

Kapitel 11

Kernreaktionen

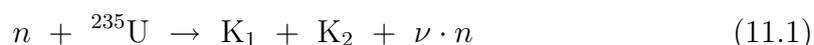
Es gibt eine Fülle experimentellen Materials über Kernreaktionen und deren theoretische Beschreibung. In diesem Kapitel werden wir uns auf nur zwei Reaktionen beschränken, die allerdings für die Anwendung, speziell für die technische Nutzung zur Energiegewinnung, sehr wichtig sind:

- induzierte Kernspaltung und
- Kernfusion.

Auf die Bedeutung dieser Themen für die Wirtschaft, Umwelt und Politik braucht man kaum mehr hinzuweisen. Einen Überblick über die physikalischen Aspekte des Energieproblems findet man zum Beispiel in dem Buch 'Energie' von Diekmann und Heinloth [35].

11.1 Induzierte Kernspaltung

Wir hatten im letzten Kapitel bereits erwähnt, daß Kernspaltung durch Neutronen induziert werden kann. Ein Beispiel, das für die Energiegewinnung durch Kernspaltung wichtig ist, ist die induzierte Spaltung von ^{235}U :



(ν ist die Anzahl der in der Spaltung freiwerdenden Neutronen). Der **Energiegewinn** ist:

$$\Delta E \approx 200 \text{ MeV} / \text{Spaltung} \quad (11.2)$$

Das ist zu vergleichen mit etwa 10 eV bei der chemischen Verbrennung von Kohlenstoff: $\text{C} + 2 \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$.

Von dem Energiegewinn bei der Spaltung gehen etwa 160 MeV in die kinetische Energie der erzeugten Kerne, der Rest wird in Form von Strahlung frei (n, γ, e, ν_e). Wenn bei der Spaltung mehr als ein Neutron wieder frei wird,

$$\nu > 1, \quad (11.3)$$

dann ist grundsätzlich eine **Kettenreaktion** möglich. Bei unserem obigen Beispiel ist diese Zahl:

$$\nu({}^{235}\text{U}) = 2.43 \quad (11.4)$$

Es ist also eine Kettenreaktion möglich. Für die Nutzung zur Energiegewinnung gibt es allerdings zwei Schwierigkeiten:

- das Isotop ist nur in geringen Mengen in natürlichem Uran vorhanden,
- die Neutronen müssen für einen effektiven Einfang thermisch sein, werden aber mit MeV-Energien emittiert.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Verhältnisse bei **natürlichem Uran**:

A	Gehalt [%]	Spalt-schwelle [MeV]	$\Delta E_B(U+n)$ [MeV]	notwendige n-Energie	$\sigma(n, f)$ [b]
235	0.7	5.8	6.4	therm.	582
238	99.3	6.3	4.8	≥ 1.5 MeV	≤ 1

Das häufigste Isotop, ^{238}U , ist für die Spaltung nicht geeignet, weil die Spaltschwelle höher liegt als der Energiezuwachs durch den Neutroneneinfang. Für ^{235}U gibt es dann allerdings das Problem, daß die Neutronen thermisch sein müssen.

Abbildung 11.1 zeigt die Verteilung der Neutronenenergien aus dem Spaltprozess. Da diese Energien im MeV-Bereich liegen, der Einfangquerschnitt von ^{235}U aber nur für thermische Neutronen (bei Zimmertemperatur ist $kT \approx 1/40$ eV) genügend groß ist, müssen die Neutronen abgebremst werden. Abbildung 11.2 zeigt allerdings, daß die Neutronen beim Abbremsen in dem Uran einen sehr gefährlichen Bereich passieren müssen: Oberhalb der thermischen Energien gibt es einen Bereich in dem der Wirkungsquerschnitt für (n, γ) -Reaktionen sehr groß wird. In diesem Bereich werden durch den n-Einfang γ -Übergänge, nicht aber Spaltung angeregt.

