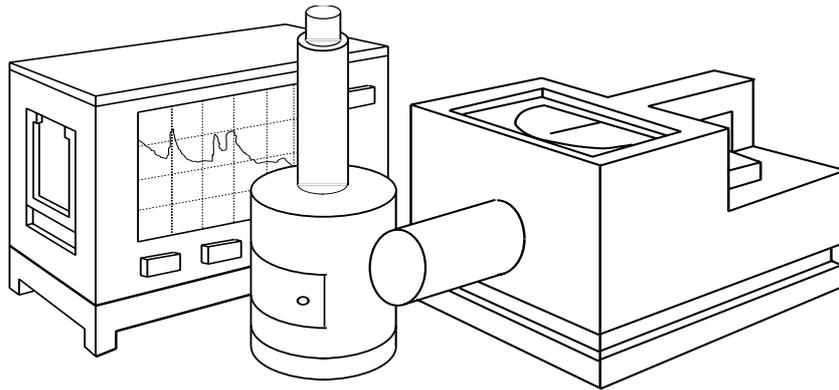


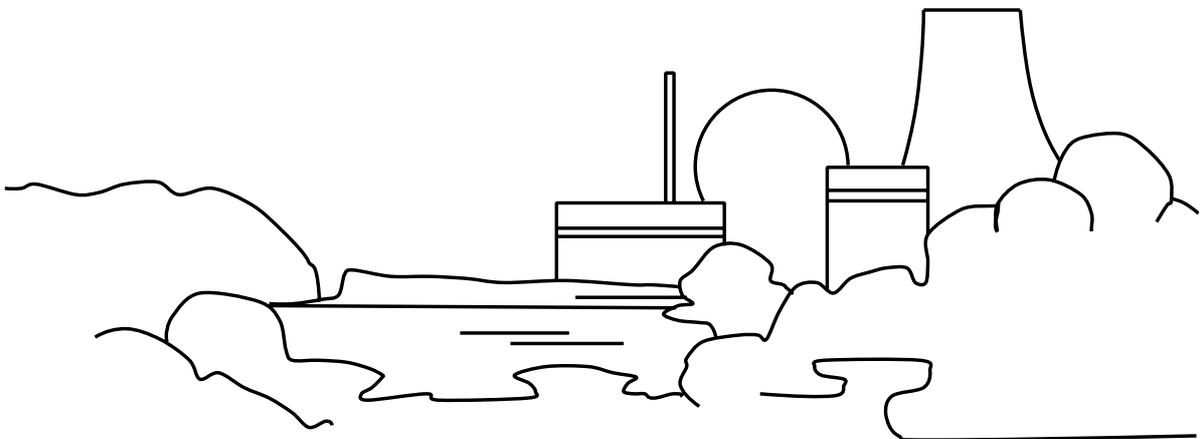
**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DRESDEN**
Institut für Energietechnik
Ausbildungskernreaktor



REAKTORPRAKTIKUM

VERSUCH

"Steuerstabkalibrierung"



Praktikumsanleitung
Versuch "Steuerstabkalibrierung"

Gliederung:

1. . . Zielstellung
 2. . . Aufgabenstellung
 3. . . Einleitung
 4. . . Methoden der Reaktivitätsbestimmung
 5. . . Versuchsdurchführung
 6. . . Berechnung der Gesamtreaktivität der Regelstäbe sowie der Überschuss- und Abschaltreaktivität
 7. . . Hinweise zum Protokoll
 8. . . Kontrollfragen
- Anhang: Ableitung der INHOUR-Gleichung

Stand: 12.05.2011

1. Zielstellung

Von entscheidender Bedeutung für den sicheren Betrieb eines Kernreaktors ist die Kenntnis

- der Reaktivitätskennlinien aller Steuer- und Regelungseinrichtungen
- der maximal verfügbaren positiven Reaktivitätsreserve (Überschussreaktivität)
- der Abschaltreaktivität.

Anhand der Kalibrierung eines Steuerstabes soll die Beeinflussung der Reaktivität beim Einbringen eines Neutronenabsorbers in die Spaltzone quantitativ untersucht und der theoretische Zusammenhang mit anderen reaktorphysikalischen Größen veranschaulicht werden.

2. Aufgabenstellung

- Ein Steuerstab des Reaktors AKR ist in Abhängigkeit von der Stabposition nach der Methode der stabilen Reaktorperiode zu kalibrieren.
Aus den gemessenen Verdopplungszeiten der Reaktorleistung sind die zugehörigen stabilen Perioden und damit die Reaktivitätsäquivalente nach der INHOUR-Gleichung zu berechnen.
- In Abhängigkeit von der Stabposition sind:
 - die differentielle Steuerstabkennlinie und
 - die integrale Steuerstabkennlinie grafisch darzustellen.
- Unter Zuhilfenahme der Kennlinien für die anderen Steuerstäbe des AKR sind zu ermitteln:
 - die Überschussreaktivität und
 - die Abschaltreaktivität bei partieller Abschaltung.

3. Einleitung

Die Reaktivitätskennwerte der Steuer- und Regeleinrichtungen eines Reaktors sind wesentliche reaktorphysikalische Parameter und müssen u.a. aus Gründen der nuklearen Sicherheit bekannt sein. Deshalb ist es notwendig, nach dem ersten Erreichen des kritischen Zustandes eines Reaktors und nach wesentlichen Änderungen im Aufbau der Spaltzone die Wirksamkeit der Steuerstäbe zu bestimmen.

