleistung:

Breite des Kühlpaltes 4 mm,
 Luftdurchsatz 70 m³/h entsprechend 42 m/sec im Kühlpalt,
 maximal gemessene 75 °C bei 17 °C Luft-Temperatur am Cd-Absorber eintrittstemperatur.

2. Da der Absorber nicht im Zentralkanal befestigt, sondern nur von oben eingehängt war, war beim Betrieb der starken Luftkühlung mit Bewegungen des Absorbers um seine Ruhelage zu rechnen, die zu Reaktivitätsstörungen führen konnten. Es war dabei weniger an Schwingungen gedacht, sondern an unregelmäßige Bewegungen des Stabes, dessen unterer Führungsteller noch ca. 1 mm Abstand von der Zentralkanalwandung hatte. Bei 12 kW Reaktorleistung wurde deshalb die Neutronenflußanzeige der Reaktorinstrumentierung mit einem Oszillographen beobachtet, wobei der Luftdurchsatz stufenweise bis auf den Maximalwert erhöht wurde. Hierbei wurden keine Reaktivitätsstörungen beobachtet.

3. Der Getriebemotor mit der Umsteuereinrichtung für verschiedene Drehzahlen war der hohen Strahlendosis ausgesetzt, was im Hinblick auf die Isolationsfestigkeit des Antriebsmotors, der Steuerleitungen, Relais usw. Fragen aufwarf. Aus früheren Messungen war eine Strahlendosis am Einbauort des Antriebs von ca. $5 \cdot 10^7$ rad/h bei 12 MW bekannt. Wir haben deshalb Materialproben vom Steuerkabel, Mikroschalter, Relais u. a. in einer Harwell-Kapsel in einem Isotopenkanal mit einer Dosis $>10^9$ rad bestrahlt und nach entsprechender Abklingzeit inspiziert. Einige Materialien, die durch die Bestrahlung mechanische und elektrische Veränderungen zeigten, konnten so rechtzeitig aussortiert werden.

Es soll noch kurz auf den Antrieb des oszillierenden Cd-Stabes eingegangen werden. Hierzu diente ein Getriebemotor mit Exzenter, von dem ein dünner Stahl-draht zum beweglichen Cd-Rohr lief. Der Hub war unveränderlich auf ± 40 mm festgelegt; durch eine Impulsfernsteuerung war die Drehzahl des Exzenters in 10 Stufen von $n = 10$ U/min bis $n = 0,01$ U/min umschaltbar. Beim Nulldurchgang wurde vom Exzenter

ein Impuls ausgelöst; dieses Signal wird mit dem Null-durchgang der Neutronenflußoszillation verglichen und ergibt damit den Phasengang der Übertragungsfunktion.

Durchführung der Messungen

Vor Beginn der Oszillationen steht der Oszillatorstab in seiner Mittellage. Da die Oszillationen bei abgeschaltetem Regelsystem gemacht werden, muß der Reaktor vorher auf einen quasistationären Gleichgewichtszustand gebracht werden; dieses kann an der Bewegung des Regelstabes bei eingeschaltetem Regelsystem erkannt werden. Sind diese Bewegungen über längere Zeit zur Ruhe gekommen, kann mit den Oszillationen begonnen werden.

Die Registrierung des Neutronenflußverlaufs erfolgte einmal mit dem Linienschreiber in der Schaltwarte sowie zusätzlich mit einem Linienschreiber mit schnellem Vorschub für die schnellen Oszillationen.

Die sin-förmigen q -Oszillationen sind ihrem Betrag nach so klein gehalten, daß Linearität zwischen Eingangssignal Δq und Ausgangssignal ΔN angenommen werden kann. Mit dieser Annahme kann für die Übertragungsfunktion geschrieben werden:

$$G(s) = \frac{\beta}{N} \frac{\Delta N}{\Delta q} \quad (2)$$

β = Anteil verzögerter Neutronen,
 ΔN = Leistungsoszillation,
 N = mittlere Reaktorleistung,
 Δq = Reaktivitätsoszillation.

Die Auswertung der gemessenen Oszillationen erfolgt über diese Beziehung.