Um dieses Problem zu umgehen, werden separate Moderatoren, außerhalb des Urans genutzt, die durch elastische Streuung die Neutronen abbremsen. Die Anforderungen an einen Moderator sind:

- kleiner Wirkungsquerschnitt σ_{abs} für n-Einfang,
- kleine Bremslänge l_{brems} für Neutronen, d. h. die Masse der Moderatorkerne sollte nahe der Neutronenmasse sein, also sind leichte Kerne bevorzugt.

Eigenschaften gängiger Moderatoren sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Moderator	σ_{abs} [b]	l_{brems} [cm]
H ₂ O	0.664	5.3
D ₂ O	0.001 (!)	11.2
Graphit	0.0045	19.1.

Wasser hat gegenüber Graphit den Vorteil, daß die Funktion des Moderators und des Kühlmittels in Reaktoren kombiniert werden können (Druck- und Siedewasserreaktoren). Das gibt dem System eine Stabilität und Sicherheit: bei Verlust von

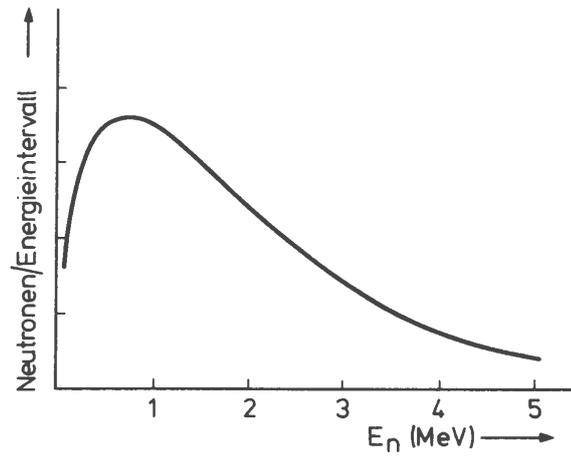


Abbildung 11.1: Energieverteilung der Spaltneutronen.