Aus der Stellung der kalibrierten Steuerstäbe beim kritischen Reaktor kann z.B. die Überschussreaktivität, die das System besitzt, bestimmt werden. Darüber hinaus lassen sich Reaktivitätsänderungen, die durch verschiedene Ursachen im Reaktor auftreten können, mit Hilfe kalibrierter Steuerstäbe leicht angeben.

Die Reaktivitätskennwerte von Steuerstäben können auch theoretisch ermittelt werden. Das ist jedoch ein relativ schwieriges Problem, welches nur mit einer Reihe vereinfachender Annahmen in vernünftigen Rahmen gelöst werden kann. Die auf diese Weise berechneten Werte müssen auf jeden Fall experimentell überprüft werden.

Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge soll eine Anordnung gemäß Abb. 1 betrachtet werden. Parallel zur z-Achse der zylindrischen Spaltzone eines thermischen Reaktors wird ein Neutronenabsorber vertikal bewegt. Legt man den Koordinatenursprung in die Mittelebene der

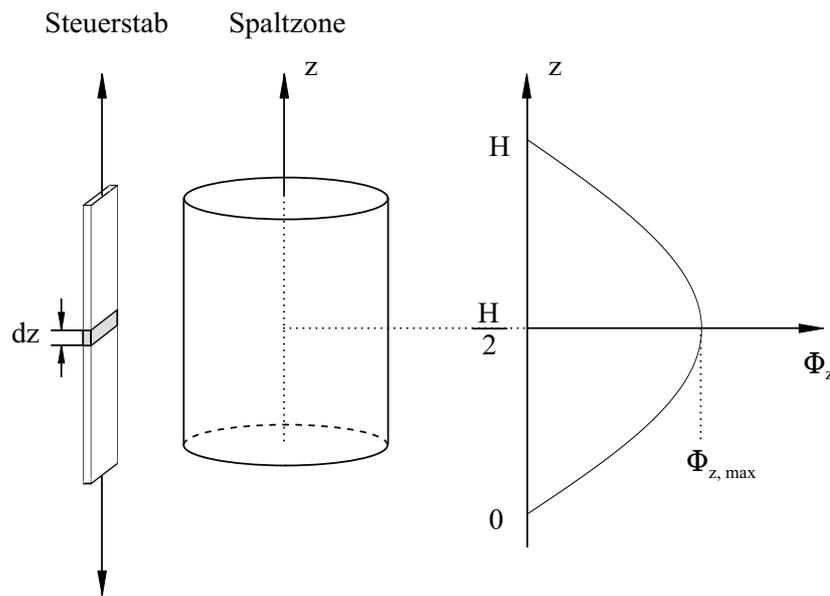


Abb. 1, Zylindrische Spaltzone mit Steuerstab und axialer Neutronenflussdichteverteilung Φ_z

Spaltzone, dann läßt sich die axiale Neutronenflussdichteverteilung ausdrücken durch:

$$\Phi_z = \Phi_{z, \max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \quad (1)$$

Dabei ist H die effektive Höhe der Spaltzone. Durch das Einbringen des Neutronenabsorbers in den Spaltzonenbereich werden dem Spaltprozess Neutronen entzogen, d.h. die Reaktivität wird vermindert. Der Reaktivitätsverlust, der durch ein differentielles Stabstück der Länge dz , welches sich am Ort z befindet, verursacht wird, ist umso größer, je

- größer der makroskopische Absorptionsquerschnitt Σ_a ,
- größer die Neutronenflussdichte Φ_z am Ort z ,
- länger das Stabstück dz ist.

Außerdem muss noch der folgende Effekt berücksichtigt werden. Dem Spaltprozess gehen auch Neutronen durch Oberflächenverluste verloren. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron im Reaktor verbleibt und eine Spaltung verursacht, ist am größten für die Neutronen, die in der Spaltzonenmitte erzeugt werden. Andererseits ist die Wahrscheinlichkeit für ein Entweichen am größten für die randnahen Zonen mit niedriger Neutronenflussdichte. Für die Neutronenbilanz ist es also auch noch wichtig, an welchem Ort die Neutronen absorbiert werden oder mit anderen Worten, die Neutronen sind nicht gleichwertig hinsichtlich ihres Einflusses auf die Reaktivität. Diese **Einflussfunktion** hat näherungsweise die gleiche Ortsabhängigkeit wie die Neutronenflussdichte, ist also der Neutronenflussdichte proportional.

Die Größe des Reaktivitätsverlustes wird also durch zwei Effekte bestimmt:

- Absorption $(\sim \Sigma_a \cdot \Phi_z \cdot dz)$
- ortsabhängige Einflussfunktion $(\sim \Phi_z)$

Zur Berechnung des Gesamteffektes multiplizieren sich nun nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Wahrscheinlichkeiten der Einzeleffekte, so dass man für die Reaktivitätsänderung näherungsweise schreiben kann:

$$d\rho \sim \Sigma_a \cdot \Phi_z^2 \cdot dz \quad (2)$$

Durch Einfügen einer Proportionalitätskonstanten C erhält man daraus die Gleichung für die **differentielle Steuerstabkennlinie**:

$$\frac{d\rho}{dz} = C \cdot \Sigma_a \cdot \Phi_z^2 \quad (3)$$

Ein Steuerstab, der um ein endliches Stück $\Delta z = z_2 - z_1$ in den Spaltzonenbereich eingefahren wird, bewirkt eine Reaktivitätsänderung $\Delta\rho$:

$$\Delta\rho = \int_{z_1}^{z_2} d\rho = \int_{z_1}^{z_2} C \cdot \Sigma_a \cdot \Phi_z^2 \cdot dz. \quad (4)$$