Die Übertragungsfunktion des kalten Reaktors $G_0(s)$ wurde zuerst aufgenommen, die Reaktorleistung war dabei 12 kW. Da schon früher Messungen gemacht waren [1], wurden jetzt nur einige Punkte wiederholt. Es sollte dabei einmal die Funktion der Anordnung getestet werden, zum andern sollten die bei Nennlast aufgenommenen Werte mit diesen bei „Nullenergie“ aufgenommen verglichen werden.

In der folgenden Tabelle sind für ΔN bzw. N Relativwerte angegeben, nämlich der Ausschlag des Schnellschreibers in Skalenteilen; Δq ist durch eine vorausgegangene Periodenmessung bestimmt worden.

Tabelle 1. Meßwerte zur Bestimmung der Übertragungsfunktion des kalten Reaktors

ω [sec ⁻¹]	Δq	ΔN [Skt.]	N [Skt.]	$G_0(s)$	
				gemessen	theoretisch
0,021	0,525 mk	17,0	50,3	4,83	4,97
0,052		9,9	48,3	2,93	2,90
0,105		7,2	48,4	2,13	2,10
0,21		5,2	47,6	1,56	1,60
0,52		3,7	47,6	1,15	1,23

Aus zeitlichen Gründen wurde hier auf die Ermittlung der Phase verzichtet. Der theoretische Verlauf ergibt sich zu

$$G_0 = \beta \frac{1 - s \sum \frac{\beta_i}{s + \lambda_i}}{s \left(1 + \sum \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \right)} \quad (3)$$

mit $s = j \omega$

β_i = Anteil der verzögerten Neutronen der Gruppe i
 λ_i = Zerfallskonstante der verzögerten Neutronen

Für die β_i wurden die in ANL 5800 angegebenen Werte benutzt, die in einer weiteren Rechnung [2] unter Berücksichtigung der Spaltungen von ^{235}U und ^{238}U und der im D_2O -Moderator ausgelösten Photoneutronen für das FR 2-Core modifiziert wurden.

Die Übertragungsfunktion des warmen Reaktors wurde aufgenommen, nachdem der Reaktor einige Tage bei 12 MW ohne Unterbrechung gelaufen war. Da auch langsame Oszillationen vorgesehen waren, mußte vor allem die ^{135}Xe -Konzentration soweit im Gleichgewicht sein, daß bei abgeschalteter Regelung keine störende Reaktivitätsdrift zu erwarten war. So konnte der Bereich $0,0021 \leq \omega \leq 0,52$ erfaßt werden.

Bei der Auswertung der Messung tritt nun eine Schwierigkeit auf: bei kaltem Reaktor konnte $\Delta\rho$ absolut durch eine Periodenmessung bestimmt werden, damit auch der absolute Verlauf der Übertragungsfunktion. Bei 12 MW ist infolge der veränderten Trimmstabstellung durch Lasteffekte (^{135}Xe , Temperatureffekte) der Wert von $\Delta\rho$ verändert; es ist jetzt nicht möglich, $\Delta\rho$ direkt zu bestimmen, weder durch eine Periodenmessung — hierbei würde die zulässige Reaktorleistung überschritten, außerdem würden sich die Temperatureffekte störend auswirken — noch durch Vergleich mit dem geeichten Regelstab, da hierfür keine genügend genauen Eichkurven vorliegen.

Als Lösung bietet sich an, $\Delta\rho$ aus den Oszillatormessungen bei 12 MW selbst zu bestimmen. Im nächsten Abschnitt wird durch eine analytische Behandlung gezeigt, daß die Übertragungsfunktion für $\omega \geq 0,2$ beim warmen und kalten Reaktor praktisch gleich ist. Für den Bereich $\omega \geq 0,2$ werden deshalb die Meßwerte vom warmen Reaktor an die vom kalten Reaktor angepaßt. Man erhält dadurch für den warmen Reaktor $\Delta\rho = 0,66$ mk als Reaktivitätsamplitude.

