

Fortgeschrittenenpraktikum

Kernreaktor

Toni Ehmcke

TU Dresden

28. Januar 2016

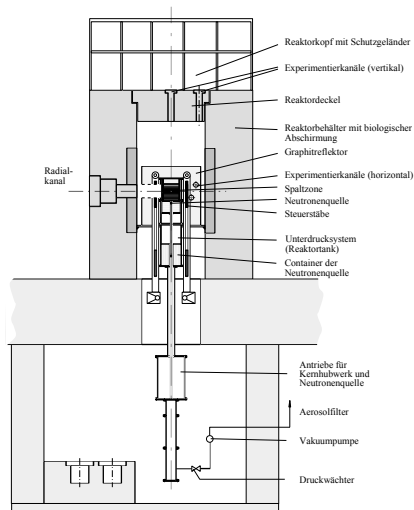
Warum wir nukleare Kräfte freisetzen wollen

- ▶ Betrachte eine Masse von $m_U = 1 \text{ g}$ des Uran-Nuklids ^{235}U .
- ▶ Zahl der Atome in dieser Masse $N_{\text{Atom}} = \frac{m_U \cdot N_A}{M_{\text{mol}}} = 2,562 \cdot 10^{21}$
- ▶ Pro Kernspaltung freiwerdende Wärme $Q \approx 200 \text{ MeV}$
- ▶ Summa summarum ergibt das eine maximale Energieabgabe von $Q_{\text{ges}} = N_{\text{Atom}} \cdot Q = 0,997 \text{ MWd}$
- ▶ Spalten von $m_U = 1 \text{ g}$ Uran-235 entspricht somit dem Verbrennen von $m_{\text{BB}} = 4,39 \text{ t}$ Braunkohlebriketts



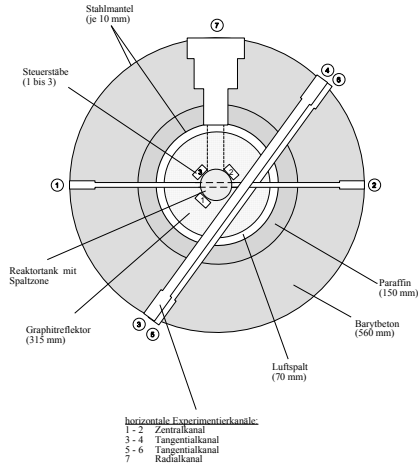
Quelle: TUD Institut für Energietechnik. *AKR-2 Bau und Inbetriebnahme*, Dresden. Juli 2005

AKR-2: Aufbau (Querschnitt)



Quelle: THD Institut für Energietechnik, AKR-2 Bau und Inbetriebnahme, Dresden, Juli 2005

AKR-2: Aufbau (Azimutalebene)



Quelle: TUD Institut für Energietechnik. *AKR-2 Bau und Inbetriebnahme*, Dresden. Juli 2005

AKR-2: Maßnahmen zur nuklearen Sicherheit

- ▶ Unterdruck im Reaktortank
- ▶ Paraffin und Barytbeton für biologische Abschirmung
- ▶ Spaltzone in zwei Hälften geteilt
- ▶ mehrfach redundantes RESA-System, welches auslöst falls
 - ▶ $P_{Reaktor} \notin [0,25; 2,4] \text{ W}$
 - ▶ Reaktorperiode $T_s < 10 \text{ s}$ bzw. $T_2 < 7 \text{ s}$
 - ▶ Temperaturmessung $T < 18 \text{ °C}$
 - ▶ Druckmessung $p > p_{max}$
 - ▶ Fehlermeldung oder Ausfall im System

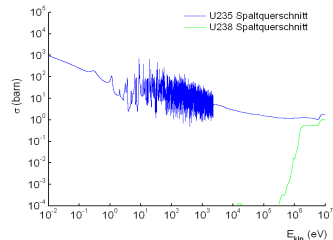
Dosimetrische Messungen

Gemessen wurde die mit Strahlungsart gewichtete Dosisleistung an verschiedenen Orten und bei verschiedenen Leistungen im kritischen Reaktorzustand der Neutronen- und γ -Strahlung:

Ort	bei 1W		bei 2W	
	$\dot{D}_\gamma \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \right]$	$\dot{D}_n \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \right]$	$\dot{D}_\gamma \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \right]$	$\dot{D}_n \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \right]$
Reaktortankwand ($\approx 0 \text{ m}$)	12	2,5	27,5	4,3
Operatortisch ($\approx 3 \text{ m}$)	1,4	0,2	2,5	0,6
Ecke ($\approx 6 \text{ m}$)	0,6	0,14	0,5	0,13

Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang

- ▶ Spaltbarriere von ^{238}U :
 $E_B^{238} = 5,7 \text{ MeV}$
- ▶ Änderung der Bindungsenergie
 $\Delta B^{238} = 4,9 \text{ MeV} < E_B^{238}$
→ „schnelle“ Neutronen notwendig
- ▶ Spaltbarriere von ^{235}U :
 $E_B^{235} = 6,2 \text{ MeV}$
- ▶ Änderung der Bindungsenergie
 $\Delta B^{235} = 6,5 \text{ MeV} > E_B^{235}$
→ thermische Neutronen genügen



Quelle: A. Ganczarczyk: *Physikalische Grundlagen der Energieumwandlung*. <https://www.uni-due.de>.
Duisburg, 01/2006, zuletzt geöffnet: 10.01.2016

Reaktorkinetische Grundbegriffe

- ▶ Entscheidend für den Zustand eines Reaktors ist die Bilanz der zwischen den Spaltprozessen entstandenen und vernichteten Neutronen
- ▶ Definiere den **Multiplikationsfaktor**

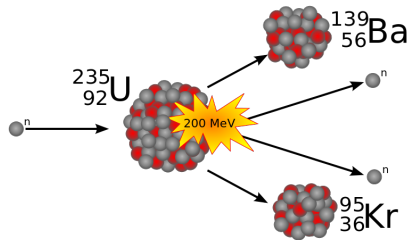
$$k := \frac{N(t + l)}{N(t)} = \frac{N_{\text{erzeugt}}}{N_{\text{absorbiert}} + N_{\text{leck}}}$$

- ▶ sowie die relative Abweichung vom kritischen Zustand ($k = 1$), die **Reaktivität**:

$$\rho := \frac{k - 1}{k}$$

- ▶ Als Messgröße wird die **Reaktorperiode** T_s , die der Zeit entspricht, in der die Neutronendichte um den e -ten Teil zugenommen hat, genutzt.

Neutroneninduzierte Spaltung von ^{235}U und prompte Neutronen



Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>, zuletzt geöffnet: 28.01.16

Problem: Ein Reaktionszyklus findet auf einer Zeitskala von $t_p = 10^{-4} \text{ s}$
→ Kettenreaktion nicht kontrollierbar

Wie man die Reaktion dennoch Steuern kann: Verzögerte Neutronen

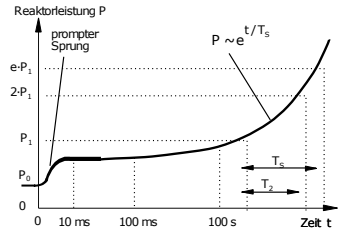
- ▶ Tochterkerne zerfallen weiter, wobei höher angeregte Tochterkerne höherer Generation entstehen können
- ▶ Abregung durch Emission von **verzögerten Neutronen**
- ▶ Lebensdauer (Zeitskala) dieser Neutronen wird durch HWZ der Mutterkerne im Mittel zu $l_v = 13 \text{ s}$
- ▶ Diese machen einen Anteil von $\beta = 0,64 \%$ aus
- ▶ Effektive Lebensdauer $l_{eff} = \beta \cdot l_v + (1 - \beta) \cdot l_p = 0,083 \text{ s}$
→ **Reaktion wird erst durch verzögerte Neutronen kontrollierbar**

Zeitverhalten eines verzögert überkritischen Reaktors

- Lösung der **reaktorkinetischen Gleichungen** für eine zur Zeit $t = 0$ zugeführte Reaktivität $\rho(t) = \rho_0 \cdot \Theta(t)$:

$$N(t) = N(0) \left[c_1 e^{\frac{\lambda \cdot \rho_0}{\beta - \rho_0} \cdot t} - c_2 e^{-k \frac{\beta - \rho_0}{l_p} \cdot t} \right]$$