Die Integration über die Stablänge z liefert die Gleichung für die **integrale Steuerstabkennlinie** $\rho(z)$:

$$\rho(z) = \int_0^z C \cdot \Sigma_a \cdot \Phi_z^2 \cdot dz. \quad (5)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung auf die Neutronenflussdichteverteilung nach Abb. 1 erhält man:

$$\rho(z) = C \cdot \Sigma_a \cdot \Phi_{z, \max}^2 \cdot \frac{H}{\pi} \left[\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot H} - \frac{1}{4} \sin \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{H} \right) \right] \quad (6)$$

Bei der Integration über die volle Stablänge 0 ... H ergibt sich der integrale Reaktivitätswert des gesamten Steuerstabes zu:

$$\rho_{\max} = C \cdot \Sigma_a \cdot \Phi_{z, \max}^2 \cdot \frac{H}{2} \quad (7)$$

Normiert man $\rho(z)$ auf den Maximalwert, dann besitzt die integrale Steuerstabkennlinie den in Abb. 2 dargestellten charakteristischen Verlauf.

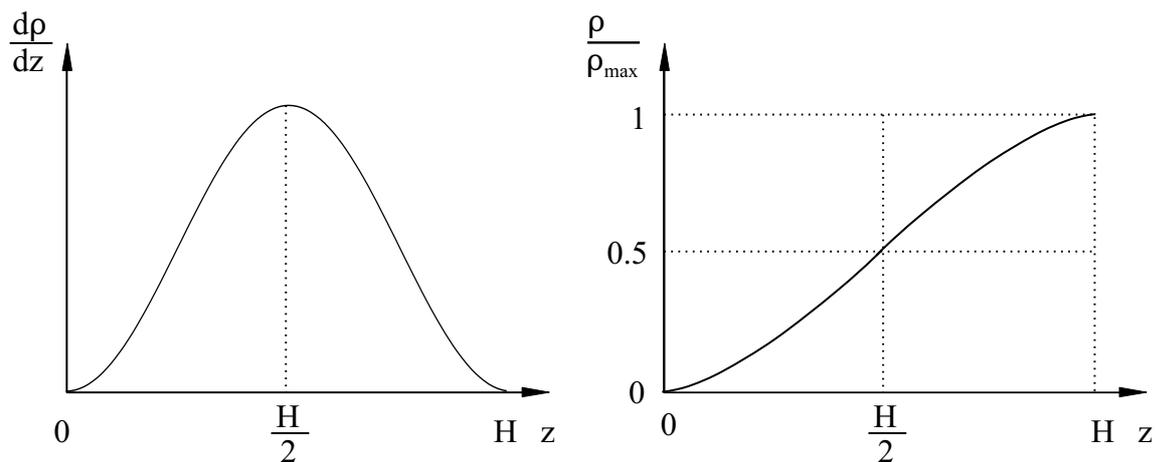


Abb. 2, Steuerstabkennlinien, differentiell (links) und integral (rechts, normiert)

Steuerstäbe werden aus solchen Materialien gefertigt, die einen großen Absorptionsquerschnitt besitzen. Für den praktischen Einsatz im Reaktor sind darüber hinaus die mechanischen und chemischen Eigenschaften dieser Stoffe von Bedeutung, sowie ihre Empfindlichkeit gegenüber Strahlung und wirtschaftliche Aspekte. Die gebräuchlichsten Materialien für Steuerstäbe thermischer Reaktoren sind Bor und Cadmium.

Die Aufgabe der Steuerstabkalibrierung besteht darin, für die gegebene Anordnung die Funktion $d\rho/dz$ experimentell zu bestimmen und daraus $\rho(z)$ zu berechnen.

4. Methoden der Reaktivitätsbestimmung

Die Bestimmung der Reaktivität erfolgt grundsätzlich über das Zeitverhalten der Reaktorleistung, das bestimmt wird durch die Erzeugungsraten prompter und verzögerter Neutronen. Das Zeitverhalten der Reaktorleistung nach einer plötzlichen (positiven) Reaktivitätsänderung ist in Abb. 3 dargestellt.

Die Erzeugungsrate prompter Neutronen reagiert sofort auf die Änderung, während die der verzögerten Neutronen zunächst auf dem ursprünglichen Wert bleibt. Da die Erzeugungsrate prompter Neutronen unterkritisch ist, stellt sich ein quasistationärer Zustand ein, der bis zum Beginn der Erzeugung der verzögerten Neutronen, d.h. ca. 100 ms nach der Reaktivitätsänderung, dauert.

Danach setzt eine merkliche Erzeugung verzögerter Neutronen ein, bis nach ca. 100 s ein Gleichgewichtszustand zwischen prompten und verzögerten Neutronen erreicht ist. Die Leistungsänderung wird nun durch die sogenannte stabile Reaktorperiode T_s gekennzeichnet.