Abbildung 3 zeigt einen Meßstreifen vom Schnellschreiber, der am Linearkanal der Neutronenfluß-

Tabelle 2. Meßwerte zur Bestimmung der Übertragungsfunktion des warmen Reaktors

ω [sec $^{-1}$]	$\Delta\rho$	ΔN [Skt]	N [Skt]	$ G(s) $	φ
0,0021	0,66 mk	12,5	63	2,26	+10°
0,0052		15	62	2,76	+14°
0,0105		18,2	67	3,10	+11°
0,021		20,8	65	3,66	- 8°
0,052		15,2	67	2,58	-26°
0,105		11,2	66	1,94	-31°
0,21		9,0	64	1,61	-26°
0,52		7,0	65	1,23	-26°

Instrumentierung angeschlossen ist. Die Markierungen geben den Nulldurchgang des Oszillators an, der gegen den Nulldurchgang des Neutronenflusses verschoben ist und damit die Phasenverschiebung φ liefert. Die Ermittlung der Amplitude (des Betrages) von $G(s)$ erfolgt nach Gleichung (2).

Der Verlauf der Übertragungsfunktion ist in Abbildung 4 nach Betrag und Phase dargestellt.

Analytische Ermittlung der Übertragungsfunktion des warmen Reaktors $G(s)$

Es war

$$G(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s) \cdot H(s) \cdot N}$$

Die Rückführungen $H(s)$ teilen sich auf in die Anteile

$$\left. \begin{aligned} H_u(s) &= k_u \frac{T_u(s)}{N(s)} \\ H_m(s) &= k_m \frac{T_m(s)}{N(s)} \\ H_{Xe}(s) &= -\frac{\lambda_{Xe}(s)}{N(s)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

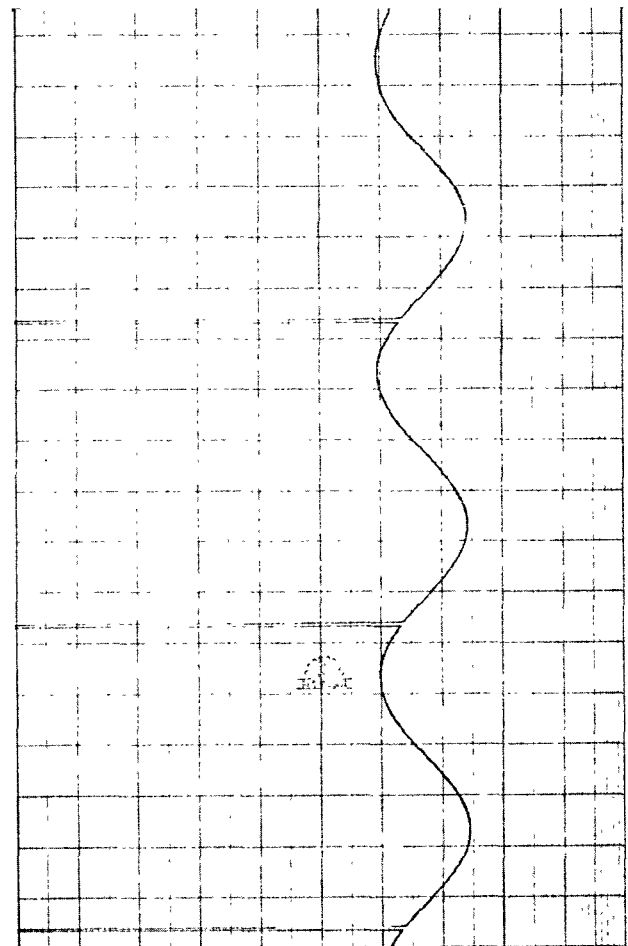


Abbildung 3. Leistungsozillation bei Betrieb des Reaktivitätsoszillators. Mittlere Reaktorleistung 12 MW; $\omega = 0,052$ sec $^{-1}$

für die Temperatureffekte von Uran und Moderator sowie für die Xe-Vergiftung. Die $H(s)$ werden im folgenden bestimmt.