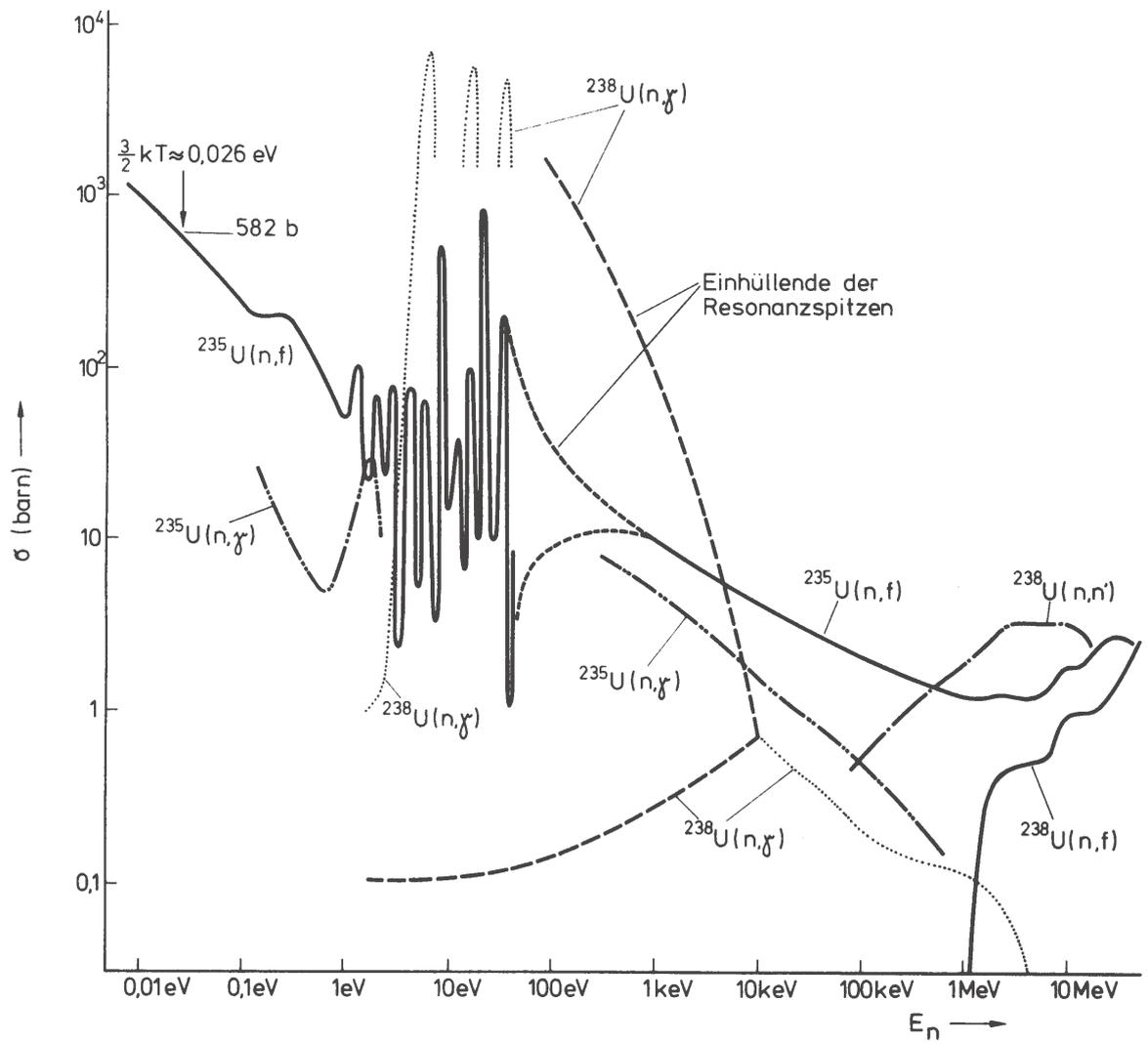


Abbildung 11.2: Wirkungsquerschnitte für Reaktionen von Neutronen mit Uran als Funktion der Neutronenenergie.

Kühlmittel sinkt die Kettenreaktionsrate. Mit Graphit und D_2O ('schweres Wasser'), die eine besonders geringe Absorption aufweisen, können Kettenreaktionen auch in natürlichem Uran aufrechterhalten werden. Bei einfachem Wasser muß das Isotop ^{235}U angereichert werden (auf einige Prozent).

11.1.1 Kernspaltungsreaktoren

Neutronenbilanz in einem Reaktor: In einem Schritt i seien N_i thermische Neutronen vorhanden, die Spaltprozesse machen können. Im nächsten Schritt vermehren sich die thermischen Neutronen um einen Faktor k_{eff} :

$$N_{i+1} = k_{eff} \cdot N_i \quad (11.5)$$

Die Kettenreaktion verläuft stabil (stationär), wenn die Anzahl thermische Neutronen gleich bleibt, das heißt, wenn gilt:

$$k_{eff} = 1 \quad (11.6)$$

Der effektive Vermehrungsfaktor k_{eff} hängt mit dem Vermehrungsfaktor k_∞ für einen unendlich großen Reaktor über eine Geometriefaktor zusammen:

$$k_{eff} = k_\infty \cdot p_{geom}. \quad (11.7)$$

Der Faktor p_{geom} gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß ein Neutron nicht aus dem Reaktor entweicht. Bei einer Anreicherung von ^{235}U auf etwa 3% ergibt sich typisch $k_\infty \approx 1.3$.

Den Vermehrungsfaktor k_∞ zerlegt man üblicherweise in vier weitere Faktoren (4-Faktorenformel):

$$k_\infty = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \quad (11.8)$$

Die einzelnen Faktoren haben folgende Bedeutung:

- η : Vermehrungsfaktor für thermische Neutronen (Anzahl der erzeugten schnellen Neutronen pro thermischem Neutron; typisch $\eta \approx 1.3 \dots 2.1$);
- ϵ : Wahrscheinlichkeit für Spaltung durch schnelle Neutronen (typisch $\epsilon \approx 1.03$);
- p : Wahrscheinlichkeit für Entkommen der (n, γ) -Resonanzen;
- f : Wahrscheinlichkeit für Entkommen der Absorption im thermischen Bereich.