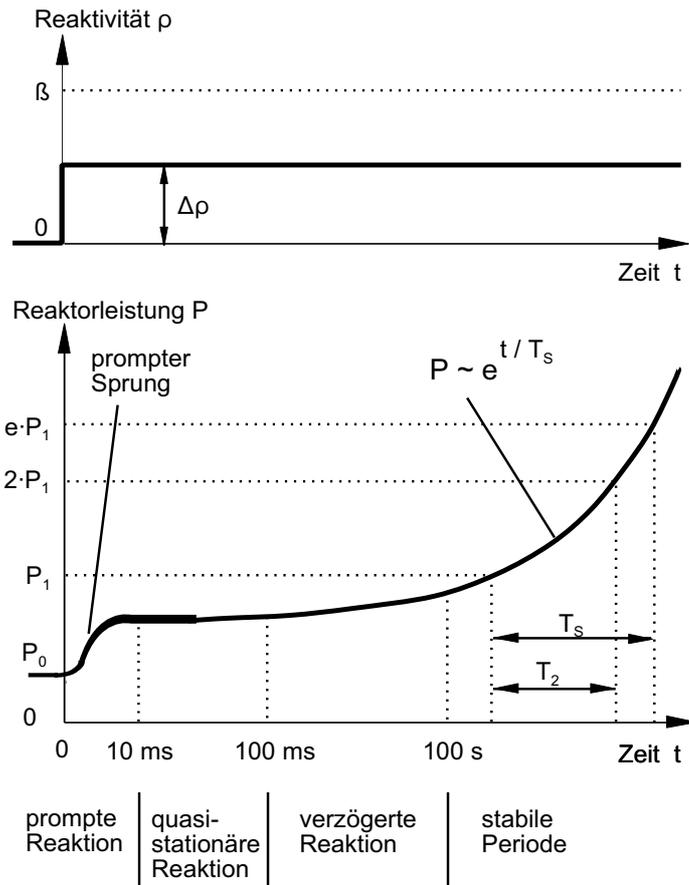


Abb. 3, Zeitverhalten der Reaktorleistung nach einem positiven Reaktivitätssprung ($0 < \rho \ll \beta$ zur Zeit $t = 0$)

Auf negative Reaktivitätssprünge reagiert der Reaktor in analoger Weise mit einem Leistungsabfall.

Für die Kalibrierung von Steuerstäben gibt es mehrere Verfahren, welche den einen oder anderen Effekt ausnutzen.

Stabfallmethode (rod-drop-Methode)

Dabei wird der Zeitverlauf der Reaktorleistung vor und nach dem Abfallen des Steuerstabes registriert. Aus dem sogenannten "prompten Sprung" im Leistungsabfall lässt sich die Reaktivitätsänderung berechnen.

Periodische Leistungsmodulation

Periodische Positionsänderungen vom Steuerstäben führen zu einer periodischen Leistungsoszillation. Aus der Amplitude der Leistungsänderung kann die Reaktivitätsänderung bestimmt werden.

Methode der inversen Kinetik

Sie beruht auf einer mathematischen Modellierung der zeitabhängigen Prozesse im Reaktor. Dabei wird die Reaktivität im mathematischen Modell so nachgeführt, dass die berechnete Leistung in jedem Zeitpunkt mit der tatsächlichen Reaktorleistung übereinstimmt. Auf dieser

Methode beruhen die sogenannten Reaktivitätsmesser, die ständig die Reaktivität anzeigen. Der apparative Aufwand dieser Methode ist relativ hoch.

Messung der stabilen Reaktorperiode T_s

Das ist die klassische Methode zur Bestimmung von Reaktivitäten, die auch im Praktikum durchgeführt werden soll.

Den Zusammenhang zwischen der gemessenen stabilen Reaktorperiode und der gesuchten Reaktivität stellt die sogenannte INHOUR-Gleichung her. Diese leitet sich aus den **reaktor-kinetischen Gleichungen** her (eine komplette Ableitung befindet sich im Anhang)

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{l^*} \cdot n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i + S \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{l^*} \cdot n - \lambda_i \cdot C_i \quad (i = 1 , \dots , 6) \end{aligned} \quad (8)$$

mit:

l^* = mittlere effektive Lebensdauer der prompten Neutronen

ρ = Reaktivität

β_i = absoluter Anteil der i-ten Gruppe verzögerter Neutronen

C_i = Konzentration der Mutterkerne verzögerter Neutronen der i-ten Gruppe

λ_i = Zerfallskonstante der Mutterkerne der i-ten Gruppe verzögerter Neutronen

S = Neutronenquelle im Reaktor

Für dieses System von Differentialgleichungen existieren Lösungen für 7 verschiedene Eigenwerte ω_i mit Lösungsansätzen der Form

$$n_i(t) = n_{i,0} \cdot e^{\omega_i \cdot t} \quad \text{bzw.} \quad C_i(t) = C_{i,0} \cdot e^{\omega_i \cdot t} \quad (9)$$

Die zeitabhängige Neutronendichte $n(t)$ kann somit als eine lineare Kombination von sieben Termen der Form entsprechend (9) geschrieben werden

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\omega_0 \cdot t} + n_1 \cdot e^{\omega_1 \cdot t} + \dots + n_6 \cdot e^{\omega_6 \cdot t} \quad (10)$$

Die Werte für ω_i sind schematisch in Abb. 4 dargestellt.

