

## Versuchsprotokoll

# Reaktor

Tom Drechsler, Konstantin Schmid

Protokoll: 13. März 2020

Messung: 28.02.2020

Ort: AKR-2 (Pauer-Bau)

Betreuer: Dr. Carsten Lange

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsziel und Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Kernspaltung und U-235 . . . . .	3
2.2	Art des Reaktorstarts und Nulleistungsreaktor . . . . .	6
2.3	Zustände des Reaktors . . . . .	6
2.4	Prompte und verzögerte Neutronen . . . . .	7
2.5	Aufbau und Funktionsweise des AKR-2 . . . . .	8
2.6	Steuerstabkennlinien . . . . .	9
2.7	Messung der stabilen Reaktorperiode und INHOUR-Gleichung . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>11</b>
3.1	Vorbereitung auf den Reaktorstart . . . . .	11
3.2	Wiederholungsstart . . . . .	12
3.3	Steuerstabkalibrierung . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>19</b>

## 1 Versuchsziel und Aufgabenstellung

Der Versuch Reaktor ist in zwei Teilversuche unterteilt: der Reaktorstart und die Steuerstabkalibrierung.

### 1. Reaktorstart

- Die Funktionskontrolle des Reaktors ist gemäß Prüfvorschrift durchzuführen und zu protokollieren.
- Der Reaktor ist durch Wiederholungsstart in Betrieb zu nehmen und bei der in der Betriebsanweisung (BA) genannten thermischen Leistung kritisch zu machen.
- Zur qualitativen Untersuchung des Verhaltens eines Nullleistungsreaktors sind Leistungsänderungen gemäß Anweisung des Versuchsleiters durchzuführen.
- An ausgewählten Messpunkten im Kontrollbereich ist die Gamma-Dosisleistung in Abhängigkeit von der thermischen Leistung des Reaktors zu bestimmen.
- In Abhängigkeit von der thermischen Leistung des Reaktors ist die kritische Stabstellung zu ermitteln und zu diskutieren.

### 2. Steuerstabkalibrierung

- 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 die Überschussreaktivität und die Abschaltreaktivität bei partieller Abschaltung zu ermitteln.

Ziel des Versuches Reaktor ist das Kennenlernen des prinzipiellen Aufbaus eines thermischen Reaktors und seiner Hauptkomponenten. Außerdem ist die Kenntnis der Eigenschaften der Steuerungs- und Regeleinrichtungen wichtig für den sicheren Betrieb des Reaktors.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Kernspaltung und U-235

Die theoretische Grundlage zur Kernspaltung bietet eine Betrachtung der Bindungsenergie pro Nukleon für verschiedene Elemente. Diese ist in Abbildung 1 zu sehen.

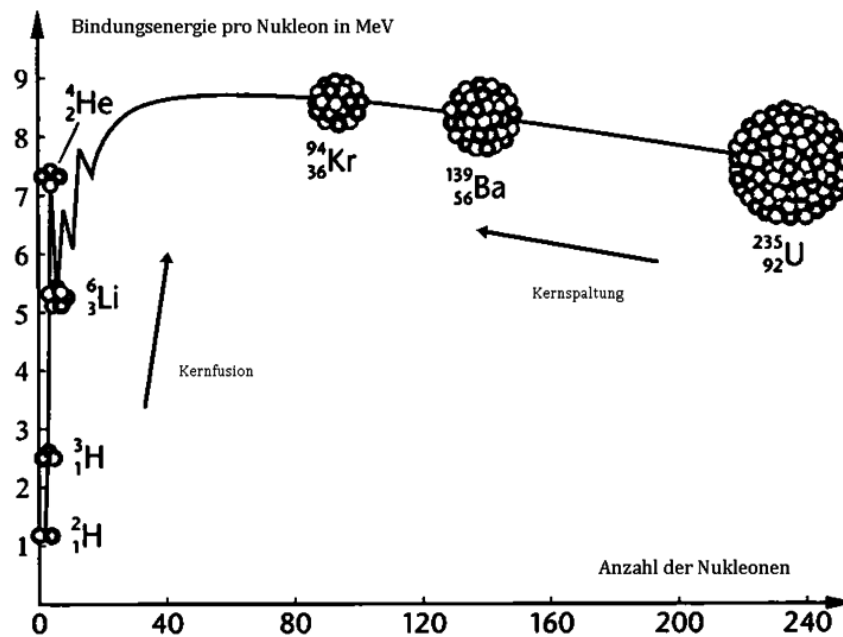


Abb. 1: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon über der Nukleonenzahl, entnommen aus [5].

Das Maximum der Bindungsenergie ist bei  $^{56}_{26}\text{Fe}$  erreicht, also bei einer Nukleonenzahl von 56. Kerne von Elementen mit einer geringeren Nukleonenzahl als 56, wie beispielsweise Wasserstoff, können fusioniert werden, sodass dabei deren Differenz der Bindungsenergie frei wird. Dies geschieht in Sternen wie unserer Sonne. Die Kernspaltung funktioniert genau andersherum. Kerne mit einer größeren Nukleonenzahl als 56 werden gespalten, um deren Differenz der Bindungsenergie nutzen zu können.

Im Fall des AKR-2 wird  $^{235}_{92}\text{U}$  verwendet. Dieses wird im Folgenden mit U-235 abgekürzt. Ein Urankern kann durch Neutronen gespalten werden. Allerdings eignen sich nicht alle Neutronen, um so eine Kernspaltung zu bewirken. Dies ist in Abbildung 2 zu erkennen.

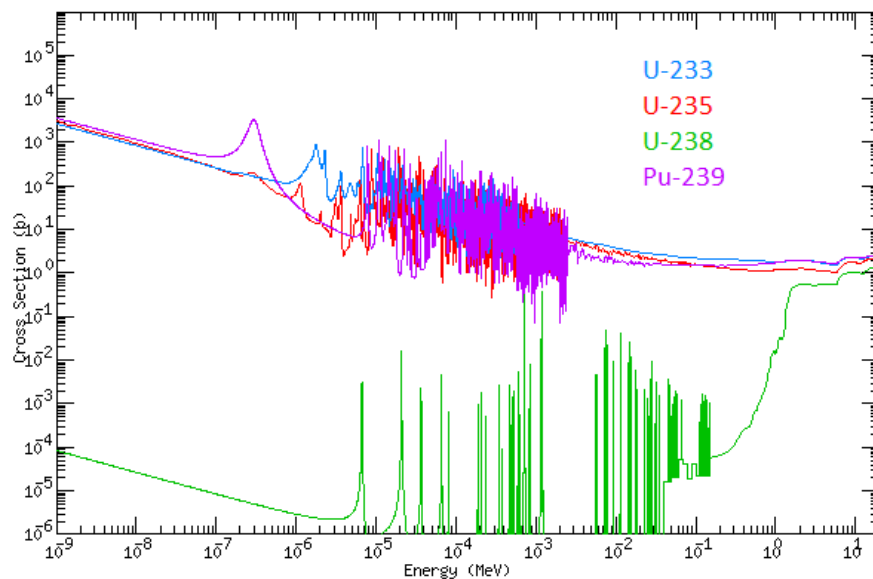


Abb. 2: Wirkungsquerschnitt von Neutronen über der Neutronenenergie für verschiedene Isotope von Uran und Pu-239, entnommen aus [6].

