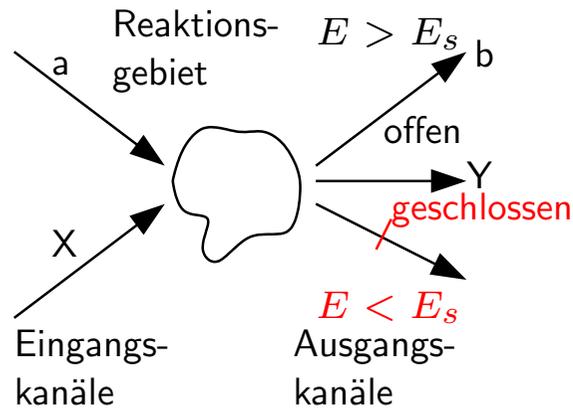
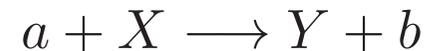


Kernreaktionen



Bei Kernreaktionen werden oft nicht alle Prozesse detailliert dargestellt, sondern nur die **Eingangskanäle** und die **Ausgangskanäle**. Diese sind offen oder geschlossen, je nachdem ob die zur Verfügung stehende Energie E eine Schwellenenergie E_s übersteigt. Die Reaktion

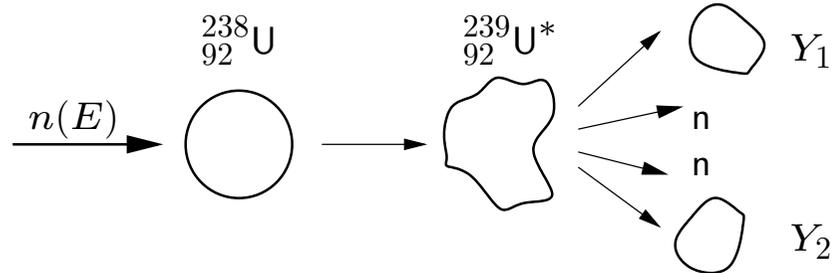


wird in Kurzform $X(a, b)Y$ geschrieben. Es gibt verschiedene Kategorien von Kernreaktionen, dabei sind die inelastischen die für uns interessantesten.

- $X(a, a)X^*$ bei der Kern X angeregt wird¹ und Projektil a Energie verliert,
- $X(a, b)Y^{(*)}$, wo $X \neq Y$, z. B. ${}^7_3\text{Li}(p, n){}_4^7\text{Be}$ oder auch ${}^7_3\text{Li}(p, p){}_2^4\text{He} + {}^3_1\text{H}$

¹und anschließend z. B. durch γ -Emission zerfällt, $X^*(, \gamma)X$

Stoßinduzierte Kernspaltung



Stöße, z. B. von Neutronen einer Energie E mit einem Urankern können zu einer Kernspaltung führen. Hat der Urankern das Neutron eingefangen, entsteht ein sog. **Compound-Kern** in einem ange-

regten Zustand. Weil sich die Anregungsenergie auf alle Nukleonen verteilt, "kennt" er den Anfangszustand nicht mehr und kann je nach Energieeintrag statistisch in zwei oder mehr Bruchstücke und i Neutronen zerfallen. Der Zerfallskanal ist nur von der Energie abhängig.

Man schreibt die Energiebilanz einer Reaktion als

$$M(a) + M(X) = \sum M(b) + \sum M(Y) + Q/c^2,$$

wo die Größe Q **Wärmetönung** der Reaktion genannt wird.

Beispiel

Die Reaktion ${}^4_2\text{He}(\alpha, p){}^7_3\text{Li}$ hat eine Wärmetönung von $Q = -17$ MeV. Die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = p_\alpha^2/(2m_\alpha)$ des α -Projektils muss groß genug sein um sowohl die Wärmetönung als auch die Schwerpunktsbewegung aufbringen zu können, also größer sein als die Schwellenenergie E_s . Für ein ruhendes Targetatom (hier ${}^4_2\text{He}$) ist die Schwerpunktseschwindigkeit v_s und kinetische Energie $E_{\text{kin,S}}$

$$v_s = \frac{p_\alpha}{m_\alpha + m_X}, \quad E_{\text{kin,S}} = \frac{1}{2} \frac{(m_\alpha v_\alpha)^2}{m_\alpha + m_X} \quad \text{womit} \quad E_s = Q + \frac{p_\alpha^2}{2(m_\alpha + m_X)} = E_{\text{kin}}^{\text{min}}.$$