- Falls $0 < \rho_0 < \beta$, klingt der zweite Summand schnell ab und mit $T_s = (\beta - \rho_0) / \lambda \cdot \rho_0$ erhält man die im Experiment genutzte Beziehung $P(t) \propto N(t) \propto e^{t/T_s} = 2^{t/T_2}$



prompte Reaktion	quasi-stationäre Reaktion	verzögerte Reaktion	stabile Periode
------------------	---------------------------	---------------------	-----------------

Quelle: Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik Ausbildungskernreaktor: *Reaktorpraktikum Versuch Reaktorstart*. Dresden, 05/2011

Wie man Reaktivität misst: Die Inhour-Gleichung

- ▶ setzt man bestimmte Lösungen der reaktorkinetischen Gleichungen in die DGI ein, erhält man die Inhour-Gleichung:

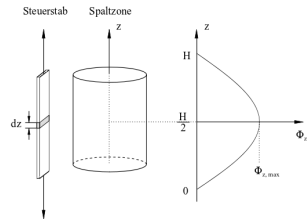
$$\rho' = \frac{\rho}{\beta} = \frac{l_p}{k \cdot \beta \cdot T_s} + \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{1 + \lambda_i \cdot T_s}$$

- ▶ diese liefert bei Messung der Verdopplungszeit (oder stabilen Reaktorperiode) die zugeführte Reaktivität nach Verlassen des kritischen Zustandes
- ▶ als Einheit von ρ' definiert man $[\rho'] = 1 \$ = 100 \text{ ¢}$
- ▶ solange $\rho' < 1$, befindet sich der Reaktor nicht im prompt überkritischen Zustand, welcher dringendst zu vermeiden ist

Neutronenflussdichte

- ▶ Ziel: Ermitteln des Einflusses der Steuer- und Regeleinrichtungen auf die Neutronenbilanz (Reaktivität)
- ▶ Annahme: Da Spaltzone zylindersymmetrisch, betrachte die Neutronenflussdichte $\Phi(z)$ ebenfalls als axialsymmetrisch
- ▶ Ein möglicher analytischer Ausdruck, um die Verteilung einer Spaltzone der Länge H zu modellieren ist:

$$\Phi(z) = \Phi_{max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)$$



Quelle: Technische Universität Dresden, Institut für
Energietechnik Ausbildungskernreaktor:
Reaktorpraktikum Versuch „Steuerstabkalibrierung“.
Dresden, 05/2011

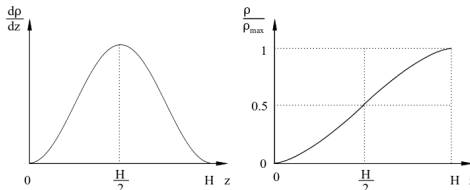
Steuerstabkennlinien

- Verschiebung des Steuerstabes um dz ergibt die **differentielle Steuerstabkennlinie**:

$$d\rho \propto -\sigma_{abs} \cdot \Phi^2(z) \cdot dz$$

- Integration über eine endliche Länge z liefert die **integrale Steuerstabkennlinie**:

$$\frac{\rho(z)}{\rho_{max}} = \frac{z}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi z}{H}\right)$$

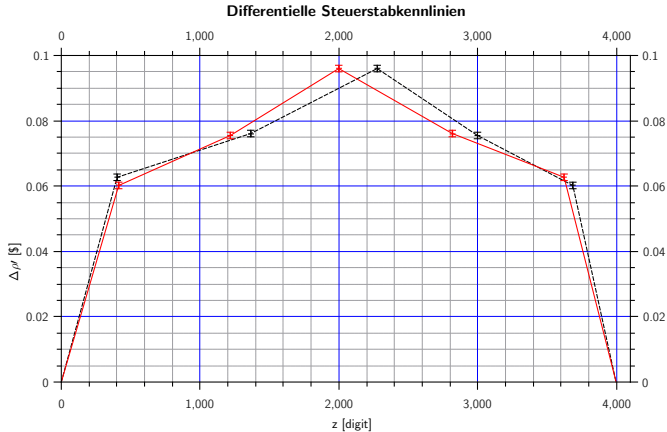


Quelle: Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik Ausbildungskernreaktor: *Reaktorpraktikum Versuch „Steuerstabkalibrierung“*. Dresden, 05/2011