Für Neutronen mit geringer Energie ist der Wirkungsquerschnitt in der Größenordnung von  $10^2$  b bis  $10^3$  b. Für schnelle Neutronen hingegen ist der bis zu drei Größenordnungen geringer. Demzufolge sollten auch geringe Neutronenenergien verwendet werden. Diese langsameren Neutronen heißen thermische Neutronen und haben eine Energie von ca. 0.025 eV. Die Bezeichnung leitet sich aus einer Betrachtung der thermischen Energie ab:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} k_B T \approx k_B T. \quad (1)$$

Bei Zimmertemperatur ergibt sich dies zu:

$$\langle E \rangle \approx 0.025 \text{ eV}. \quad (2)$$

Die Neutronen befinden sich also bei dieser Energie im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung.

Wenn ein Neutron nun auf einen Urankern trifft, erfolgt der Prozess, welcher in Abbildung 3 dargestellt ist.

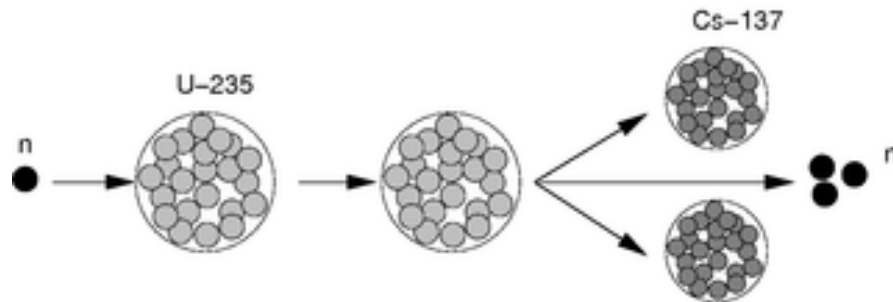
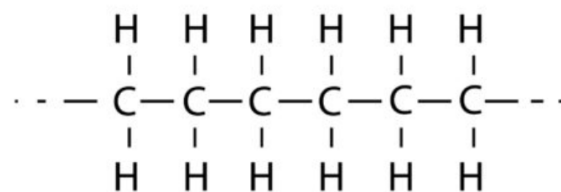


Abb. 3: Schematische Darstellung der Spaltung von U-235, entnommen aus [7].

Das Neutron trifft auf den Urankern und es entsteht ein instabiler Zwischenzustand der dann schließlich in zwei neue Kerne und Neutronen zerfällt. Die Zahl der entstehenden Neutronen ist zwei oder drei und abhängig von den Zerfallsprodukten. Die Zerfallsprodukte können sich in angeregten Zuständen befinden, sodass im Zuge des Reaktorbetriebes neben Neutronen auch  $\gamma$ -Strahlung entsteht. Im Mittel entstehen pro Spaltung ca. 2.47 Neutronen. Diese haben allerdings eine höhere Energie, sodass diese abgebremst werden müssen, damit sie eine neue Spaltung in Gang bringen können. Dies geschieht durch einen sogenannten Moderator. Besonders gut eignen sich dafür Materialien, die Wasserstoffatome enthalten, denn die Masse eines Neutrons ist ähnlich groß wie die Masse eines Wasserstoffatoms beziehungsweise dessen Kern. Dies liefert nach der Impulsbilanz einen optimalen Energieverlust. Allerdings muss zudem eine weitere Charakteristik des Moderatormaterials berücksichtigt werden. Das Material darf die Neutronen nicht absorbieren. Deshalb wird zum Beispiel kein reiner Wasserstoff verwendet. Im Fall des AKR-2 wird ein Feststoff zur Moderation verwendet, nämlich Polyethylen, dessen chemische Struktur in Abbildung 4 dargestellt ist.



Polyethen

Abb. 4: Strukturformel für Polythylen, entnommen aus [8].

Die so abgebremsten thermischen Neutronen stehen zur Anregung neuer Spaltungen zur Verfügung. Auf diese Art und Weise entsteht eine Kettenreaktion, welche mit Hilfe der Steuerungseinrichtungen des Reaktors kontrolliert zur Energiegewinnung genutzt werden kann.

### 2.2 Art des Reaktorstarts und Nullleistungsreaktor

Es gibt verschiedene Arten des Reaktorstarts: das Anfahrexperiment, das kritische Experiment und den Wiederholungsstart. Im Rahmen dieses Versuchs wird ein Wiederholungsstart durchgeführt. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass keine Änderungen an Einbauten und am Reaktor selbst vorgenommen wurden. Das Reaktivitätsverhalten unterscheidet sich also nicht zur letzten Inbetriebnahme. Somit sind bereits die kritischen Stellungen der Steuerstäbe bekannt. Zusammengefasst handelt es sich also um einen Anlassvorgang des routinemäßigen Reaktorbetriebes.

Beim AKR-2 handelt es sich um einen Nullleistungsreaktor. Diese werden bei einer Leistung von wenigen Watt betrieben, sodass Effekte wie Brennstoffabbbrand, Vergiftung des Brennstoffs und Temperatureffekte vernachlässigt werden können. Konkret für diesen Versuch wird maximal eine Leistung von  $P = 2 \text{ W}$  erreicht.

### 2.3 Zustände des Reaktors

Der jeweilige Zustand des Reaktors hinsichtlich der Neutronenproduktion wird mit dem Multiplikationsfaktor  $k$  beschrieben. Dabei können drei Zustände unterschieden werden:

- unterkritisch:  $k < 1$  (Leistung  $P$  des Reaktors sinkt)
- kritisch:  $k = 1$  (Leistung  $P$  des Reaktors bleibt konstant)
- überkritisch:  $k > 1$  (Leistung  $P$  des Reaktors steigt)

Daraus kann die Reaktivität  $\rho$  definiert werden:

$$\rho = \frac{k - 1}{k}. \quad (3)$$

Diese kann noch auf einen Faktor  $\beta$  normiert werden:

$$\rho' = \frac{\rho}{\beta}. \quad (4)$$

Somit ergibt sich zur Charakterisierung des Reaktorzustandes eine Tabelle (siehe Abbildung 5).





Reaktor-zustand	Leistung	Multiplikations-faktor $k$	Reaktivität	
			$\varrho = (k - 1) / k$	$\varrho' = \varrho / \beta [ \$ ]$
unterkritisch		$< 1$	$< 0$	$< 0$
kritisch		$= 1$	$= 0$	$= 0$
(verzögert) überkritisch		$1 < k < 1 + \beta$	$0 < \varrho < \beta$	$0 < \varrho' < 1 \$$
prompt überkritisch		$k \geq 1 + \beta$	$\varrho \geq \beta$	$\varrho' \geq 1 \$$

Abb. 5: Tabelle der verschiedenen Reaktorzustände, entnommen aus [1].

Die Bedeutung des Faktors  $\beta$  wird im folgenden Abschnitt noch geklärt.

Eine weitere wichtige Kenngröße des Reaktors ist die Reaktorperiode  $T$ . Sie ergibt sich als Parameter zur Beschreibung der Neutronenzahl nach Lösen der zugehörigen Differentialgleichung:

$$N(t) = N(t = 0) \cdot e^{\frac{t}{T}}. \quad (5)$$

$t$  beschreibt also, in welcher Zeit sich die Neutronenzahl um den Faktor  $e$  ändert. Da dies allerdings eine schlechte Messgröße ist, wird die Verdopplungszeit  $T_2$  eingeführt. Sie beschreibt, in welcher Zeit sich die Neutronenzahl verdoppelt. Es ergibt sich demzufolge dieser Zusammenhang:

$$T_2 = \ln(2) \cdot T. \quad (6)$$

## 2.4 Prompte und verzögerte Neutronen

Die bei der Spaltung von Uran entstehenden Neutronen können in prompte und verzögerte Neutronen unterteilt werden. Prompte Neutronen entstehen unmittelbar bei der Kernspaltung, verzögerte Neutronen hingegen mit etwas Zeitversatz. Der Anteil verzögerter Neutronen wird dabei mit dem bereits verwendeten  $\beta$  bezeichnet. Es gilt:

$$\beta = 0.641 \%. \quad (7)$$

Obwohl der Anteil  $\beta$  also so gering ist, ermöglichen gerade diese verzögerten Neutronen die Steuerung eines solchen Reaktors.