Mit $p_\alpha^2 = 2m_\alpha E_{\text{kin},\alpha}$ kann p_α^2 ersetzt und die Gleichung oben nach $E_{\text{kin},\alpha}^{\text{min}}$ aufgelöst werden.

$$E_{\text{kin},\alpha}^{\text{min}} = Q \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_X} \right) = 17 \cdot \left(1 + \frac{4}{4} \right) \text{MeV} = 34 \text{MeV}.$$

Kernspaltung

Bei der Kernspaltung wird der im Grundzustand nahezu kugelförmige Kern verformt. Dadurch verändert sich nach Tröpfchenmodell seine Oberflächenenergie, E^O , und auch die Coulomb-Energie, E_C . Die Oberflächenenergie ist proportional zur Oberfläche. Nehmen wir als einfachste Verformung die von Kugel mit Radius R zu einem Ellipsoid mit Halbachsen a und b an, so kann man zeigen², dass mit $a = R(1 + \varepsilon)$ und $b = R/(1 + \varepsilon)^{1/2}$

$$E_{\text{ell}}^O = E_0^O \left(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \dots \right) = E_0^O + \Delta E^O, \quad E_{\text{ell}}^C = E_0^C \left(1 - \frac{1}{5}\varepsilon^2 + \dots \right) = E_0^C + \Delta E^C.$$

Das Volumen bleibt gleich ($A = \text{konst.}$), die Coulomb-Energie nimmt ab, während die Oberflächenenergie zunimmt. Der Kern bleibt stabil, wenn $\Delta E^O \geq \Delta E^C$ bleibt. Gilt dies nicht, kann der Kern spontan zerfallen.

²Siehe Übung 6.5 im Demtröder!

Wir definieren den **Spaltbarkeitsparameter** $X_S \doteq \Delta E^C / \Delta E^O$

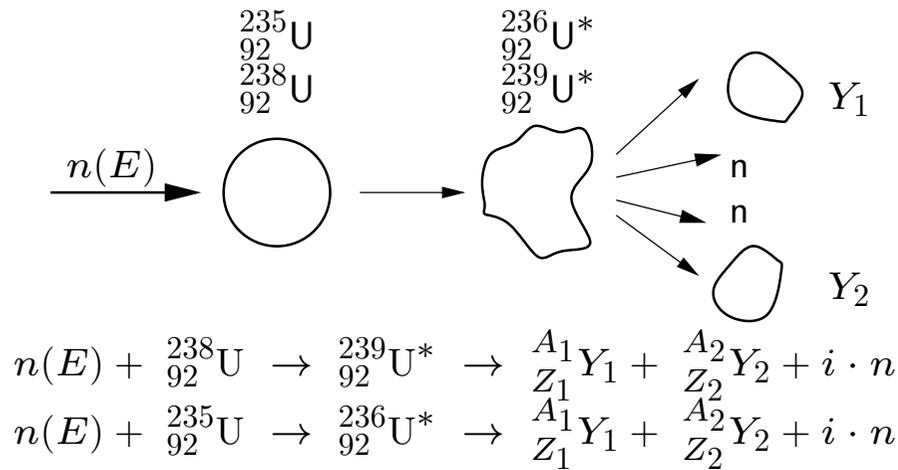
$$\Delta E^O = \frac{2\varepsilon^2}{5} E_0^O \quad \text{und} \quad \Delta E^C = \frac{\varepsilon^2}{5} E_0^C, \quad \text{also} \quad X_S = \frac{E_0^C}{2E_0^O} \geq 1.$$

Der Kern kann spontan zerfallen, wenn der Spaltbarkeitsparameter $X_S \geq 1$ gilt. Aus dem von Weizsäckerschen Tröpfchenmodell kennen wir die Ausdrücke und Werte für die Oberflächen- und Coulomb-Energie

$$X_S = \frac{a_C \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3}}{2 \cdot a_O \cdot A^{2/3}} = \frac{a_C}{2a_O} \cdot \frac{Z^2}{A} = \frac{0.714 \text{MeV}/c^2}{2 \cdot 18.33 \text{MeV}/c^2} \cdot \frac{Z^2}{A} \implies X_S \geq 1 \quad \text{für} \quad \frac{Z^2}{A} \geq 51.$$

Solch schwere Kerne kommen in der Natur nicht vor, sie wären schon längst spontan zerfallen. Leichtere Kerne können wegen des Tunneleffektes trotzdem zerfallen, allerdings wesentlich langsamer. Der α -Zerfall ist dann oft schneller.