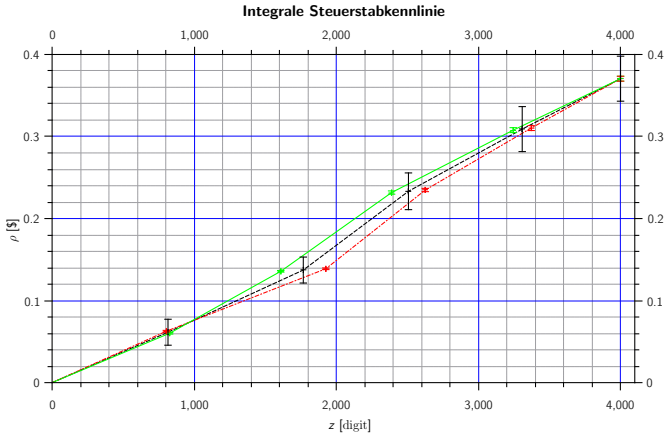
Messung: Kompensationsverfahren

Zustand	z_1 [digit]	z_2 [digit]	z_3 [digit]	T_2 [s]	T_s [s]
Kritisch	0	4.000	2.924	-	-
ÜK	827	4.000	2.924	127	183
Kritisch	827	3.371	2.924	-	-
ÜK	1.609	3.371	2.924	97	140
Kritisch	1.609	2.626	2.924	-	-
ÜK	2.389	2.626	2.924	72	104
Kritisch	2.389	1.926	2.924	-	-
ÜK	3.245	1.926	2.924	96	139
Kritisch	3.245	804	2.924	-	-
ÜK	4.000	804	2.924	121	175
Kritisch	4.000	0	2.802	-	-

Messergebnis: differentielle Steuerstabkennlinie



Messergebnis: integrale Steuerstabkennlinie



Charakteristische Reaktivitätswerte für den AKR-2

- ▶ maximale Reaktivität aller 3 Stäbe:

$$\rho_{max} = \rho_{1,max} + \rho_{2,max} + \rho_{3,max} = (1,12 \pm 0,03) \$$$

- ▶ Überschussreaktität aller Stäbe:

$$\rho_{\text{Überschuss}} = \rho_{1,\text{Überschuss}} + \rho_{2,\text{Überschuss}} + \rho_{3,\text{Überschuss}} = (0,64 \pm 0,03) \$$$

- ▶ Abschaltreaktivität:

$$\rho_{Abschalt} = \rho_{max} - \rho_{\text{Überschuss}} = (0,48 \pm 0,04) \$$$

Bestimmung der Reaktivität einer Cadmium-Probe

- ▶ ausgehend vom kritischen Zustand
 $(z_1, z_2, z_3) = (2\,406, 2\,251, 2\,513)$ digit wird Probe in Experimentierkanal eingebracht
- ▶ unterkritischer Zustand wird durch Ausfahren von Stab 1 kompensiert
- ▶ neuer kritischer Zustand $(z_1', z_2', z_3') = (3\,888, 2\,251, 2\,513)$ digit
- ▶ Reaktivität der Probe ergibt sich aus integraler Steuerstabkennlinie:

$$\rho_{Cd'} = \rho_1'(z_1') - \rho_1'(z_1) = (0,13 \pm 0,02) \text{ \$}$$

Diskussion

- ▶ die vorliegenden (biologischen) Strahlenschutzmaßnahmen genügen den geforderten Grenzwerten
- ▶ Dosisleistung skaliert in etwa linear mit der Reaktorleistung
→ Leistungs-Reaktoren müssen noch stärker geschirmt werden
- ▶ Abstandsquadratsgesetz wurde bestätigt (so gut das mit so wenigen Messwerten möglich war)
- ▶ da $\rho_{\text{Überschuss}} < 1$ \$, besteht weder bei technischen noch bei personellen Fehlern die Möglichkeit, den Reaktor aus dem kritischen in einen prompt überkritischen Zustand zu versetzen