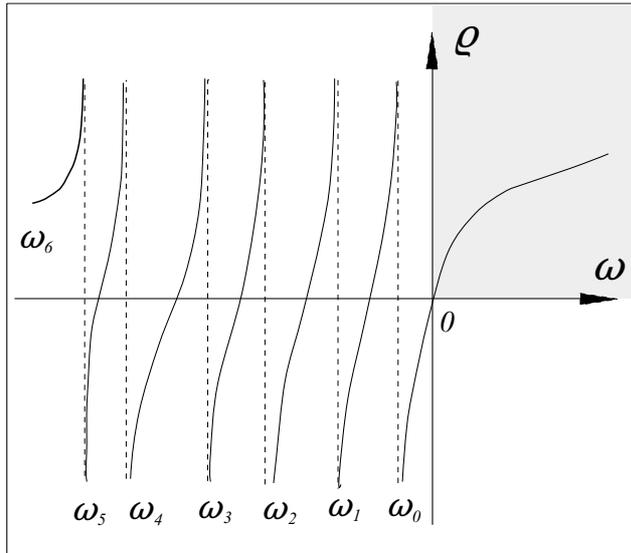


Abb. 4, Schematische Darstellung der Lösungen ω_i der INHOUR-Gleichung

Man erkennt, dass für eine positive Reaktivitätszufuhr ($\rho > 0$) 6 ω_i -Werte negativ sind und nur ein ω_i -Wert positiv. Damit klingen in Gleichung (10) 6 Terme innerhalb kurzer Zeit ab. Setzt man nun

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\omega \cdot t} \quad \text{bzw.} \quad C_i(t) = C_{i,0} \cdot e^{\omega \cdot t} \quad (11)$$

in die reaktorkinetischen Gleichungen (8) ein und beachtet, dass $\omega = 1 / T_S$ ist, erhält man die **INHOUR-Gleichung**

$$\rho = \frac{l^*}{T_S} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T_S} \quad (12)$$

Für sehr kleine Reaktivitäten, d.h. wenn die stabile Reaktorperiode sehr groß ist, kann im Summenterm die 1 gegen $\lambda_i \cdot T_S$ und der erste Term gegen den Summenterm vernachlässigt werden. Damit reduziert sich die Gleichung (12) auf:

$$\rho \approx \frac{1}{T_S} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} \quad (13)$$

Es ist sinnvoll, die Reaktivität auf den Anteil der verzögerten Neutronen β zu beziehen, da bei allen Untersuchungen des kinetischen Reaktorverhaltens immer das Verhältnis ρ / β auftritt. Dieser an sich dimensionslosen Größe $\rho' = \rho / \beta$ wird die Einheit Dollar (\$) mit $1 \$ = 100 \text{ ¢}$ zugeordnet. In dieser Darstellung geht die INHOUR-Gleichung über in

$$\rho' = \frac{\rho}{\beta} = \frac{l^* / \beta}{T_S} + \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{1 + \lambda_i \cdot T_S} \quad (14)$$

Die $a_i = \beta_i / \beta$ sind die relativen Häufigkeiten der einzelnen Gruppen verzögerter Neutronen. Sie sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Der Parameter l^* / β hat für den AKR den Wert $l^* / \beta = 0.0051$ s.

i	λ_i [s ⁻¹]	$a_i = \beta_i / \beta$
1	0.0124	0.033
2	0.0305	0.219
3	0.111	0.196
4	0.301	0.395
5	1.14	0.115
6	3.01	0.042

Tab. 1, Daten der verzögerten Neutronen zur Verwendung in der INHOUR-Gleichung

5. Versuchsdurchführung

Der Reaktor wird zunächst bei kleiner Leistung (etwa 0.3 W) kritisch gemacht. Dabei ist so zu verfahren, dass ein Regelstab vollständig in der Spaltzone verbleibt (Position 0), ein zweiter Regelstab wird vollständig aus der Spaltzone herausgefahren (Position 4000), mit dem dritten Regelstab wird der kritische Reaktorzustand hergestellt. Die Neutronenquelle wird aus dem Reaktor ausgefahren.

Danach wird der zu kalibrierende Stab ein definiertes Stück aus dem Spaltzonenbereich herausgezogen. Die damit verbundene Reaktivitätsänderung $\Delta \rho$ führt zu einem Leistungsanstieg. Nach Abklingen der Übergangsterme, d.h. wenn sich ein Gleichgewicht der Erzeugung prompter und verzögerter Neutronen eingestellt hat (im praktischen Fall nach ca. 60 ... 100 s), kann mit der Messung der stabilen Reaktorperiode begonnen werden. Dabei wird die Zeit gestoppt, in der die Leistung des Reaktors um den Faktor $e = 2.71$ anwächst. In der Praxis ist es jedoch meist einfacher, die Verdopplungszeit T_2 zu messen und danach T_S aus folgender Beziehung zu berechnen:

$$T_S = \frac{T_2}{\ln 2} \quad (15)$$

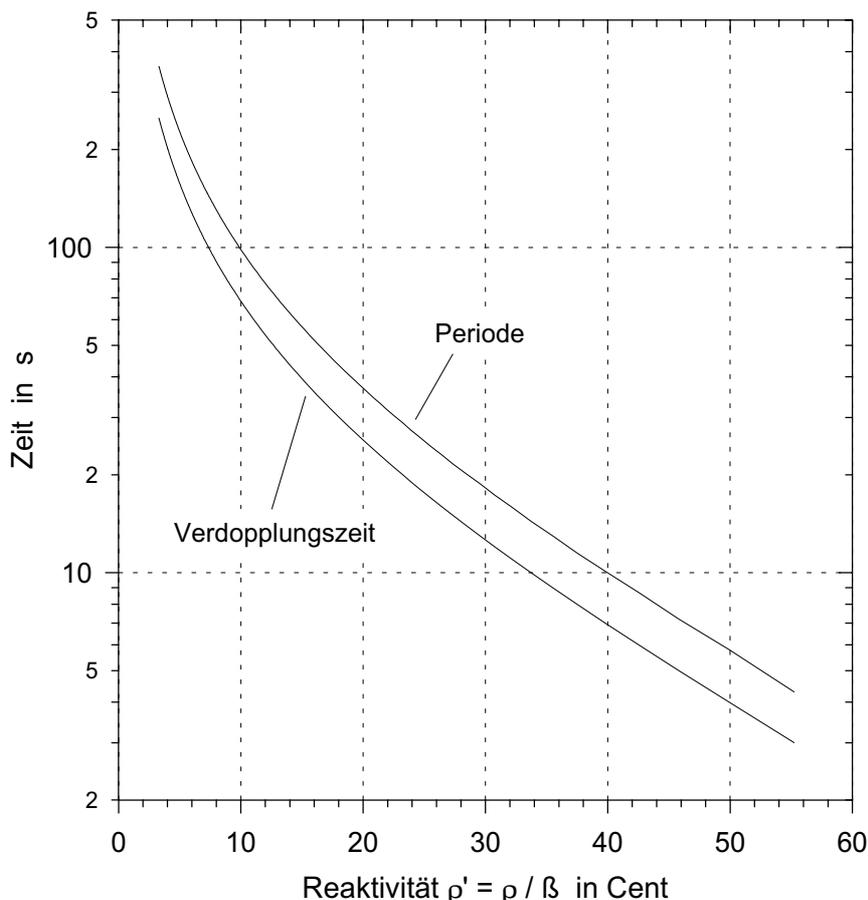
Durch Einsetzen von T_S in die INHOUR-Gleichung (12) bzw. (14) erhält man den zugehörigen Reaktivitätswert.

Mit einem Trick gelingt es sogar, in einem einzigen Experiment gleichzeitig die Reaktivitätswerte eines zweiten Regelstabes zu bestimmen (Kompensationsmethode). Dazu wird der exponentielle Leistungsanstieg des Reaktors nach dem Messen der Verdopplungszeit durch Einfahren des zweiten (vorher ganz ausgefahrenen) Regelstabes bis zum Erreichen des kritischen Zustandes kompensiert. Damit wird dem Reaktor exakt die gleiche negative Reaktivität wieder zugeführt, die vorher als positive Reaktivität wirksam geworden war. Der zugehörige Hubdifferenz des zweiten Regelstabes wird aus den Positionsanzeigen bestimmt.

Nach dem erneuten Absenken der Reaktorleistung auf ca. 0.3 W und der Einstellung des kritischen Reaktorzustandes kann nun der zweite Hubschritt mit dem ersten Regelstab vorgenommen werden. Nach dem Messen der Verdopplungszeit wird die positive Reaktivität wiederum mit dem zweiten Regelstab bis zum kritischen Zustand kompensiert.

Dieses Verfahren wird so lange fortgesetzt, bis der erste Stab seine äußerste Endlage (Position 4000) erreicht hat. Der zweite Stab sollte bei vergleichbaren Reaktivitätswerten nach der Kompensation dann etwa die Position 0 haben.

Die Berechnung der Reaktivität nach Gleichung (12) bzw. (14) gestaltet sich etwas aufwendig, da für jede gemessene stabile Reaktorperiode im Summenterm stets die Parameter aller 6 Gruppen verzögerter Neutronen eingegeben werden müssen. Ein programmierbarer Taschenrechner oder ein Computerprogramm vereinfacht die Rechnung. Für eine unmittelbare Auswertung steht am Versuchsplatz ein solches Programm zur Verfügung.



In Abb. 5 ist der sich aus der INHOUR-Gleichung ergebende Zusammenhang zwischen der gemessenen Verdopplungszeit bzw. der stabilen Reaktorperiode und der Reaktivität unter Verwendung der Werte aus Tab. 1 dargestellt.

Abb. 5, Zusammenhang zwischen Verdopplungszeit bzw. Reaktorperiode und Reaktivität nach der INHOUR-Gleichung

Die Reaktivitätsbestimmung durch Messung der stabilen Reaktorperiode ist unkompliziert. Sie hat bei der Bestimmung kleiner Reaktivitäten den Vorteil, dass außer einer universellen Beziehung zwischen stabiler Periode und Reaktivität keine anderen physikalischen Größen des Reaktors bekannt sein müssen. Die Anwendung der INHOUR-Gleichung ist jedoch auf Grund von Drift- und Rauscheinflüssen einerseits und durch sonst zu starke Leistungsanstiege andererseits auf einen kleinen Reaktivitätsbereich (1 ¢ ... 20 ¢) beschränkt. Darüber hinaus ist diese Methode zeitaufwendig, da für die vollständige Bestimmung einer Steuerstabskennlinie mehrere Einzelmessungen nacheinander durchgeführt werden müssen.

6. Berechnung der Gesamtreaktivität der Regelstäbe sowie der Überschuss- und Abschaltreaktivität

Die **Gesamtreaktivität** der beiden kalibrierten Regelstäbe erhält man aus der integralen Steuerstabskennlinie (vgl. Abb. 2), wobei die Reaktivitätsdifferenz über die gesamte Hubhöhe abgelesen wird.