In Gleichung (4) bedeuten k_u und k_m die Temperaturkoeffizienten von Uran bzw. Moderator, $T_u(s)$ und $T_m(s)$ die L-transformierten Uran- bzw. Moderator-temperaturen und $N(s)$ die L-transformierte Reaktorleistung.

Zur Ermittlung der Rückführungen durch Uran- und Moderatorerwärmung wird das in Abbildung 5 dargestellte Kreislaufschema zu Hilfe genommen.

Die Uranerwärmung wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{dT_u}{dt} = \frac{N}{C_u} - \alpha \left(T_u - \frac{T_{m1} + T_{m2}}{2} \right). \quad (5)$$

- T_u = mittlere Urantemperatur,
- N = Reaktorleistung,
- C_u = 140 Kal/°C Wärmekapazität von Uran,
- α = Konstante,

T_{m1}, T_{m2} = Moderator Eintritts- bzw. Austritts-temperatur.

Im stationären Betrieb ist $\frac{dT}{dt} = 0$; die mittlere Urantemperaturerhöhung über der Kühlmitteltemperatur ist dabei

$$\left(T_u - \frac{T_{m1} + T_{m2}}{2} \right) = 68 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Dieser Wert ist bei 12 MW Reaktorleistung durch eine Temperaturmessung in einem Uranstab und durch Messung der Flußverteilung über das Reaktorcore gefunden worden [3]. Er liegt wegen der im Betrieb teilweise eingefahrenen Trimmstäbe und der damit verbundenen Verkleinerung der effektiven Spaltzone über dem theoretischen Wert. Mit diesen Zahlenwerten wird in obiger Gleichung $\alpha = 0,3 \text{ sec}^{-1}$.

Die Moderatorerwärmung ist gegeben durch

$$\frac{dT_{m2}}{dt} = \alpha \frac{C_u}{C_1} \left(T_u - \frac{T_{m1} + T_{m2}}{2} \right) - \frac{q_1 c_1}{C_1} (T_{m2} - T_{m1}) \quad (6)$$

mit $C_1 = 27\,500 \text{ Kal/}^\circ\text{C}$ (Wärmekapazität des Moderators),

- $q_1 = 430 \text{ l/sec}$ (Moderator-Durchflußmenge),
- $c_1 = 1,1 \text{ Kal/l}$ (spezifische Wärme des Moderators).

Am Wärmetauscher gilt die Beziehung für den stationären Fall

$$(T_{m2} - T_{m1}) q_1 c_1 = (T_{w2} - T_{w1}) q_2 c_2 \quad (7)$$

- mit $q_2 = 500 \text{ l/sec}$ (H_2O -Durchflußmenge),
- $c_2 = 1,0 \text{ Kal/l}$ (spezifische Wärme vom H_2O).

Für die untersuchten langsamen Oszillationen kann man am Wärmetauscher mit quasistationären Verhältnissen für obige Energiebilanz rechnen, so daß hier keine Differentialgleichung angeschrieben werden muß.

Weiterhin wurde zwischen den Wärmetauscher-Auslauftemperaturen durch Messung die Beziehung gefunden

$$T_{m1} = 3^\circ \frac{N}{N_0} + T_{w2} \quad (8)$$

$N_0 = 12 \text{ MW}$ ist die Nennleistung.

Im Kühlturm wird das H_2O auf die Temperatur T_{w1} abgekühlt; diese Temperatur liegt um den Kühlgrenzabstand a über dem Taupunkt T_f . Die langen Rohrleitungen vom Kühlturm zum Wärmetauscher stellen eine Verzögerungsstrecke und das Kühlturmbecken eine Mischstelle dar, so daß $T_{w1}(t)$ am Wärmetauscher-einlauf schlecht analytisch zu bestimmen ist. Es wurde deshalb $T_{w1}(t)$ nach einer „sprungförmigen“ Leistungserhöhung von 0 auf 12 MW gemessen. Der Verlauf kann dargestellt werden durch

$$\left. \begin{aligned} T_{w2}(t) &= T_f && \text{für } t - \tau \leq 0 \\ T_{w2}(t) &= T_f + 10,7^\circ (1 - e^{-\frac{t-\tau}{\tau_0}}) && \text{für } t - \tau > 0 \end{aligned} \right\} (9)$$