Die verzögerten Neutronen können nochmals in sechs Gruppen eingeteilt werden. Deren spezifische Eigenschaften sind in Abbildung 6 zusammengefasst.

Gruppe i	Mutterkern	mittl. kin. Energie / keV	$T_{1/2}$ / s	$\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2}$ / s <sup>-1</sup>	Anteil $\beta_i$ an allen Spaltneutronen / %	relativer Anteil $a_i = \beta_i / \beta$	n pro 10 <sup>3</sup> Spaltungen (absolut)
1	Br-87	250	55.72	0.0124	0.021	0.033	0.52
2	J-137	560	22.72	0.0305	0.140	0.219	3.46
3	Br-89	430	6.22	0.111	0.126	0.196	3.10
4	?	620	2.30	0.301	0.253	0.395	6.24
5	?	420	0.61	1.14	0.074	0.115	1.82
6	?	-	0.23	3.01	0.027	0.042	0.66
gesamt					0.641	1.000	15.80

Abb. 6: Eigenschaften der verschiedenen Gruppen verzögerter Neutronen, entnommen aus [1].

## 2.5 Aufbau und Funktionsweise des AKR-2

Der schematische Aufbau des AKR-2 ist durch Abbildung 7 gegeben.

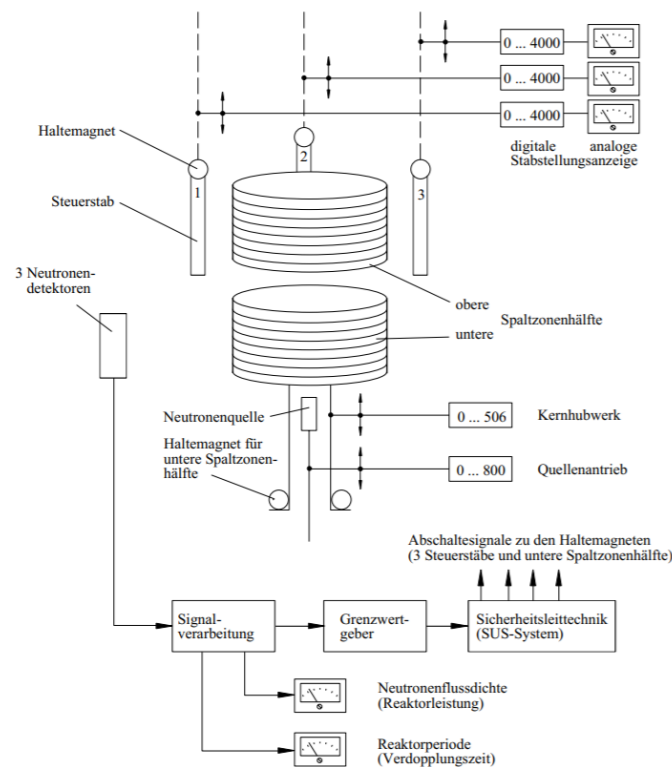


Abb. 7: Schematischer Aufbau des AKR-2, entnommen aus [1].



Die zylindrische Spaltzone ist aus Sicherheitsgründen in zwei Hälften aufgeteilt. Darin befinden sich die Brennelemente, welche aus zu 19.8 % angereichertem Uranoxid und dem Moderator Polyethylen bestehen. Um ein zu starkes Entweichen von Neutronen zu verhindern, ist die Spaltzone von einem Graphitreflektor umgeben. Eine Anfahrneutronenquelle (Am-Be-Quelle) wird zur Verringerung der statistischen Messunsicherheit verwendet. Da es sich bei den Neutronen um eine Zählstatistik handelt, kann eine Poissonverteilung angesetzt werden:

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (9)$$

Somit reduziert der Anfahrneutronenquelle die relative Messunsicherheit, sodass auch bei einer kleinen Neutronenzahl ein sinnvoll messbares Signal entsteht. Die drei Steuerstäbe des Reaktors bestehen aus Cadmium, die sowohl zur Steuerung als auch zur Sicherheitsabschaltung dienen.

## 2.6 Steuerstabkennlinien

Für die Steuerstäbe können die Reaktivitätskennwerte, die sogenannten Steuerstabkennlinien aufgenommen werden. Dabei wird jeweils auf der x-Achse die Eindringtiefe  $z$  und auf der y-Achse jeweilig die differentielle Reaktivitätsänderung  $\frac{d\rho}{dz}$  oder die integrale normierte Änderung  $\frac{\rho}{\rho_{\max}}$  dargestellt. Die so zu erwartenden Kurven haben den in Abbildung 8 dargestellten prinzipiellen Verlauf.

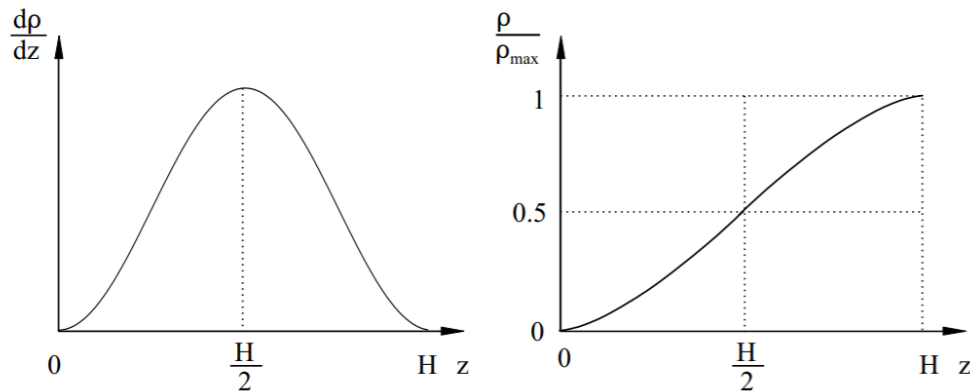


Abb. 8: Qualitativer Verlauf der Steuerstabkennlinien. Differentiell links, integral rechts. Entnommen aus [2].

Für die differentielle Kennlinie gilt:

$$\Phi_z = \Phi_z^{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \quad (10)$$

$$\Rightarrow \frac{d\rho}{dz} = C \cdot \Sigma_a \cdot \Phi_z^2 \propto \sin^2\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right). \quad (11)$$

Für die integrale Kennlinie hingegen:

$$\rho = \int_0^z \frac{d\rho}{dz} dz = C \cdot \Sigma_a \cdot (\Phi_z^{\max})^2 \cdot \frac{H}{\pi} \left[ \frac{\pi \cdot z}{2H} - \frac{1}{4} \sin\left(\frac{2\pi z}{H}\right) \right]. \quad (12)$$

## 2.7 Messung der stabilen Reaktorperiode und INHOUR-Gleichung

Um die Reaktivitäten zu bestimmen, wird die Methode der Messung der stabilen Reaktorperiode verwendet. Theoretische Grundlage dafür sind die sogenannten reaktorkinetischen Grundgleichungen:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l^*} \cdot n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i + S \quad (13)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} \cdot n - \lambda_i \cdot C_i. \quad (14)$$

Die darin auftretenden Größen sind:

- $l^*$  - mittlere Lebensdauer der prompten Neutronen
- $\rho$  - Reaktivität
- $\beta_i$  - absoluter Anteil der i-ten Gruppe verzögerter Neutronen
- $C_i$  - Konzentration der Mutterkerne verzögerter Neutronen der i-ten Gruppe
- $\lambda_i$  - Zerfallskonstante der Mutterkerne der i-ten Gruppe verzögerter Neutronen
- $S$  - Neutronenquelle im Reaktor

Ansätze für die Lösung dieses Differentialgleichungssystems sind:

$$n_i(t) = n_i(t=0) \cdot e^{\omega_i \cdot t} \quad (15)$$

$$C_i(t) = C_i(t=0) \cdot e^{\omega_i \cdot t}. \quad (16)$$

Die Gesamtlösung für  $n(t)$  ist eine Superposition:

$$n(t) = \sum_{i=0}^6 n_i(t) = \sum_{i=0}^6 n_i(t=0) \cdot e^{\omega_i \cdot t}. \quad (17)$$

Allerdings ist bloß  $\omega_0$  positiv, sodass die restlichen Terme exponentiell abklingen und nach einer kurzen Zeit nur noch Folgendes übrig bleibt:

$$n(t) = n_0(t=0) \cdot e^{\omega_0 \cdot t} \quad (18)$$

$$C(t) = C_0(t=0) \cdot e^{\omega_0 \cdot t}. \quad (19)$$

Einsetzen in die reaktorkinetischen Grundgleichungen mit  $\omega = \frac{1}{T}$  liefert die INHOUR-Gleichung:

$$\rho = \frac{l^*}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T}. \quad (20)$$

Für kleine Reaktivitäten reduziert sich dies auf:

$$\rho \approx \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i}. \quad (21)$$

Für die normierte Reaktivität  $\rho'$  gilt:

$$\Rightarrow \rho' = \frac{\rho l^* / \beta}{\beta T} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{1 + \lambda_i \cdot T}. \quad (22)$$

Dabei ist  $a_i = \frac{\beta_i}{\beta}$ . Diese relativen Häufigkeiten können aus Abbildung 6 entnommen werden.

## 3 Durchführung

### 3.1 Vorbereitung auf den Reaktorstart

Nach einer Sicherheitsbelehrung, der Vorstellung des Reaktors sowie einer Besprechung grundlegender Verhaltensweisen und des Ablaufplans wurde der Reaktor gemäß den geltenden Vorschriften auf Funktionsfähigkeit überprüft und anschließend in Betrieb genommen. Um die gesetzlichen Bestimmungen des Strahlenschutzes zu gewährleisten, wurden zunächst folgende Schritte abgearbeitet:

1. Ausstattung aller Personen mit Schutzkitteln und tragbaren Dosimetern,
2. Kontrolle der Funktion des Hand-Fuß-Kleider-Monitors in der Personenschleuse durch die Betreuer,
3. Überprüfung des Vorhandenseins einer gültigen Betriebsanweisung,
4. Kontrolle des Vorhandenseins und der Funktionstüchtigkeit des geeichten tragbaren, netz-unabhängigen Röntgen-Gamma-Dosimeters am Steuerpult des AKR,

5. Kontrolle des Vorhandenseins und der Funktionstüchtigkeit des tragbaren, netzunabhängigen Neutronendosisleistungs-Messgerätes am Steuerpult des AKR und
6. Kontrolle der Betriebsbereitschaft der stationären Gamma-Ortsdosisleistungsmesskanäle in der Reaktorhalle (grünes Feld leuchtet).

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass vorgeschriebene Grenzwerte der Dosisleistung nicht überschritten werden, keine kontaminierten Personen oder Kleidungsstücke das Gebäude verlassen und neben den Messgeräten am Steuerpult weitere tragbare und vor allem unabhängige Messgeräte zur Verfügung stehen.

Für eine ordnungsgemäße Inbetriebnahme des Reaktors ist die Abschalteneinrichtung auf Funktionsfähigkeit zu überprüfen, damit die Anlage falls nötig sicher abgeschaltet werden kann. Dazu werden folgende Schritte ausgeführt:

1. Zurücksetzen des RESA-Signals im Schutzsystem über einen Schlüsselschalter am Steuerpult zur Vorbereitung auf das Anfahren,
2. Einfahren der Neutronenquelle in die obere Endstellung,
3. Anheben der unteren Kernhälfte aus der unteren Endstellung
4. Abbruch des Hebevorgangs der unteren Kernhälfte, sobald das Verlassen der unteren Endstellung am Bildschirm sichtbar ist,
5. Manuelles Auslösen der Reaktorschnellabschaltung (im folgenden RESA genannt) sowie
6. Kontrolle des Abfalls der unteren Spaltzonenhälfte; das erneute Erreichen der unteren Endlage muss angezeigt werden.

Durch diese Überprüfung ist sichergestellt, dass im Ernstfall jederzeit eine RESA ausgelöst werden kann und die dafür notwendigen technischen Mechanismen alle richtig funktionieren. Da es sich hier um einen Ausbildungsreaktor handelt, gibt es eine Anfahrverriegelung: Wird ein fest vorgeschriebenes Schema zum Anfahren des Reaktors nicht eingehalten oder werden während des Experiments bestimmte Grenzwerte der Leistung oder der Neutronenflussdichte nicht eingehalten, wird vom System automatisch eine RESA ausgelöst. Damit sollen Unfälle durch unsachgemäße Handhabung verhindert werden. Damit sind alle Überprüfungen abgeschlossen und der Reaktor kann gestartet werden. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass bei kritischen Experimenten noch weitere Überprüfungen nötig sind.

## 3.2 Wiederholungsstart

Der Wiederholungsstart hat nach einem vorgeschriebenen Ablaufplan zu erfolgen, welcher in Abb. 9 illustriert ist.