Die **Überschussreaktivität** ist diejenige positive Reaktivität, die, ausgehend vom kritischen Zustand des Reaktors, durch weiteres Heben aller Regelstäbe bis in die jeweils obere Endlage noch zugeführt werden könnte. Man liest also mittels der integralen Steuerstabskennlinien für alle Regelstäbe i (für den AKR gilt $i = 1, \dots, 3$) aus den Kurven ab, welche Reaktivitätsreserve $\rho_{i, \text{Überschuss}}$ für jeden Stab von der Stabstellung im kritischen Reaktorzustand bis zur Endlage des Stabes noch zur Verfügung steht. In welcher Stellung zueinander die Stäbe im kritischen Reaktor stehen, ist dabei unerheblich.

Die gesamte Überschussreaktivität addiert sich dann aus den Werten für die einzelnen Stäbe

$$\rho_{\text{Überschuss}} = \rho_{1, \text{Überschuss}} + \rho_{2, \text{Überschuss}} + \rho_{3, \text{Überschuss}}$$

Das Prinzip der Berechnung der Überschussreaktivität aus den gemessenen Steuerstabskennlinien wird in Abb. 6 nochmals verdeutlicht.

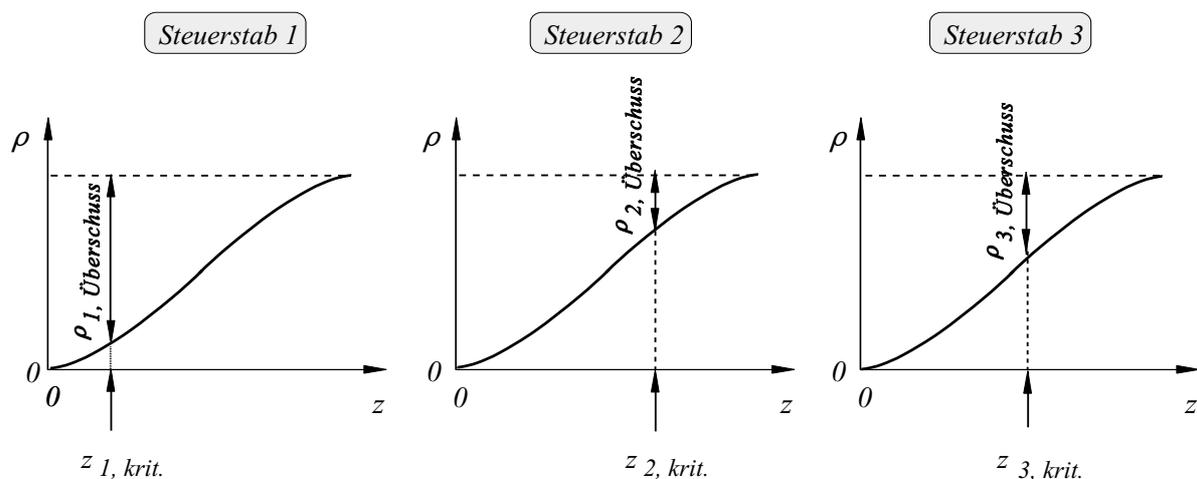


Abb. 6, Berechnung der Überschussreaktivität aus den gemessenen Steuerstabskennlinien

Im Praktikumsexperiment werden üblicherweise nur 2 Steuerstäbe des AKR im Kompensationsverfahren gegeneinander kalibriert. Da für die Berechnung der Überschussreaktivität auch der Wert für den dritten Stab benötigt wird, soll dessen integrale Steuerstabkennlinie als Mittelwert der beiden gemessenen angenommen werden. Da am AKR alle drei Stäbe gleich konstruiert und im Reaktor symmetrisch angeordnet sind, ist diese Annahme für das Praktikum gerechtfertigt.

Für die Berechnung der Überschussreaktivität ist stets von einem kritischen Reaktorzustand auszugehen. Welcher gewählt wird, d.h. wie die Regelstäbe dann gerade zueinander stehen, ist dabei gleichgültig. Zweckmäßigerweise wird der Ausgangszustand des Experiments gewählt, da hierbei für Stab 1 sein gesamter Reaktivitätswert zur Überschussreaktivität beiträgt (es steht die gesamte Hubhöhe zur Verfügung), Stab 2 keinen Beitrag liefert (da er im kritischen Zustand bereits in der äußeren Endlage steht) und nur für Stab 3 eine Interpolation in der Steuerstabkennlinie notwendig ist.

Die Überschussreaktivität ist ein wichtiges Kriterium für die nukleare Sicherheit eines Kernreaktors. Wenn wie beim AKR $\rho_{\text{Überschuss}} < \beta$ (gleichbedeutend mit $\rho'_{\text{Überschuss}} < 1 \$$) eingehalten wird, kann niemals, auch durch einen technischen Fehler oder Fahrlässigkeit nicht, ein prompt überkritischer Zustand des Reaktors herbeigeführt werden. Die Einhaltung dieser genannten Bedingung ist bei der Auswertung des Praktikumsversuchs speziell zu prüfen !