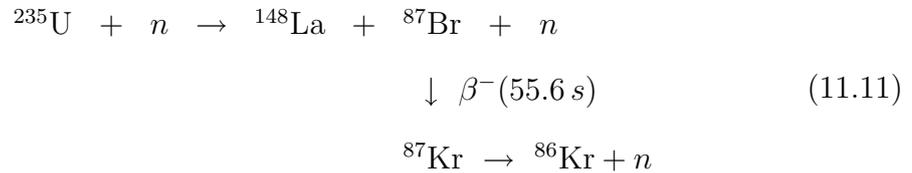
Reaktorregelung: Ein Reaktor muß so geregelt werden, daß $k_{eff} \approx 1$ gehalten wird, das heißt, die Neutronendichte muß zeitlich stabil sein. Die zeitliche Änderung der Neutronendichte ist:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{(k-1) \cdot \rho}{t_0} \quad \implies \quad \rho = \rho_0 \cdot e^{t/\tau} \quad (11.9)$$

Die Zeitkonstante für den Neutronenanstieg ist:

$$\tau = \frac{t_0}{k-1} \quad (11.10)$$

Die typischen Zeiten für die Thermalisierung und den Einfang der Neutronen sind etwa 1 ms. Damit würden sich zu kurze Reaktionszeiten für die Regelung mit mechanischen Methoden ergeben. Hier hilft die Natur weiter: etwa 1% der Neutronen werden verzögert nach dem Spaltprozess erzeugt, zum Beispiel:



Die Regelung erfolgt durch Einführen von Materialien, die Neutronen gut absorbieren, zum Beispiel B- oder Cd-Stäbe ($\sigma_{th}(\text{B}) = 770 \text{ b}$, $\sigma_{th}(\text{Cd}) = 2450 \text{ b}$). Erstrebenswert ist eine ‘inhärente Sicherheit’, das heißt zum Beispiel, daß sich bei jeder unkontrollierten Veränderung in dem Reaktor der Vermehrungsfaktor erniedrigt:

$$\frac{dk}{dt} < 0 \tag{11.12}$$

Zum Beispiel kann man bei Leichtwasserreaktoren mit folgender Ereigniskette rechnen (negativer ‘Dampfblasenkoeffizient’):

Überhitzen \rightarrow Blasenbildung \rightarrow weniger thermische Neutronen.

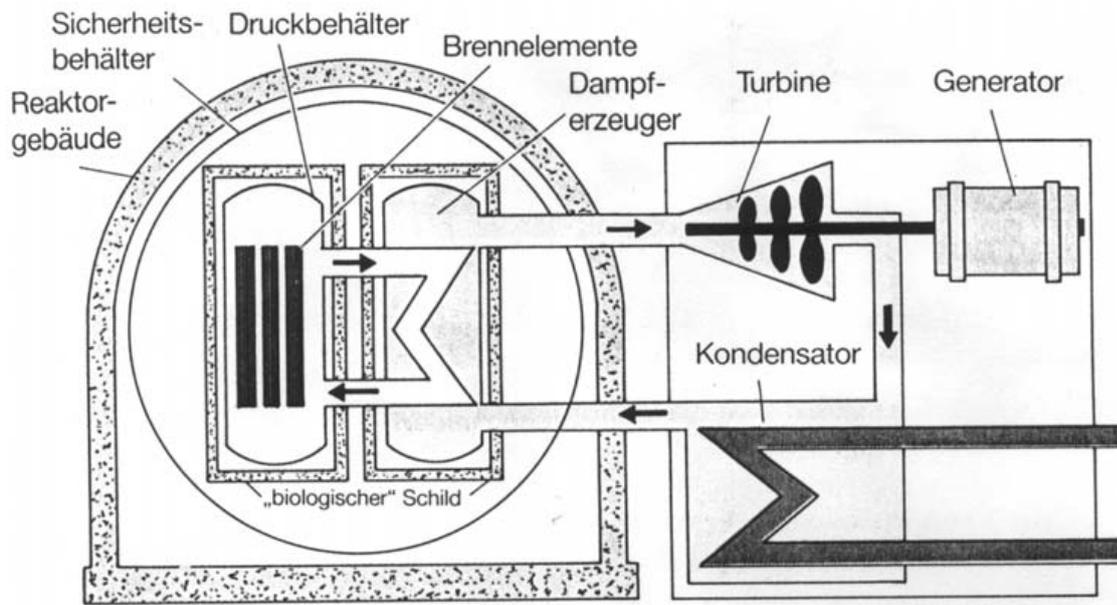
Beim Tschernobyl-Reaktor sind die Funktionen des Moderators (Graphit) und des Kühlmittels (Wasser) getrennt, so daß bei Kühlmittelverlust die Kettenreaktion nicht automatisch reduziert wird.