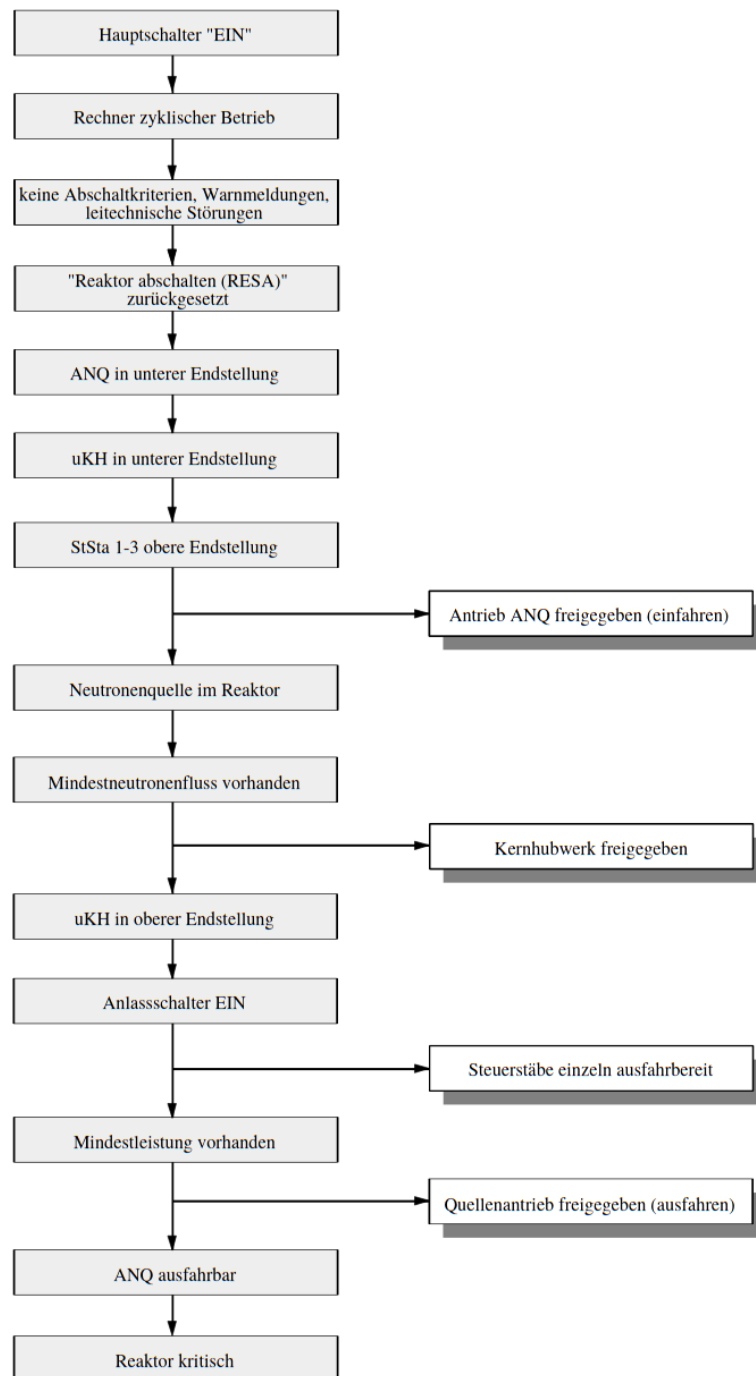


Abb. 9: Anfahrverriegelung, entnommen aus [4].

Der Weg vom unterkritischen in den kritischen Zustand ist praktisch nicht durchführbar, da hierzu eine unendlich lange Wartezeit erforderlich wäre. Der kritische Zustand kann nur vom überkritischen Bereich aus erreicht werden. Nachdem der Reaktor vom unterkritischen in den überkritischen Zustand versetzt wurde, nimmt seine Leistung gemäß Abb. 5 kontinuierlich zu. Der letzte Schritt besteht nun darin, den Reaktor bei der geforderten Leistung von exakt  $P = 2.00 \text{ W}$  kritisch zu machen. Dazu wartet man im überkritischen Betrieb ab, bis etwa 80 % des Sollwertes erreicht sind und fährt dann die Steuerstäbe ein. Die Leistung nimmt dann weiter zu, allerdings wird die Verdopplungszeit immer länger. Somit kann man sich dem kritischen Zustand mit  $T = \infty$  von oben annähern und die geforderte Leistung erreichen. Für die Durchführung ist die Kenntnis des Reaktorverhaltens abhängig von seinem Zustand unerlässlich. Sie ist in Abb. 10 für die Leistung dargestellt:

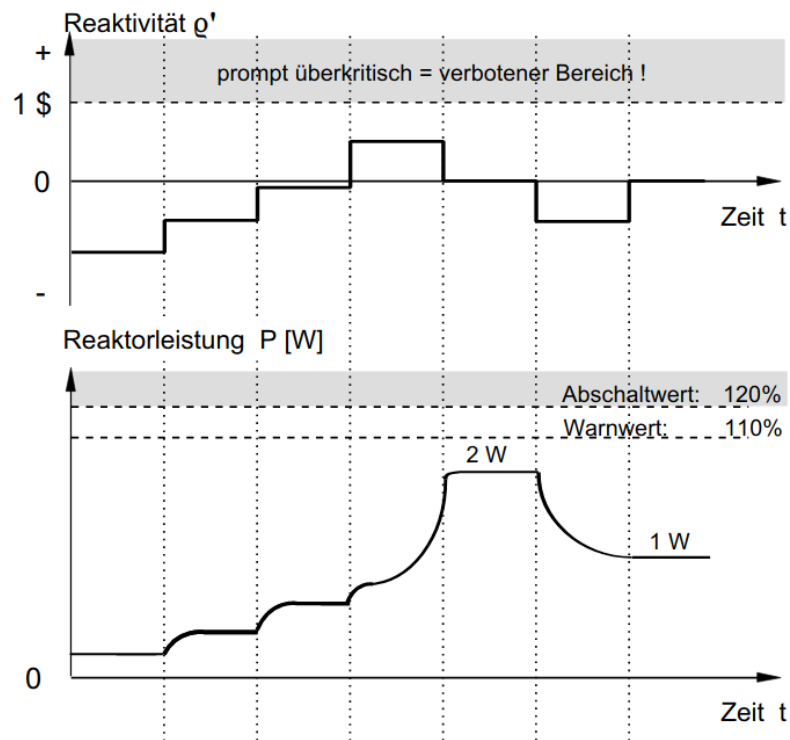


Abb. 10: Reaktion der Reaktorleistung auf Änderungen der normierten Reaktivität, entnommen aus [1]

Die Reaktorleistung folgt prinzipiell der Reaktivitätsänderung hinsichtlich des Vorzeichens. Im unterkritischen Bereich gibt es dabei zunächst einen prompten Sprung und nach kurzer Zeit stellt sich ein konstanter Wert ein. Im überkritischen Bereich gibt es

ebenfalls einen prompten Sprung. Es stellt sich jedoch kein konstanter Wert ein, sondern es kommt mit einer Verzögerung von etwa einer Minute zu einem exponentiellen Anwachsen der Leistung. Dieses für Reaktoren typische Verhalten wurde im Versuch beobachtet und ist wesentlich für die korrekte Steuerung von kerntechnischen Anlagen. Nach jedem Ein- oder Ausfahren der Steuerstäbe muss abgewartet werden, wie der Reaktor auf die veränderten Bedingungen reagiert. Insbesondere sind Messwerte der stabilen Reaktorperiode nur dann verlässlich und überhaupt sinnvoll, wenn die Zeitmessung erst nach Erreichen des exponentiellen Anwachsens gestartet wurde. Die Einstellung der gewünschten Leistung ist daher auch mit einem gewissen zeitlichen Aufwand und Sorgfalt verbunden.

Während des Versuchs wurden Dosisleistungen der Neutronenstrahlung und der  $\gamma$ -Strahlung gemessen, welche die beiden wesentlichen Bestandteile der Strahlenbelastung beim Betrieb eines Reaktors mit U-235 bilden. Die Dosisleistung wurde jeweils an drei verschiedenen Punkten im Reaktorsaal gemessen: Direkt am Reaktor, am Steuerpult und an einer Wand in größtmöglicher Entfernung zum Reaktor. Die genauen Positionen sind in Abb. 11 im Grundriss gezeigt.