Die **Abschaltreaktivität** (für den partiell abgeschalteten Reaktor) ist dann der negative Reaktivitätswert, der, wieder ausgehend vom kritischen Zustand des Reaktors, durch Abfallen aller Regelstäbe bis in die spaltzonennahe Endlage (Position 0) zugeführt wird. Die Berechnung aus den gemessenen Steuerstabkennlinien kann analog wie die für die Überschussreaktivität erfolgen, allerdings für die entgegengesetzte Bewegungsrichtung der Stäbe.

Kennt man bereits die Überschussreaktivität, kann damit die Abschaltreaktivität auch einfacher berechnet werden als Differenz zwischen Gesamt- und Überschussreaktivität

$$\rho_{\text{Abschalt}} = \rho_{\text{Gesamt}} - \rho_{\text{Überschuss}}$$

7. Hinweise zum Protokoll

- Kurzbeschreibung des Versuches/Versuchsablaufes
- Messwerttabelle mit Angabe der Messfehler
- rechnerische Auswertung und Diskussion der Fehler
- grafische Darstellung der Steuerstabkennlinien (differentielle und integrale)
- Ableitung der Überschussreaktivität und der Abschaltreaktivität (für partielle Abschaltung) aus den Messwerten

8. Kontrollfragen

1. Erläutern Sie die Herleitung der INHOUR-Gleichung ! Diskutieren Sie die Lösungen der INHOUR-Gleichung für die Fälle: a) $\rho < 0$ b) $\rho = 0$ c) $\rho > 0$!
2. Wie sieht der Zeitverlauf der Reaktorleistung bei einem negativen Reaktivitätssprung aus ?
3. Was ist die sogenannte stabile Reaktorperiode im Zeitverhalten eines Reaktors ?
4. Was ist Überschussreaktivität ? Wie lässt sie sich aus den Steuerstabkennlinien ermitteln ? Wie groß darf die Überschussreaktivität maximal werden, damit der Reaktor noch steuerbar bleibt ?
5. Wie kann bei der Kalibrierung eines Steuerstabes ein zweiter Stab gleichzeitig kalibriert werden (Kompensationsmethode) ? Wie erhält man bei ungleichen Gesamtreaktivitäten den Endwert des zweiten Stabes ?
6. Welchen Nutzen bringen Steuerstabkalibrierungen ?
7. Welche Bedingungen muss das Konstruktionsmaterial für einen Steuerstab erfüllen ?

Anhang: Ableitung der INHOUR-Gleichung

Grundlage sind die punktkinetischen Gleichungen:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\varrho - \beta}{l^*} \cdot n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i \quad (\text{A1})$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} \cdot n - \lambda_i \cdot C_i \quad (\text{A2})$$

Lösungen sind von der Form:

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\omega t} \quad \Rightarrow \quad \frac{dn}{dt} = n_0 \cdot e^{\omega t} \cdot \omega = n \cdot \omega \quad (\text{A3})$$

$$C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{\omega t} \quad \Rightarrow \quad \frac{dC_i}{dt} = C_{0,i} \cdot e^{\omega t} \cdot \omega = C_i \cdot \omega \quad (\text{A4})$$

aus (A2) folgt durch Einsetzen von (A4):

$$C_i \cdot \omega = \frac{\beta_i}{l^*} \cdot n - \lambda_i \cdot C_i$$

$$C_i (\omega + \lambda_i) = \frac{\beta_i}{l^*} \cdot n$$

$$C_i = \frac{\beta_i \cdot n}{l^* \cdot (\omega + \lambda_i)}$$

bzw.

$$C_i \cdot \lambda_i = \frac{\lambda_i \cdot \beta_i \cdot n}{l^* \cdot (\omega + \lambda_i)} \quad (\text{A5})$$

einsetzen von (A5) und (A3) in (A1) ergibt:

$$n \cdot \omega = \frac{\varrho - \beta}{l^*} \cdot n + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \cdot \beta_i \cdot n}{l^* \cdot (\omega + \lambda_i)}$$

beide Seiten mit l^*/n multiplizieren ergibt:

$$l^* \cdot \omega = \varrho - \beta + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \cdot \beta_i}{\omega + \lambda_i}$$

und auflösen nach ρ :

$$\begin{aligned}
 \rho &= 1^* \cdot \omega + \beta - \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \cdot \beta_i}{\omega + \lambda_i} && \text{mit } \beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i \quad (!) \\
 &= 1^* \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 \left(\beta_i - \frac{\lambda_i \cdot \beta_i}{\omega + \lambda_i} \right) \\
 &= 1^* \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \left(1 - \frac{\lambda_i}{\omega + \lambda_i} \right) \\
 &= 1^* \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \left(\frac{\omega + \lambda_i - \lambda_i}{\omega + \lambda_i} \right) \\
 &= 1^* \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \cdot \omega}{\omega + \lambda_i} \\
 &= 1^* \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 \frac{\omega}{\omega} \cdot \left(\frac{\beta_i}{1 + \frac{\lambda_i}{\omega}} \right) \\
 &= 1^* \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \frac{\lambda_i}{\omega}}
 \end{aligned}$$

Wenn man nur solche Reaktivitätszufuhren betrachtet, nach denen sich eine stabile Reaktorperiode einstellt (d.h. $0 < \rho < \beta$), erkennt man aus Gleichung (A3) $n(t) = n_0 \cdot e^{\omega t}$, dass in diesem Fall $\omega = 1/T_s$ sein muss.

$$\rho = \frac{1^*}{T_s} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T_s}$$

INHOURL-Gleichung