Stoßinduzierte Spaltung



In der links dargestellten wichtigen stoßinduzierten Reaktion sind die physikalischen Grundlagen der Kernspaltung dargestellt. Wieso aber “zerplatzt” der angeregte Kern ${}_{92}^{236}\text{U}$ oder ${}_{92}^{239}\text{U}$? Das durch den ${}_{92}^{235}\text{U}$ -Kern eingefangene Neutron hat eine Bindungsenergie von ca. 6.55 MeV, die Schwellenenergie zur Spaltung beträgt

aber nur 5.8 MeV. Diese hohe Bindungsenergie des Neutrons kommt dadurch zustande, dass nun alle Neutronen im Kern gepaart sind, ${}_{92}^{236}\text{U}$ ist ein g-g-Kern. Die jetzt zur Verfügung stehende Bindungsenergie setzt der Kern in Schwingungen um, wie ein wassergefüllter Ballon. Weil diese Energie größer ist als die Spaltenergie von 5.8 MeV, spaltet der angeregte Kern spontan und setzt mehrere Neutronen frei. Bei ${}_{92}^{235}\text{U}$ braucht das Neutron also keine nennenswerte kinetische

Energie um den Kern zu spalten. Bei ${}_{92}^{238}\text{U}$ ist die Bindungsenergie des Neutrons mit 4.8 MeV niedriger (es entsteht ein u-g-Kern) als die Spaltenergie von 6.3 MeV, das Neutron muss die Energiedifferenz in Form von kinetischer Energie "mitbringen".

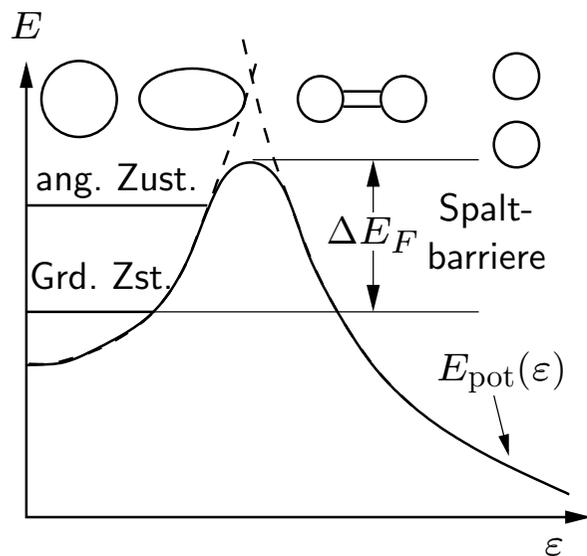
Woher kennen wir die Bindungsenergie? Dazu rechnen wir einfach die Massendifferenz der Reaktionsprodukte aus:

$$\begin{aligned} E_B &= [m({}_{92}^{235}\text{U}) + m(n) - m({}_{92}^{236}\text{U})] c^2, \\ &= [218895.002 + 939.566 - 219828.021] \text{ MeV} = 6.547 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

Für ${}_{92}^{238}\text{U}$ erhalten wir mit $m({}_{92}^{238}\text{U}) = 221695.872 \text{ MeV}$ und $m({}_{92}^{239}\text{U}) = 222630.631 \text{ MeV}$ die Bindungsenergie von 4.807 MeV.