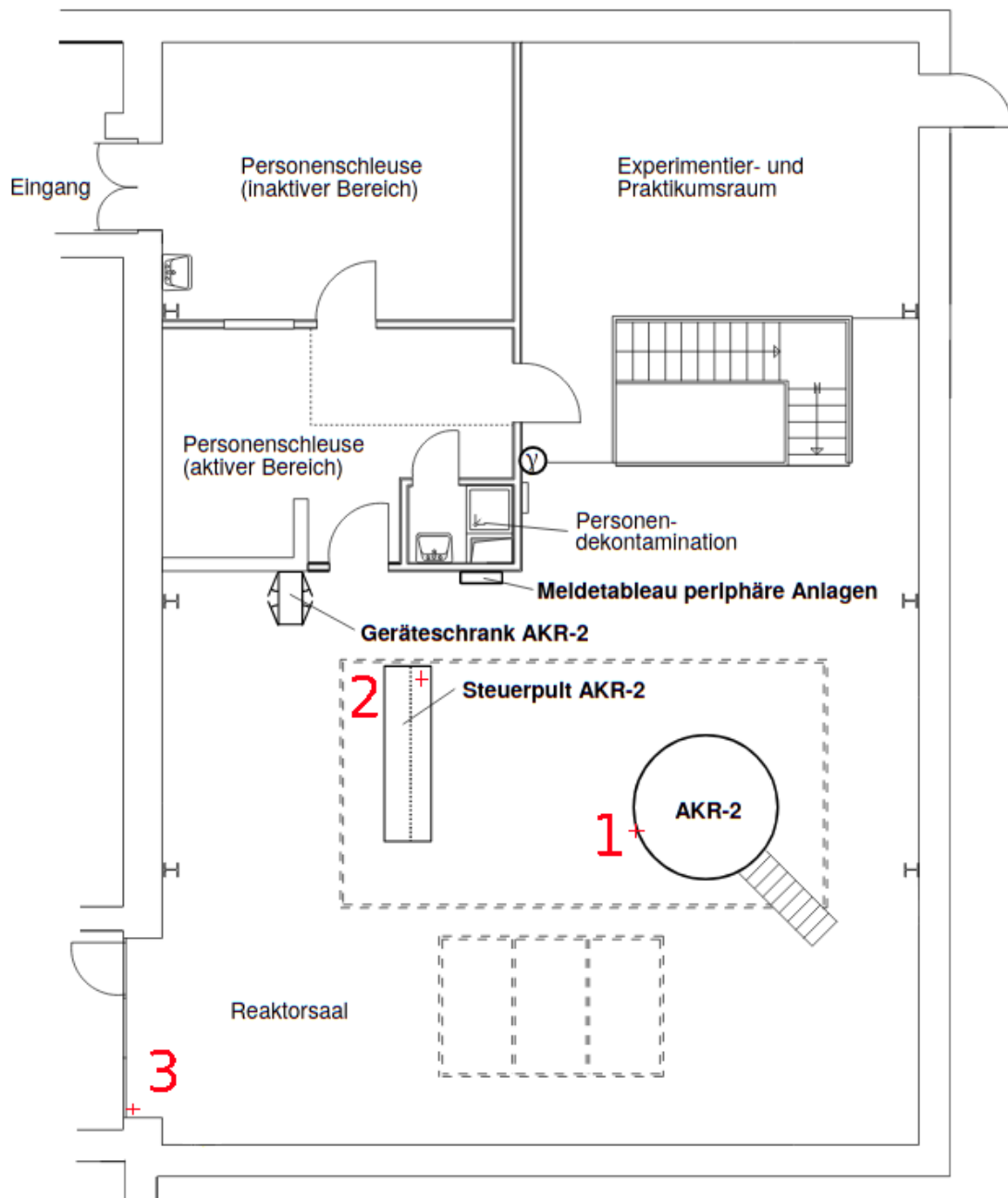


Abb. 11: Grundriss des Reaktorsaals; entnommen aus [4]. Die Messpunkte für die Dosisleistung sind rot markiert und entsprechend der später folgenden Tabelle nummeriert. Die Messpunkte wurden nachträglich hinzugefügt.



In Tab. 1 sind die aufgenommenen Dosisleistungen zusammengestellt:

Messpunkt	Abstand zur Reaktorwand/m	Dosisleistung $\gamma/\mu\text{Sv}$	Dosisleistung $n/\mu\text{Sv}$
1	$0.00 \pm 0.05$	$200.0 \pm 5.0$	$5.5 \pm 0.5$
2	$4.20 \pm 0.50$	$25.0 \pm 1.0$	$0.5 \pm 0.1$
3	$10.00 \pm 0.50$	$0.5 \pm 0.1$	$0.3 \pm 0.1$

Tab. 1: Messwerte zur Dosisleistung an verschiedenen Stellen im Reaktorsaal.

Der Abstand zur Reaktorwand wurde hier anhand der Grundrisszeichnung abgeschätzt. Gemäß der Betriebsanleitung hat der Reaktor einen Durchmesser von  $d = 250$  cm. Diese Länge kann in der Zeichnung mit einem Lineal gemessen werden, wodurch sich ein Maßstab für die Entfernung der Messpunkt zur Reaktorwand ergibt. Aufgrund der endlichen Ablesegenauigkeit und einer gewissen Toleranz zur Bestimmung des kürzesten Abstands zur Reaktorwand in der Zeichnung wurde der Fehler beim Ablesen geschätzt und daraus eine Unsicherheit im Abstand von 50 cm angenommen. Die Unsicherheiten der Messgeräte wurden teilweise aus der Hälfte der kleinsten Skalenteilung, teils aus statistischen Schwankungen bei den sehr kleinen Werten geschätzt. Bei der Messung unmittelbar an der Reaktorwand wurde zusätzlich noch eine sehr kleine Unsicherheit von 5 cm aufgrund der nichtverschwindenden Abmessungen des Geräts angenommen, die bei den großen Entfernungen aber keine Rolle mehr gegenüber der Unsicherheit beim Ablesen aus der Zeichnung spielt.

### 3.3 Steuerstabkalibrierung

Nachdem der Reaktor vorschriftsmäßig in Betrieb genommen wurde, erfolgte eine Kalibrierung der Steuerstäbe mithilfe der Kompensationsmethode. Dazu wurde ein Stab komplett eingefahren, ein Stab komplett ausgefahren und der dritte Stab gerade soweit eingefahren, dass der Reaktor bei  $P = 0.30$  W kritisch wird. Der dritte Stab wurde danach nicht mehr bewegt. Die Anfahrneutronenquelle wurde zurück in die untere Endstellung gefahren. Folgendes Verfahren ermöglicht es nun, zwei Stäbe gleichzeitig zu kalibrieren:

1. Der komplett eingefahrene Stab wird ein Stück ausgefahren, wodurch sich die Reaktivität und die Reaktorleistung erhöhen.
2. Nach Abwarten der stabilen Reaktorperiode wurde die Verdopplungszeit von drei Personen unabhängig voneinander gemessen.
3. Danach wurde der komplett ausgefahrene Stab stückweise soweit eingefahren, dass die Reaktorleistung wieder den Ausgangswert von  $P = 0.30$  W erreicht. Beide Stabstellungen sowie die Verdopplungszeit wurden notiert.
4. Nun fängt man wieder bei 1. an und wiederholt das Verfahren solange, bis der anfangs komplett eingefahrene Stab komplett ausgefahren ist.