Allerdings hat auch ein Leichtwasserreaktor Probleme, wenn Kühlwasser verloren geht: auch wenn die Kettenreaktion unterbrochen ist, gibt der Reaktorkern noch große Wärmemengen, die durchaus einige MW sein können, durch Strahlung ab (‘Nachwärme’).

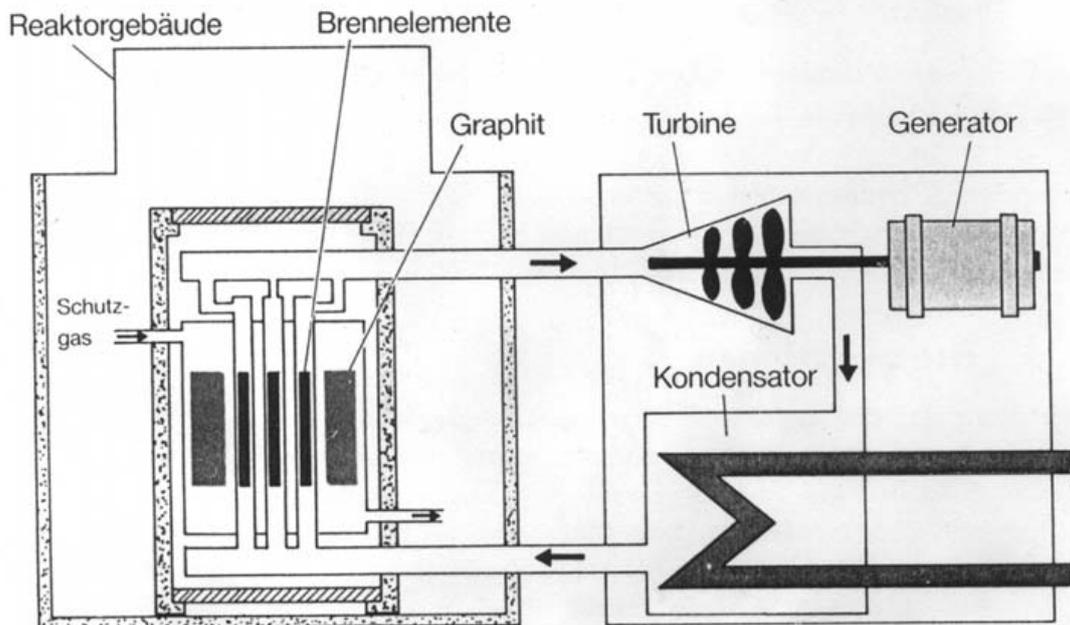
Technisches Prinzip eines Reaktors: In Abbildung 11.3 sind schematisch die technischen Ausführungen eines Druckwasserreaktors (z. B. Biblis) und eines graphitmoderierten Siedewasserreaktors (z. B. Tschernobyl) dargestellt.

Der Reaktor enthält den Reaktorkern mit dem Brennstoff, Moderatoren und Absorbern sowie das Dampferzeugungssystem für die Elektrogenatoren. Die Sicherheitssysteme umfassen die (zum Teil automatischen) Regelungssysteme, Notkühlsysteme und passive Sicherungseinrichtungen. In Abbildung 11.3 zeigt das Schnittbild des Druckwasserreaktors von innen nach außen folgende passive Sicherheitselemente:

- einen den Reaktorkern umgebenden Druckbehälter aus Stahl;
- eine Betonabschirmung;
- einen kugelförmigen Sicherheitsbehälter aus Stahl;
- die äußere Stahlbetonhülle.