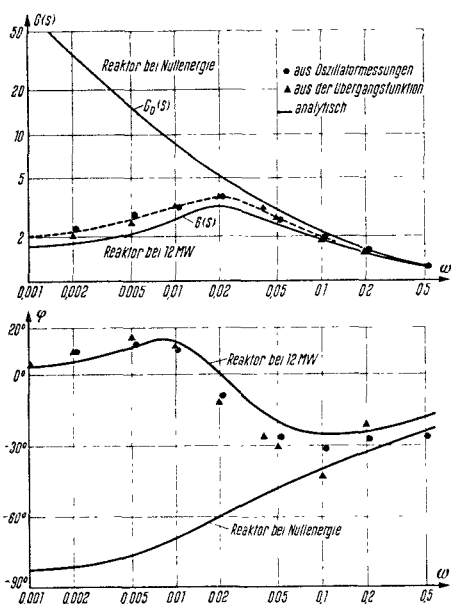


Abbildung 4. Übertragungsfunktion nach Betrag und Phase bei 12 MW

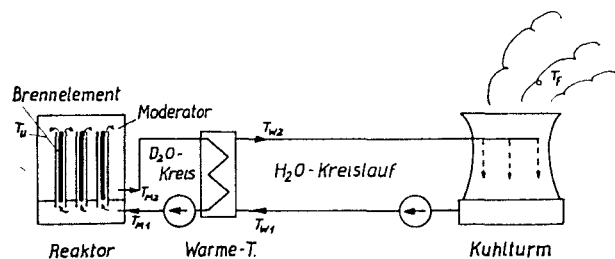


Abbildung 5. Kreislaufschema des FR 2

$\tau = 540$ sec ist die gemessene Verzögerungszeit (Laufzeit), $\tau_0 = 1800$ sec ist die gemessene Zeitkonstante.

In der analytischen Darstellung des Temperatur- (bzw. Wärme-) Transports sind kurzzeitige Laufzeiteffekte vernachlässigt, z. B. die Laufzeit des Kühlmediums durch die Brennelemente, die Laufzeit des D₂O vom Reaktor über den Wärmetauscher zurück zum Reaktor u. a. Lediglich im H₂O-Kreislauf wird die Verzögerungsstrecke zum Kühlturm berücksichtigt.

Für die Rückführungen interessieren T_u und T_{m2} mit den zugehörigen Temperaturkoeffizienten. Die Gleichungen (5) bis (9) werden nach diesen Größen umgeformt und die Zahlenwerte eingesetzt.

Man erhält dann

$$T_{m2}(t) = T_f + 15,6 (1 - e^{-8,4 \cdot 10^{-3} t}) + 10,7 (1 - e^{-5,5 \cdot 10^{-4} (t-\tau)}) \quad ^\circ\text{C}$$

und

$$T_u(t) = T_{m2}(t) + 68 (1 - e^{-0,33 t}) \quad ^\circ\text{C}.$$

Die Lösung für $T_{m2}(t)$ wird in Abbildung 6 mit den gemessenen Werten verglichen; der Unterschied in den dargestellten Verläufen rührt daher, daß bei dem gemessenen Verlauf die Taupunkttemperatur vor dem Reaktorstart nicht angefahren wurde.

Die L-Transformation liefert nun unter Berücksichtigung der Randbedingungen die Übertragungsfunktion der Rückführung durch die Uran- und Moderatorerwärmung zu

$$H_u(s) = k_u \frac{T_u(s)}{N(s)} = \frac{k_u}{N} \left(15,6 \frac{8,4 \cdot 10^{-3}}{s + 8,4 \cdot 10^{-3}} + 10,7 \frac{5,5 \cdot 10^{-4}}{s + 5,5 \cdot 10^{-4}} e^{-540s} + 68 \frac{0,33}{s + 0,33} \right), \quad (10a)$$

$$H_m(s) = k_m \frac{T_{m2}(s)}{N(s)} = \frac{k_m}{N} \left(15,6 \frac{8,4 \cdot 10^{-3}}{s + 8,4 \cdot 10^{-3}} + 10,7 \frac{5,5 \cdot 10^{-4}}{s + 5,5 \cdot 10^{-4}} e^{-540s} \right). \quad (10b)$$

Hierbei sind die Glieder mit kleinen Zeitkonstanten vernachlässigt, da nur relativ langsame Oszillationen untersucht werden.