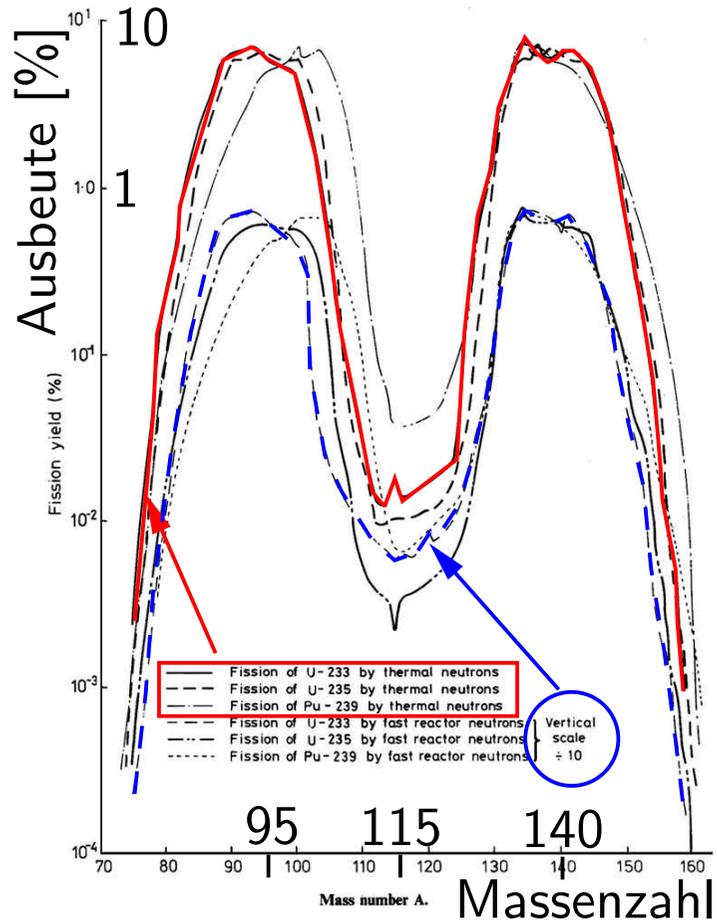
Bei ${}_{92}^{238}\text{U}$ braucht also das Neutron etwa 1.5 MeV kinetische Energie um den Kern zu spalten. Bei ${}_{92}^{235}\text{U}$ reichen sog. thermische Neutronen (mit weniger als einem eV kinetischer Energie) für die Spaltung. Wegen der in der Spaltung entste-

henden freien Neutronen ist es möglich, mit ${}_{92}^{235}\text{U}$ eine sog. **kritische Masse** an spaltbarem Material zu haben, oberhalb derer die Kernspaltung spontan und dann explosionsartig einsetzt. Dies wird zum Bau von Kernwaffen (“Atombomben”) eingesetzt. Diese bestehen aus einer unterkritischen Massenverteilung z. B. von ${}_{92}^{235}\text{U}$, welche dann bei der Zündung in eine überkritische Verteilung überführt wird.



Den Ursprung der erforderlichen Spaltenergie können wir aus dem Diagramm links erkennen. Die Oberflächenenergie nimmt mit der Deformation zu, während die Coulombstoßung abnimmt. Bis zum Sattelpunkt überwiegt die Zunahme von E^O , danach die von E^C , die schließlich die beiden Fragmente ganz auseinander treibt. Die Höhe der Spaltbarriere bestimmt die Spaltenergie.