Deutscher Druckwasserreaktor



Graphitmoderierter Siedewasserreaktor (Tschernobyl)

Abbildung 11.3: Schematische Darstellung eines Druckwasserreaktors und eines graphitmoderierten Siedewasserreaktors.

Da das Kühlmittel, Wasser, gleichzeitig Moderator ist, ergibt sich ein negativer ‘Dampfblasenkoeffizient’ (siehe oben), das heißt, daß die Kettenreaktion bei Kühlmittelverlust gestoppt wird.

Der graphitmoderierte Siedewasserreaktor in Abb. 11.3 unterscheidet sich durch die Trennung von Moderator (Graphit) und Kühlmittel (Wasser). Ebenfalls fehlen abgeschlossene Sicherheitsummantelungen.

Der Kraftwerksunfall von Tschernobyl: Als hauptsächliche Ursache für den schweren Kraftwerksunfall in Tschernobyl im April 1986 wird, neben menschlichem Versagen, ein zu kompliziertes Regelungs- und Sicherheitssystem angegeben (siehe zum Beispiel ‘Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl’, Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Köln/Garching 1986). Schwierigkeiten bei der Erfassung und Regelung der Leistung des Reaktors haben sich unter anderem aus folgenden Gründen ergeben:

- große Abmessungen bei relativ geringer Leistungsdichte des Reaktorkerns (Höhe 7 m, Durchmesser 12 m, 4.2 MW/m^3);
- komplizierte Struktur der lokalen Leistungsverteilung (Brennstoff in 1700 Druckröhren);
- positiver ‘Dampfblasenkoeffizient’ weil das Kühlmittel nicht gleichzeitig als Moderator dient.

Im Laufe des Unfalls ist es zur Kernschmelze gekommen, die sich besonders katastrophal auswirkte, weil das Reaktorgebäude durch brennendes Graphit und Wasserstoffexplosionen zerstört wurde. Der Wasserstoff hat sich in Reaktionen von Zirkonium mit Wasser gebildet. Das Zirkonium wird als Schutzhülle für den Brennstoff verwendet. Durch die Hitze und die Explosionen wurde radioaktives Material bis zu 1000 m hoch in die Atmosphäre geschleudert und konnte so durch Strömungen weit über Europa verteilt werden.

11.1.2 Brutreaktionen

Das Problem, daß das spaltbare ^{235}U in nur geringen Mengen vorkommt, kann im Prinzip durch das ‘Brüten’ von Spaltmaterial umgangen werden. Eine Brutreaktion mit ^{238}U als Brutstoff ist in Abb. 11.4 oben dargestellt: Die Kette beginnt links mit der Spaltung von ^{239}Pu mit schnellen Neutronen (kein Moderator notwendig!). Von den Spaltneutronen wird ein Teil von dem Brutstoff ^{238}U eingefangen, der sich dann über einige Zerfälle in ^{239}Pu umwandelt, das dann wieder für die Spaltung zur Verfügung steht.

Dieses Brutprinzip wird im ‘schnellen Brüter’ verwendet. Dieser Reaktortyp ist technologisch sehr schwierig wegen seiner hohen Energiedichte (ohne Moderator) und die dadurch bedingte Kühlung mit flüssigem Natrium, das eine sehr viel höhere Wärmeleitfähigkeit als Wasser hat. Ein anderes Problem ist die Spaltfähigkeit des Plutoniums durch schnelle Neutronen, was es bombenfähig macht. Bekanntlich ist die Entwicklung des schnellen Brüters in Deutschland (Kalkar) eingestellt worden.