Die Temperaturkoeffizienten sind aus einer Messung zu $k_u^* = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ und $k_m^* = 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ bestimmt worden [3]. Diese Werte gelten für eine über das gesamte Core gleichmäßige Temperaturerhöhung.

Bei den Brennelementen ist die Temperatur in Coremitte höher als am Rande. Damit muß zur Berücksichtigung der Reaktivitätswirkung ein Wichtungsfaktor μ eingeführt werden, der sich nach der Störungstheorie zu

$$\mu = \frac{\int_{\text{CORE}} \Phi_T^2(r) \cdot \Phi_T^*(r) dV}{\bar{\Phi}_T \int_{\text{CORE}} \Phi_T^2(r) dV} \quad (11)$$

ergibt; dabei ist $\Phi_T(r)$ der thermische Neutronenfluß, $\Phi_T^*(r)$ der adjungierte Fluß und $\bar{\Phi}_T$ der über das Core gemittelte Fluß.

Nimmt man an, daß die (über den Brennelementquerschnitt gemittelte) Urantemperatur dem Neutronenfluß proportional ist, so erhält man für den ungestörten Reaktor, bei dem die Trimmstäbe ganz ausgefahren sind, $\mu = 1,33$ [2].

Für den Reaktor mit im Betrieb teilweise eingefahrenen Trimmstäben wurde mit Hilfe der Flußverteilungsmessungen nach [1] der Wichtungsfaktor zu $\mu = 1,50$ bestimmt [3].

In Gleichung (10a) wird damit für den effektiven Temperaturkoeffizienten von Uran

$$k_u = \mu \cdot k_u^* = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

eingesetzt. Für den Moderator kann wegen der guten Durchmischung des D₂O nach dessen Austritt aus den Brennelement-Kühlspalten eine über den Corequerschnitt gleichmäßige Temperaturverteilung angenommen werden, d. h. $\mu_m = 1$ und damit $k_m = k_m^*$.

Die Rückführung durch Xe-Vergiftung ist im untersuchten Bereich $\omega > 0,001$ vernachlässigbar.

Die Übertragungsfunktion des warmen Reaktors erhält man durch Einsetzen von Gleichung (10) in Gleichung (1). In Abbildung 4 ist $G(s)$ für 12 MW Reaktorleistung dargestellt.

Anhang. Gleichung (5) ist aus einer Wärmeleistungsgleichung (= Wärmebilanz) abgeleitet, dabei ist für die Wärmeabfuhr die Größe $\alpha = 0,3 \text{ sec}^{-1}$ eingeführt. Der Kehrwert kann näherungsweise als gemittelte, radiale Zeitkonstante für die Uranerwärmung aufgefaßt werden.

Nach [4] ergibt die Lösung der Wärmeleitungsgleichung für ein FR 2-Brennelement die Erwärmungszeitkonstanten in radialer Richtung zu

$$\frac{1}{\alpha_0} = 4,3 \text{ sec} \quad \text{für die Grundwelle}$$

$$\frac{1}{\alpha_1} = 0,9 \text{ sec} \quad \text{für die 1. Oberwelle}$$

usw.