Hierfür waren eine gute Absprache im Team sowie zügiges Handeln sehr wesentlich, weil der Reaktor mitunter sehr sensitiv auf Änderungen der Stabstellung reagiert. Die Verdopplungszeit war teilweise sehr kurz, weswegen nach Messung derselben unverzüglich mit dem einzufahrenden Stab gegengesteuert werden muss, damit die Leistung keinen Grenzwert überschreitet. Gleichzeitig darf sie aber bei ausgefahrener Neutronenquelle auch nicht zu niedrig sein, was beim hier betrachteten Ausbildungsreaktor als zusätzliche technische Maßnahme so festgelegt wurde. In beiden Fällen würde durch das Sicherheitssystem automatisch eine RESA ausgelöst und der Versuch müsste erneut gestartet werden. Die ermittelten Messwerte sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Stab 1	Stab 2	Stab 3	$T_2^{(1)}/s$	$T_2^{(2)}/s$	$T_2^{(3)}/s$	$\bar{T}_2/s$	$T_S = \frac{\bar{T}_2}{\ln 2}/s$	Zustand
0	4000	3233	-	-	-	-	-	kritisch
799	4000	3233	176.56	177.38	174.03	$175.99 \pm 1.43$	$254.00 \pm 2.06$	-
799	3422	3233	-	-	-	-	-	kritisch
1601	3422	3233	88.29	88.85	89.34	$88.83 \pm 0.43$	$128.15 \pm 0.62$	-
1601	2682	3233	-	-	-	-	-	kritisch
2401	2682	3233	60.30	59.53	60.50	$60.11 \pm 0.42$	$86.72 \pm 0.61$	-
2401	1806	3233	-	-	-	-	-	kritisch
3203	1806	3233	64.10	62.19	62.72	$63.00 \pm 0.81$	$90.89 \pm 1.17$	-
3203	707	3233	-	-	-	-	-	kritisch
3994	707	3233	104.43	105.00	103.22	$104.22 \pm 0.74$	$150.36 \pm 1.07$	-
3994	0	3233	-	-	-	-	-	kritisch

Tab. 2: Ergebnisse der Steuerstabkalibrierung. Im kritischen Zustand ist per definitionem die stabile Reaktorperiode  $T_S \equiv \infty$ , was aber nicht messbar ist.

Für eine detailliertere Fehleranalyse müsste die persönliche Reaktionszeit jedes Experimentators bekannt sein. Um die Unsicherheit trotzdem abzuschätzen, wurde die statistische Unsicherheit des Mittelwertes verwendet und danach das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz bei der Berechnung der stabilen Reaktorperiode angewendet. Die so ermittelten Unsicherheiten sind, abgesehen vom ersten Wert, realistisch für typische menschliche Reaktionszeiten. Der erste Wert hat möglicherweise deshalb eine größere Unsicherheit, weil es eben der erste Versuch war.

Mit den Werten der stabilen Reaktorperiode sowie den Stabstellungen können später differentielle und integrale Kennlinien für Stab 1 und Stab 2 gezeichnet werden. Für den Stab 3 liegen keine experimentellen Werte vor; uns wurde aber vom Betreuer des Versuches mitgeteilt, dass der Stab 3 praktisch die gleiche Kennlinie hat wie Stab 1 und dass nur Stab 2 geringfügig abweicht. Wir nehmen daher für die spätere Auswertung und Berechnung der Einfachheit halber an, dass Stab 1 und Stab 3 einander gleich sind und betrachten nur Stab 2 gesondert. Für eine verbesserte Kalibrierung müsste neben den Werten für Stab 3 auch noch mehr Messpunkte aufgenommen werden.

## 4 Auswertung

Aus den stabilen Reaktorperioden können mithilfe der Inhour-Gleichung die differentiellen Reaktivitäten berechnet werden. In Tab. 2 sind die sich ergebenden Werte einschließlich Unsicherheiten gemäß Gaußscher Fehlerfortpflanzung für die beiden Stäbe zusammengestellt.

Für um die Anpassung einer Fitfunktion an die Daten einfacher zu gestalten wurden für

Stab 1	Stab 2	$(\frac{d\rho}{dz} \pm \Delta \frac{d\rho}{dz}) / \frac{\text{ct}}{\text{unit}}$
799	707	$0.04516 \pm 0.00033$
1601	1806	$0.08093 \pm 0.00032$
2401	2682	$0.1101 \pm 0.0006$
3203	3422	$0.1062 \pm 0.0011$
3994	4000	$0.0710 \pm 0.0004$

Tab. 3: Differentielle Normierte Reaktivitäten

die Graphik sowohl die Stabstellungen als auch die differentiellen Reaktivitäten normiert. Das Ergebnis samt Anpassung und Fitparametern ist in Abb. dargestellt.

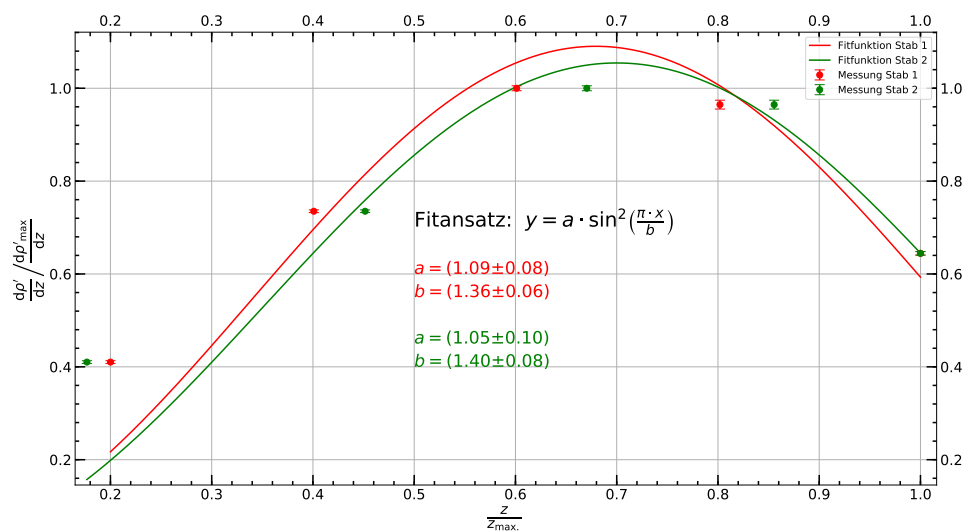


Abb. 12: Differentielle Kennlinien für beide Stäbe mit normierten Achsenbereichen und Fitfunktion.

Da der Bereich längs der Abszissenachse in der Graphik um die maximale Eintauchtiefe von 4000 units und die Ordinatenachse um das Maximum der differentiellen Reaktivität von  $0.1101 \frac{\text{ct}}{\text{unit}}$  verkleinert wurden, ergeben sich die tatsächlichen Parameter einfach durch Multiplikation der dimensionslosen Größen  $a$  und  $b$  mit den entsprechenden Skalierungsfaktoren zu

$$\begin{aligned}\tilde{a} &= (0.120 \pm 0.009) \frac{\text{ct}}{\text{unit}} \text{ und } \tilde{b} = (5440 \pm 240) \text{ units für Stab 1 sowie} \\ \tilde{a} &= (0.116 \pm 0.011) \frac{\text{ct}}{\text{unit}} \text{ und } \tilde{b} = (5600 \pm 320) \text{ units für Stab 2.}\end{aligned}$$

Mit diesen Resultaten kann man nun entweder die Fitfunktion numerisch integrieren oder das analytische Ergebnis aus der Vorbetrachtung verwenden: Kombiniert man die Gleichungen (10) bis (12) auf S.10, findet man, dass bei einem Ansatz der Form

$$\frac{d\rho'}{dz} = a \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot z}{b}\right)$$

für die differentielle normierte Reaktivität  $\rho' := \frac{\rho}{\beta}$  die integrierte normierte Reaktivität gerade gegeben ist durch

$$\rho'(z) = \frac{ab}{\pi\beta} \cdot \left[ \frac{\pi}{2b} \cdot z - \frac{1}{4} \sin\left(\frac{2\pi z}{b}\right) \right]. \quad (23)$$

Insbesondere lässt sich anhand dieser Formel auch sofort die Unsicherheit von  $\rho'$  ermitteln, da die Unsicherheiten von  $a$  und  $b$  bereits bekannt sind. Man erhält hierfür mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta\rho' = \frac{1}{2\beta r} \sqrt{(z\Delta a)^2 [r - \sin(r)]^2 + (az\Delta b)^2 [r \cos(r) - \sin(r)]^2 + (ar\Delta z)^2 [1 - \cos(r)]^2} \quad (24)$$

$$\text{mit } r := \frac{2\pi z}{b}. \quad (25)$$

Diese Formel zur Fehlerfortpflanzung gilt unter der Annahme, dass man für ein gegebenes  $z$ , das selbst eine Unsicherheit hat, die Unsicherheit der normierten Reaktivität berechnen möchte. Falls  $z$  ein definierter Wert ist, setze man  $\Delta z \equiv 0$  wodurch der letzte Summand unter der Wurzel entfällt.