In Abb. 11.4 unten ist der in ‘Hochtemperaturreaktoren’ (HRT) genutzte Brutprozess dargestellt. Hier hat ^{232}Th die Rolle des Brutstoffes und ^{233}U die Rolle des

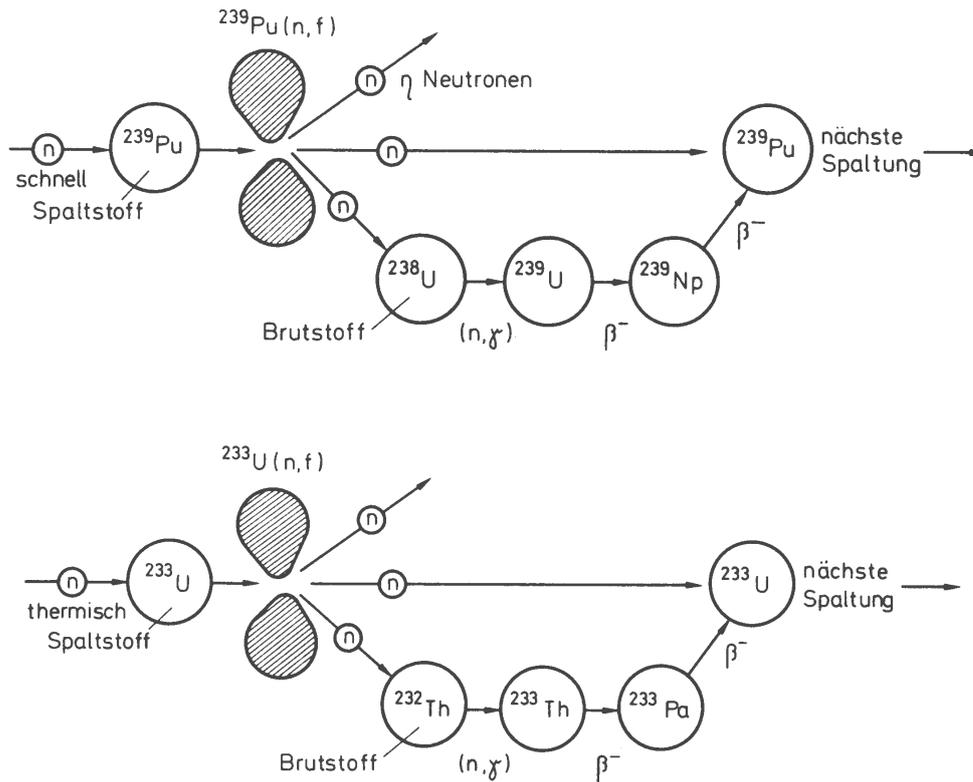


Abbildung 11.4: Oben: Spalt-Brut-Kette des schnellen Brütters; unten: Spalt-Brut-Kette des Hochtemperaturreaktors.

Spaltstoffes. In diesem Fall verläuft die Spaltung allerdings über thermische Neutronen. In Hamm-Uentrop ist bis 1989 ein Prototyp-HRT für vier Jahre in Betrieb gewesen. Diesem Reaktortyp werden einige günstige Eigenschaften nachgesagt: die hohe Betriebstemperatur bewirkt einen guten Wirkungsgrad, wegen der hohen Temperatur kann die Abwärme als Prozesswärme, zum Beispiel für Kohlevergasung genutzt werden, die Verpackung des Brennstoffes in kompakte Kugeln erlaubt eine relativ günstige Entsorgung. Trotzdem ist die Entwicklung aus technischen Gründen (?) abgebrochen worden.

11.1.3 Spaltprodukte und nukleare Entsorgung

Die Radioaktivität der abgebrannten Brennelemente und des Reaktorkerns kommt von den Spaltprodukten, den im Spaltprozess erzeugten Aktiniden (z. B. U, Pu, Np wie in der Brutreaktion Abb. 11.4) und den aktivierten Behältermaterialien. Die Spaltprodukte haben in der Regel einen Neutronenüberschuß, den sie meistens durch β -Zerfall, manchmal auch durch Neutronenemission ausgleichen; Anregungsenergien werden auch durch γ -Strahlung abgegeben. Der größte Teil der Aktivität ist nach einigen Monaten abgeklungen (Abb. 11.5), besonders langlebig sind die Aktiniden. Während der anfänglich schnellen Abklingphase werden abgebrannte Brennelemente in einem Wasserbecken im Reaktorbereich gelagert. Zu Beginn der Abklingzeit geben die Spaltprodukte eine Wärmeleistung von etwa 1 MW pro Tonne Brennstoff ab.