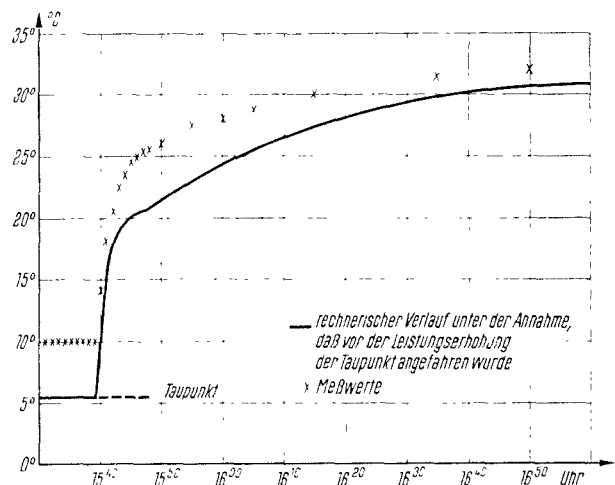


Abbildung 6. Moderatortemperatur $T_{M2}(t)$ beim Anfahren von 12 MW. Betrieb mit 2 Kühltürmen am 31. März 1964

Aufnahme der Übergangsfunktion und Ermittlung der Übertragungsfunktion

Die *Übergangsfunktion* stellt die Antwort der Reaktorleistung auf eine sprungförmige Reaktivitätsstörung dar. Diese Funktion kann sowohl für den Reaktor allein als auch für das System Reaktor + Regler bestimmt werden.

Unsere Untersuchungen erstreckten sich auf das Verhalten des unregulierten Reaktors. Wird der Reaktor bei niedriger Leistung betrieben, so führt ein positiver Reaktivitätssprung bekanntlich zu einem exponentiellen Leistungsanstieg. Der gleiche Versuch im Bereich höherer Leistungen zeigt, daß der exponentielle Anstieg durch Gegenreaktivitätseffekte von Uran- und Moderatorerwärmung unterdrückt wird.

Zur Aufnahme der Übergangsfunktion wurde der Reaktor zuerst einige Stunden bei 11 MW gefahren, bis sämtliche Temperaturen eingelaufen waren. Der Reaktor kann dann unregelt über längere Zeit (über 1 Stunde) auf konstanter Leistung gehalten werden, vorausgesetzt, daß sich die Außenlufttemperatur nicht ändert. Der Versuch wurde deshalb in einer Nacht gemacht. Nach Ziehen des Regelstabes um 50 mm ergibt sich der in Abbildung 7 dargestellte Verlauf der Reaktorleistung, die nach dem Überschwingen auf einen konstanten Wert einläuft und unregelt über ca. 1 Stunde beobachtet wurde. Anschließend wurde der Regelstab wieder um 50 mm eingefahren.

Die *Übertragungsfunktion* $G(s)$ kann aus der Übergangsfunktion bestimmt werden. Es ist

$$G(s) = \frac{\beta}{N} \frac{L(A)}{L(E)} \quad (12)$$

Dabei ist $L(A)$ die L-transformierte Ausgangsfunktion, hier also die transformierte der gemessenen Übergangsfunktion $A(t)$, und $L(E)$ ist die transformierte Eingangsfunktion, hier die transformierte Sprungfunktion der Reaktivitätsstörung Δq . Der Faktor β/N dient zur Normierung. Mit

$$L(A) = \int_0^{\infty} A(t) \cdot e^{-st} dt$$

und

$$L(E) = \frac{\Delta q}{s}$$

erhält man mit $s = j\omega$

$$G(s) = -\frac{1}{N} \frac{\beta}{\Delta q} s \int_0^{\infty} A(t) \cdot e^{-st} dt.$$

Bedingung für die Durchführbarkeit der Integration ist, daß das Integral einen endlichen Grenzwert annimmt. Aus dem vorgegebenen Verlauf von $A(t)$ ist zu erkennen, daß das Integral oszilliert (s. Abbildung 7); man muß deshalb geeignete Integrationsgrenzen ansetzen [5]. Mit der gemessenen Übergangsfunktion $A(t)$ ist die Integration mit $\Delta q = 0,35$ mk aus der Eichkurve des FR-Stabes für 50 mm Hub für verschiedene ω numerisch durchgeführt. Man erhält daraus $G(s)$ nach Betrag und Phase.

In Abbildung 4 sind die erhaltenen Werte zum Vergleich mit den aus den Oszillatormessungen erhaltenen Werten eingetragen.