Spaltprodukte



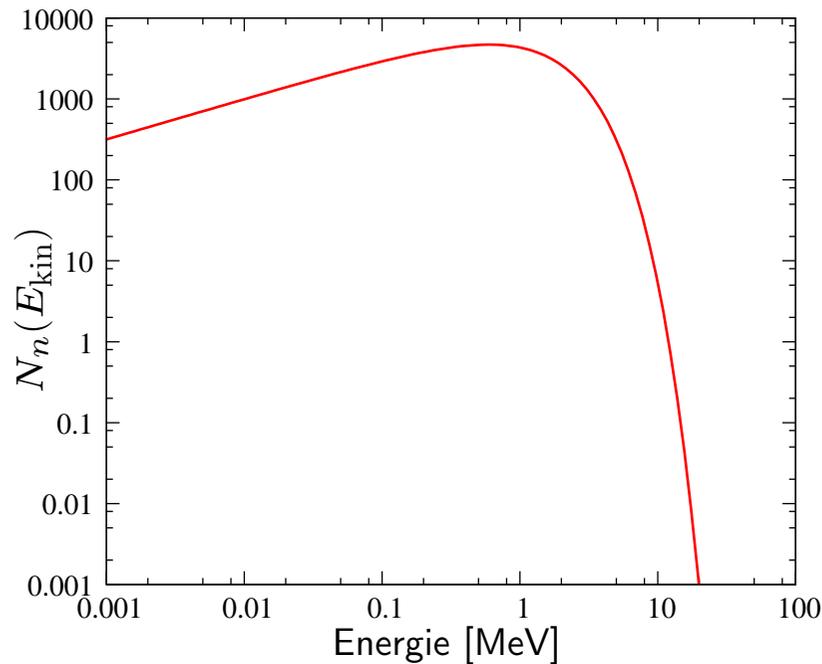
Die im Compoundkern ablaufenden Reaktionen dauern ca. 10^{-19} s, was für Kernreaktionen relativ langsam ist. Die sog. **Fissionsfragmente** haben also in der Nähe des Sattelpunktes genügend Zeit, um sich in einer nach dem Tröpfchenmodell energetisch günstigen Weise zu aufzuteilen. So entsteht die rote Kurve im Diagramm links für die Fissionsfragmente von $^{233}_{92}\text{U}$ und thermische Neutronen. Sind die Projektile schnelle Neutronen, so hat der Compoundkern weniger Zeit und es bildet sich mit zunehmender Energie eine zunehmend symmetrische Kurve wie mit der blauen Kurve angedeutet. Diese ist um einen Faktor 10 versetzt gezeichnet.

Energiebilanz

Art der Energieabgabe	${}_{92}^{233}\text{U}$ [MeV]	${}_{92}^{235}\text{U}$ [MeV]	${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [MeV]
<u>Prompte Energieabgabe</u>			
E_{kin} Fissionsfragmente	168.2	169.1	175.8
E_{kin} Neutronen	4.9	4.8	5.9
Gamma-Strahlung	7.7	7.0	7.8
Summe prompte Energieabg.	180.8	180.9	189.5
<u>Verzögerte Energieabg.</u>			
β^- Strahlung	5.2	6.5	5.3
Anti-Neutrini	6.9	8.8	7.1
verzögerte Gamma-Strahlg.	5.0	6.3	5.2
Summe verzögerte E.	17.1	21.6	17.6
Summe Energieabgaben	197.9	202.5	207.1

Die meisten Spaltprodukte sind selber wieder radioaktiv und zerfallen spontan. Dabei geben sie zusätzlich Energie ab (9.1 MeV für ${}_{92}^{233}\text{U}$, 8.8 MeV für ${}_{92}^{235}\text{U}$ und 11.5 MeV für ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Die Energie muss mit ca. 13.5 eV pro Verbrennung eines C-Atoms zu CO_2 verglichen werden.

