

Versuchsprotokoll

Reaktor

Tom Drechsler, Konstantin Schmid

Protokoll: 11. März 2020

Messung: 28.02.2020

Ort: AKR-2 (Pauer-Bau)

Betreuer: Dr. Carsten Lange

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsziel und Aufgabenstellung	2
2	Theoretische Grundlagen	3
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
3	Durchführung	11

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.

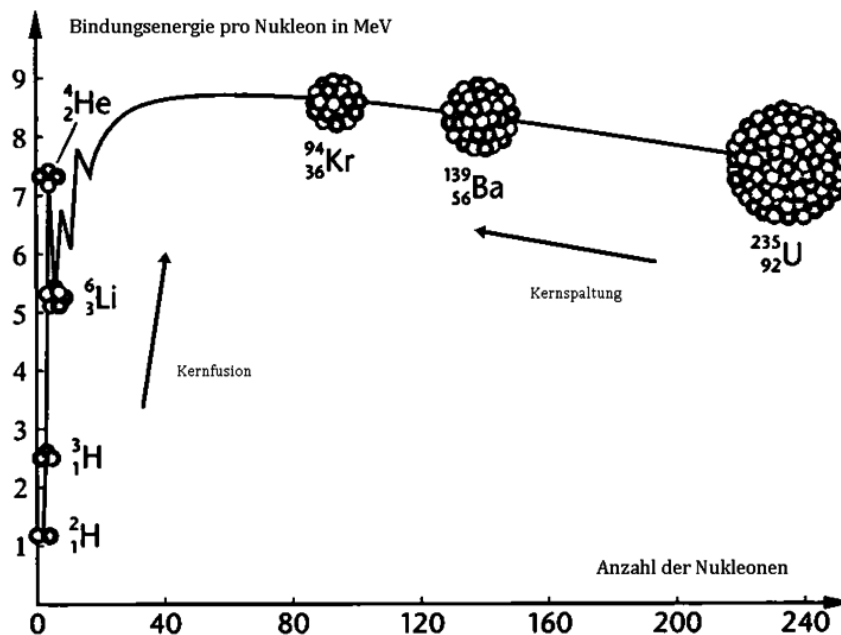


Abbildung 1: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon über der Nukleonenzahl, entnommen aus [4].

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.

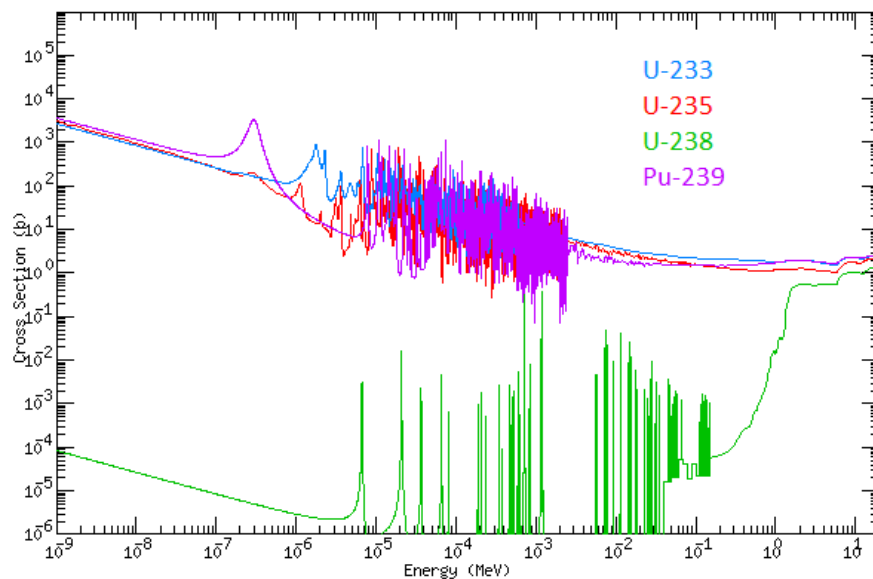


Abbildung 2: Wirkungsquerschnitt von Neutronen über der Neutronenenergie für verschiedene Isotope von Uran und Pu-239, entnommen aus [5].

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.