Diskussion

Die nach zwei Methoden meßtechnisch bestimmten Übertragungsfunktionen liegen gut zusammen. Der analytisch ermittelte Verlauf weicht bei kleinen ω hiervon ab. Diese Abweichung kann zum Verschwinden gebracht werden, wenn etwas kleinere Temperaturkoeffizienten k_u und k_m benutzt werden. Die benutzten k_u und k_m sind bei einem Reaktor mit ungestörtem Corezentrum gemessen [3]; bei den Oszillatormessungen war ein Cd-Rohr im Zentralkanal eingebaut, wodurch ein kleinerer Temperaturkoeffizient denkbar wird.

Literatur

- [1] Glauner H., Hagen S. und Diederichs M.: KFK-Bericht 177
- [2] Wintzer D. (GfK Karlsruhe): private Mitteilung
- [3] Glauner H., Diederichs M. und Eisermann W.: KFK-Bericht 231
- [4] Calderola L. und Schlechtendahl E. G.: Reactor Temperatur Transients with Spatial Variables KFK Bericht 223
- [5] Unbehauen H.: Zt. Regelungstechnik, 551 (1963)

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. H. W. Glauner, Gesellschaft für Kernforschung mbH., 75 Karlsruhe, Weberstr. 5

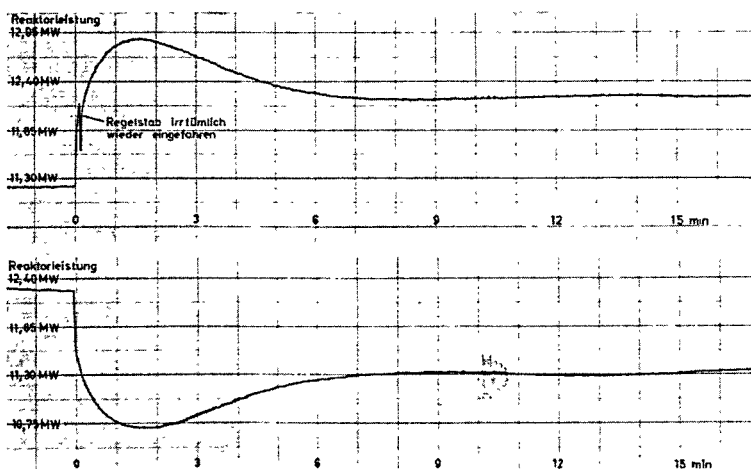


Abbildung 7. Übergangsfunktion $A(t)$ nach dem Aus- bzw. Einfahren des Regelstabes um 50 mm entsprechend 0,35 mk

Ermittlung der Übertragungsfunktion des Reaktors FR 2 durch Oszillatormessungen und durch Messung der Übergangsfunktion

Am Reaktor FR 2 wurde bei Vollast (12 MW) die Übertragungsfunktion gemessen. Die Wirkung der internen Rückführungen durch Uran- und Moderator-Temperatureffekte wird dabei gezeigt. Zum Vergleich wird eine analytische Ermittlung gebracht, in der ein vereinfachtes Wärme-Kreislaufschema zu Hilfe genommen wird. Eine weitere Ermittlung der Übertragungsfunktion erfolgt aus der gemessenen Übergangsfunktion nach einer sprunghaftigen Reaktivitätserhöhung.

The Determination of the Transfer Function of the Reactor FR 2 by Oscillation Measurement and by Measurement of the Function of Transition

The transfer function of the reactor FR 2 was determined at full power (12 MW). The internal feedback by uranium and moderator temperature effects are demonstrated. For comparison the measured function is followed by an analytical determination using a simplified heat transfer circuit. Finally the transfer function is analysed from the measured neutron flux after a step in reactivity.

Evaluation de la fonction de transfert du réacteur FR 2

La fonction de transfert du réacteur FR 2 a été déterminée sous pleine charge (12 MW). L'influence des reflux internes par des effets d'uranium, de modérateur et de température est démontrée. A titre de comparaison le problème est traité de manière analytique à l'aide d'un schéma du cycle thermique simplifié. En plus la fonction de transfert a été déterminée à partir de la fonction de transfert mesurée après une élévation subite de la réactivité.