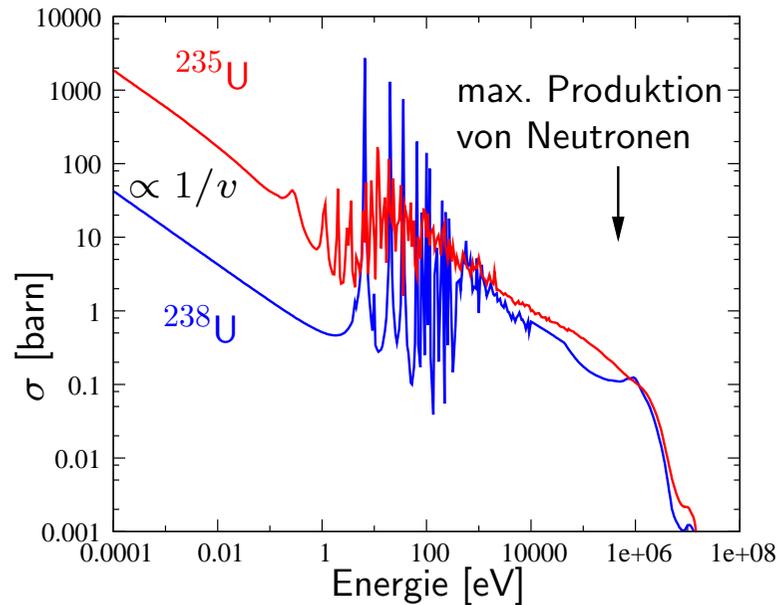
Spaltprodukte II - Neutronen



Bei der Kernspaltung $^{235}\text{U} + n(\text{thermisch}) \rightarrow ^{236}\text{U}^* \rightarrow X + Y + \nu n$ (schnell) entstehen ν schnelle Neutronen, die erst die für die Energiegewinnung aus der Kernenergie erforderliche Kettenreaktion ermöglichen. Dazu muss natürlich $\nu > 1$ sein. Im Mittel gilt $\bar{\nu} = 2.43$, das Schicksal der einzelnen Neutronen kann sehr verschieden sein. Die Energieverteilung ist links gezeigt. Sie erreicht ein Maximum knapp unterhalb von einem MeV und wird gut genähert durch

$$N_n(E_{\text{kin}}) = C \cdot \sinh(\sqrt{E_{\text{kin}}/\text{MeV}}) \cdot \exp(-E_{\text{kin}}/\text{MeV}).$$

Spaltprodukte II - Neutronen



Der Wirkungsquerschnitt σ für Neutroneneinfang für ^{235}U und ^{238}U ist links abgebildet. Es ist offensichtlich, dass unterhalb von ein paar eV Energie das seltene (ca. 0.702%) ^{235}U einen wesentlich größeren Wirkungsquerschnitt für den Neutroneneinfang hat, als das wesentlich häufigere (ca. 99.28%) ^{238}U . Wie wir auf der vorherigen Seite gesehen haben, werden knapp unterhalb 1 MeV am meisten Neutronen erzeugt. Um nun eine *kontrollierbare* Kernspaltungsrates zu erreichen, will man möglichst den "Wald" von Resonanzlinien im Bereich 1 eV - 0,1 MeV überspringen. Darunter hat ^{235}U einen etwa 100-mal größeren Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen als ^{238}U . Weil aber bei ^{238}U Neutronen mindestens 1.5 MeV Energie brauchen um den Kern zu spalten,

und diese durch verschiedene Prozesse Energie verlieren, kann es hier nicht zu einer Kettenreaktion kommen. Gelingt es aber, die Neutronen durch Stöße weiter abzubremsen, kommen sie in den sog. **thermischen** Energiebereich, wo sie mit ^{235}U besonders gut wechselwirken. Wegen der natürlichen isotopischen Zusammensetzung von Uran geschieht dies aber in natürlich vorkommendem Uran nicht. **In natürlich vorkommendem Uran gibt es (heute) mit natürlichem Wasser keine Kettenreaktion.**

Uran-Isotop	Häufigkeit	Halbwertszeit [a]
234	0.005 %	$2.455 \cdot 10^5$
235	0.702 %	$7.038 \cdot 10^8$
238	99.275%	$4.468 \cdot 10^9$

Die natürlichen Häufigkeiten von Uranisotopen sind links angegeben. Die in der Spaltung entstehenden Neutronen müssten also für eine Kettenreaktion nach den vorherigen Überlegungen außerhalb des Materials (also außerhalb des Urans) auf thermische Energien abgebremst werden, mit denen sie dann bevorzugt mit ^{235}U wechselwirken können.