Wendet man nun Gleichung (23) mit den in Abb. 12 graphisch bestimmten und umskalierten Parametern  $\tilde{a}$  und  $\tilde{b}$  an ergeben sich die integralen Kennlinien der beiden Stäbe 1 und 2. In Abb. 13 sind die differentiellen und integralen Kennlinien gegenübergestellt.

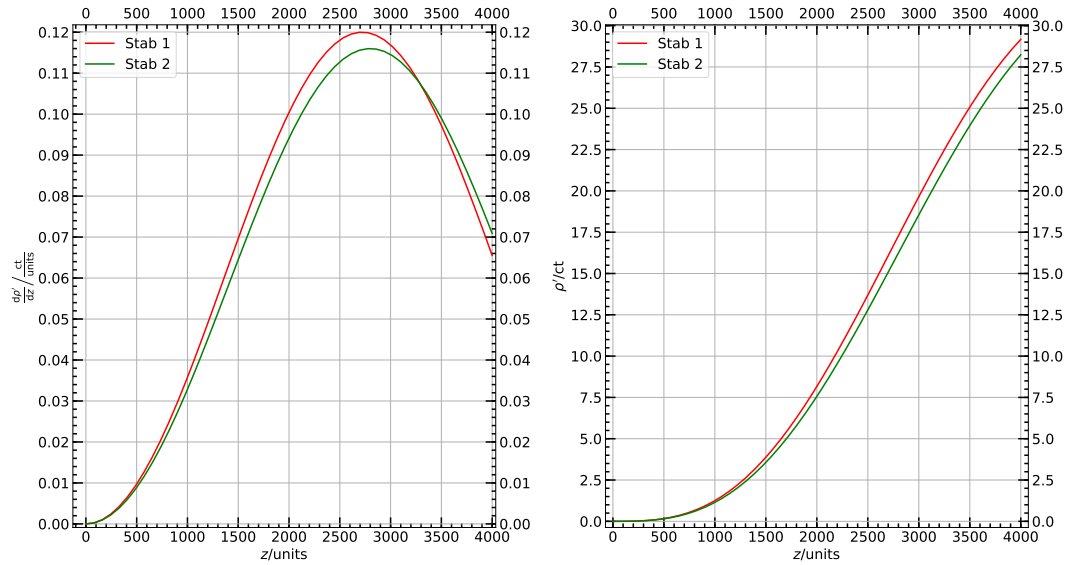


Abb. 13: Kennlinien der Steuerstäbe 1 und 2; links differentiell, rechts integral.

Im kritischen Zustand befanden sich die Stäbe bei  $z_1 = 0 \text{ units}$ ,  $z_2 = 4000 \text{ units}$  und  $z_3 = 3233 \text{ units}$ . Ihre Reaktivitäten lassen sich anhand der Kennlinien zu  $\rho'_1 = 0 \text{ ct}$ ,  $\rho'_2 = 30 \text{ ct}$  und  $\rho'_3 = 22.1 \text{ ct}$  ablesen. Das ergibt eine Gesamtreaktivität von

$$\underline{\underline{\rho'_{\text{ges}} = 52.1 \text{ ct.}}}$$

Der Stab 2 kann dem Reaktor von diesem Zustand aus keine weitere Reaktivität mehr zuführen, da er bereits vollständig eingefahren ist. Stab 1 kann noch um die volle Länge von 4000 units eingefahren werden und würde dann gemäß seiner Kennlinie eine Reaktivität von etwa  $\Delta\rho'_1 = 30 \text{ ct}$  zuführen. Unter der Annahme, dass Stab 1 und Stab 3 einander gleichen, kann durch das vollständige Einfahren von Stab 3 noch eine Reaktivität von weiteren  $\Delta\rho'_1 = 7.9 \text{ ct}$  zugeführt werden. Damit erhält man eine Überschussreaktivität von

$$\underline{\underline{\rho'_{\text{berschuss}} = 37.9 \text{ ct.}}}$$

Die maximal mögliche Gesamtreaktivität liegt demnach bei knapp  $\rho'_{\text{max}} \approx 90 \text{ ct} < 1 \$$ . Deshalb ist es unmöglich, dass der Reaktor prompt überkritisch wird; weder durch einen technischen Defekt noch durch menschliches Versagen. Die Kettenreaktion bleibt damit in jedem Fall kontrollierbar. Da nun sowohl die Überschussreaktivität als auch die Gesamtreaktivität im kritischen Zustand bekannt sind, erhält man noch die Abschaltreaktivität:

$$\underline{\underline{\rho'_{\text{Abschalt}} = \rho'_{\text{ges}} - \rho'_{\text{berschuss}} = 52.1 \text{ ct} - 37.9 \text{ ct} = 14.2 \text{ ct.}}}$$

Der Versuch im Ausbildungskernreaktor hat überdies grundlegende Kenntnisse über den Aufbau und den sicheren Betrieb kerntechnischer Anlagen vermittelt. Anhand der Einstellung des kritischen Zustandes und insbesondere der Vermessung der Verdopplungszeiten konnte das Verhalten des Reaktors bei Zufuhr oder Entzug von Reaktivität studiert werden. Interessant waren hierbei besonders die zeitlich verzögerte Reaktion im überkritischen Betrieb und die Sensitivität der Verdopplungszeit in Abhängigkeit von der Neutronenflussdichte. Zum sicheren und ordnungsgemäßen Betrieb der Anlage gehört neben besonderen Sicherheitsmaßnahmen auch die strikte Dokumentationspflicht im Betriebshandbuch des Reaktors. In diesem Buch wurden sämtliche Parameter die während des Experiments aufgenommen wurden, schriftlich festgehalten. Das Handbuch umfasst zusätzlich alle baulichen Veränderungen, die je am Reaktor vorgenommen wurden. Durch die Dokumentation wird sichergestellt, dass für jeden Experimentator der Zustand des Reaktors zu allen Zeiten nachvollziehbar ist.

## Literatur

- [1] Reaktorpraktikum. Versuch Reaktorstart. Versuchsanleitung. Technische Universität Dresden. Institut für Energietechnik.
- [2] Reaktorpraktikum. Versuch Steuerstabkalibrierung. Versuchsanleitung. Technische Universität Dresden. Institut für Energietechnik.
- [3] Einführung Kernreaktorpraktikum. Technische Universität Dresden. Institut für Energietechnik.
- [4] Reaktorpraktikum. Beschreibung des Aufbaus, der Funktionskontrolle und der Betriebsprotokollierung. Technische Universität Dresden. Institut für Energietechnik.
- [5] <https://www.abiweb.de/physik-atomphysik-kernphysik/kernphysik-2/anwendung-nutzung-der-kernenergie.html> (05.03.2020, 12:45)
- [6] <https://www.wikiwand.com/de/Kernspaltung> (05.03.2020, 13:02)
- [7] <https://www.4teachers.de/?action=keywordsearchsearchtype=imagesearchstring=Kernspaltung> (05.03.2020, 13:26)
- [8] <https://blog.ratioform.at/hdpe-ldpe-pp-pvc-und-was-sich-dahinter-verbirgt-eine-materialkunde/> (05.03.2020, 13:50)