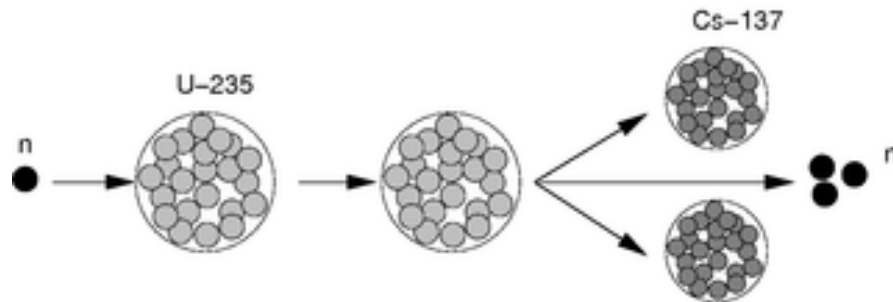
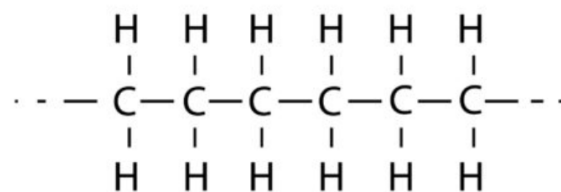


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Spaltung von U-235, entnommen aus [6].

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 γ -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

Abbildung 4: Strukturformel für Polythylen, entnommen aus [7].

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 ρ definiert werden:

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

Diese kann noch auf einen Faktor β 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		$k \geq 1 + \beta$	$\varrho \geq \beta$	$\varrho' \geq 1 \$$

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

Die Bedeutung des Faktors β 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 β bezeichnet. Es gilt:

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

Obwohl der Anteil β 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	Mutter- kern	mittl. kin. Energie / keV	$T_{1/2}$ / s	$\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2}$ / s ⁻¹	Anteil β_i an allen Spalt- neutronen / %	relativer Anteil $a_i = \beta_i / \beta$	n pro 10 ³ Spal- tungen (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

Abbildung 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.

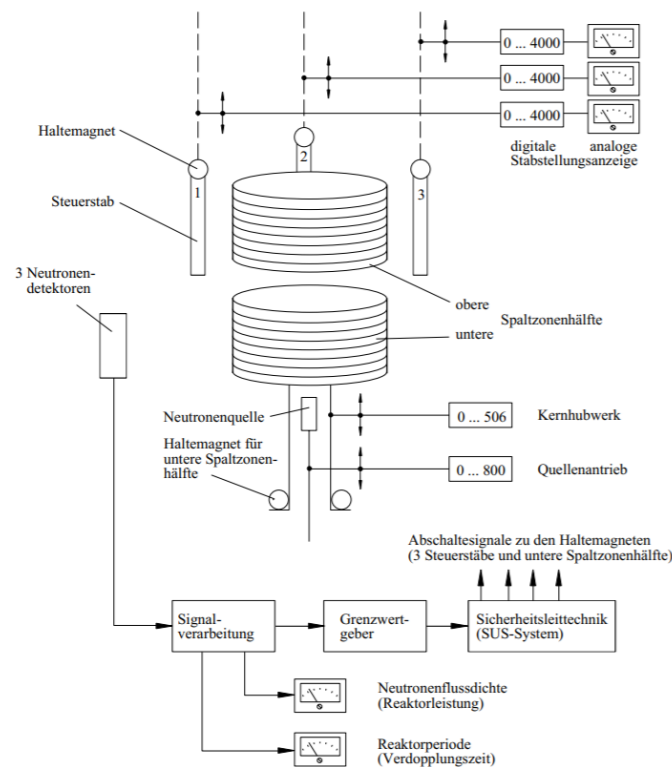


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des AKR-2, entnommen aus [1].

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.

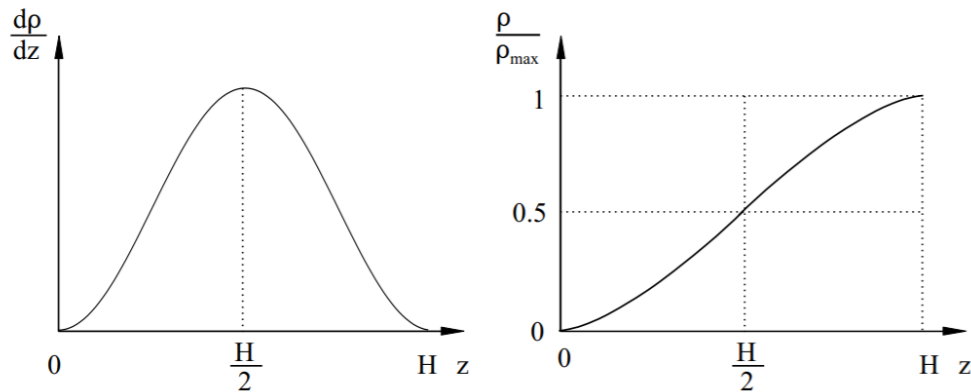


Abbildung 8: Qualitativer Verlauf der Steuerstabkennlinien. Differenziell links, integral rechts. Entnommen aus [2].

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
- 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

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 ω_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 ρ' gilt:

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

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

Literatur

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