Der natürliche Reaktor von Oklo

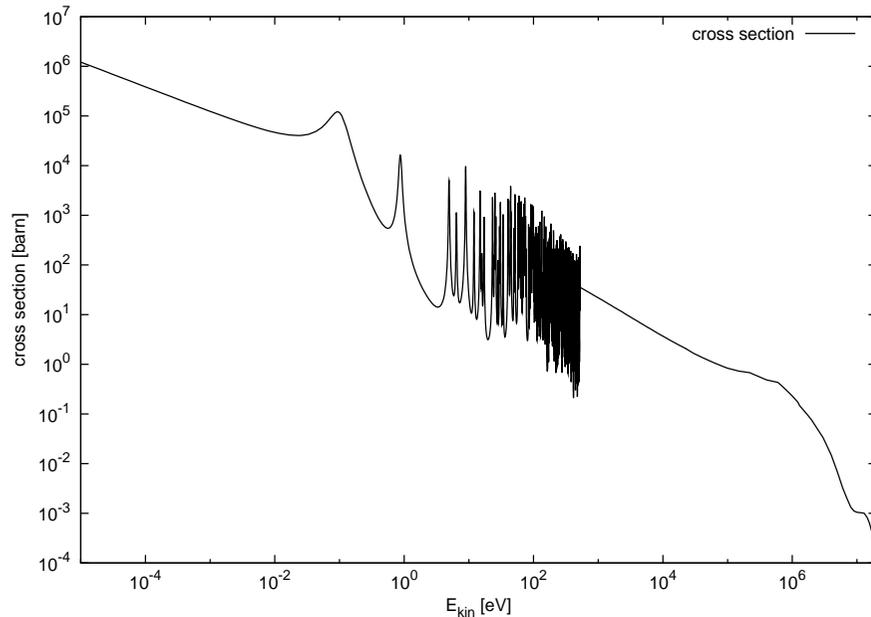


In einer Uranabbaustätte in Oklo in Gabun (Westafrika) scheint vor ca. 2 Milliarden Jahren, als die Isotopenhäufigkeit von ^{235}U wesentlich größer war als heute³, eine spontane Kettenreaktion sporadisch eingesetzt zu haben. Während gut 150'000 Jahren sorgten zyklische Überschwemmungen für eine Abbremsung der Fissionsneutronen auf thermische Energien. Im Bild (APOD) ist das Uranoxid

in einem von über 15 "Reaktoren" von Oklo als gelbliche Verfärbung zu sehen.

³Übung: Berechnen Sie den Anteil von ^{235}U am natürlichen Uran vor $2 \cdot 10^9$ Jahren!

Der natürliche Reaktor von Oklo II



Links ist der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion



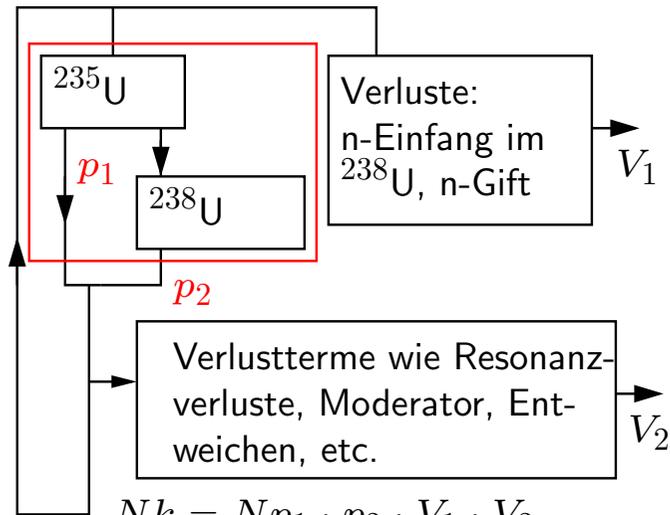
dargestellt. Dabei ist die Resonanz bei $E_{\text{kin}} = k_B T$, also $T \approx 300\text{K}$ besonders interessant. ^{149}Sm fängt thermische Neutronen ein und wird zu ^{150}Sm , welches ebenfalls stabil ist. Im Bild links entspricht

also die Resonanz bei $E_{\text{kin}} \approx 0.1\text{ eV}$ einem angeregten Zustand von ^{150}Sm . Im natürlichen Reaktor von Oklo hat man festgestellt, dass ^{149}Sm etwa 40 mal seltener vorkommt, als seine natürliche Häufigkeit von etwa 13.8% und eine

Häufigkeit aufweist, die der in typischen Reaktorabfällen entspricht. Das bedeutet, dass die hier gezeigte Resonanz auch schon vor ca. 2 Milliarden Jahren bei ca. 0.1 eV vorhanden war. Die Bindungsenergie des Neutrons beträgt ca. 8 MeV, die Energiedifferenz ist also auf ca. 10^{-8} konstant geblieben. Weil ca. 1% dieser Energie elektrostatisch ist, heißt dies wiederum, dass die Feinstrukturkonstante $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c)$ seit der Zeit bis auf 10^{-6} konstant geblieben ist⁴.

⁴Genauere Werte findet man in Shlyakhter, Nature, **264**, 340, (1976)

Kernreaktoren



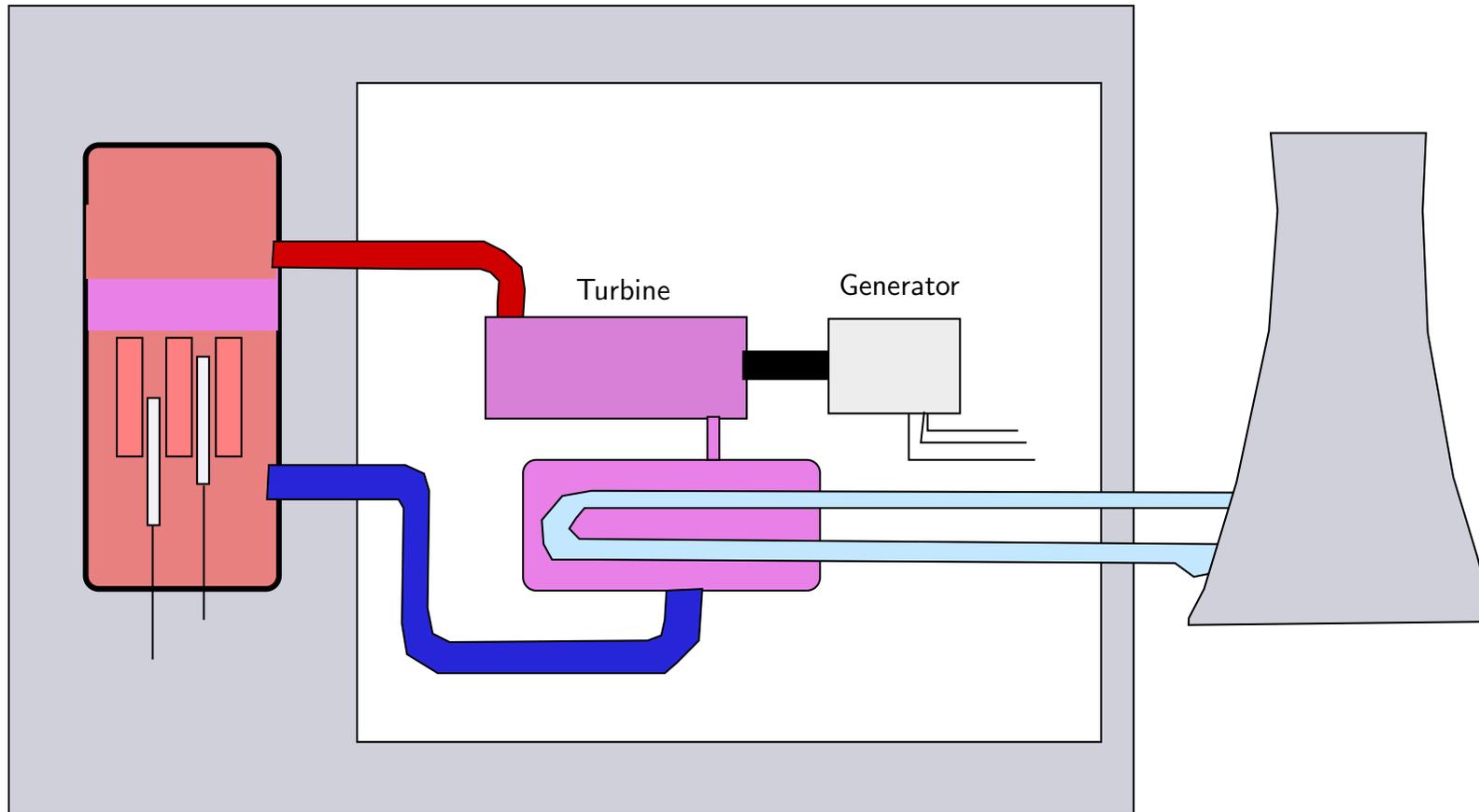
$Nk = Np_1 \cdot p_2 \cdot V_1 \cdot V_2$
thermische Neutronen stehen zur Verfügung

tere Spaltung zur Verfügung stehen. Damit die Kettenreaktion ablaufen kann, muss $k > 1$ sein. Die Reaktion braucht eine Zeit τ zum Durchlaufen und damit

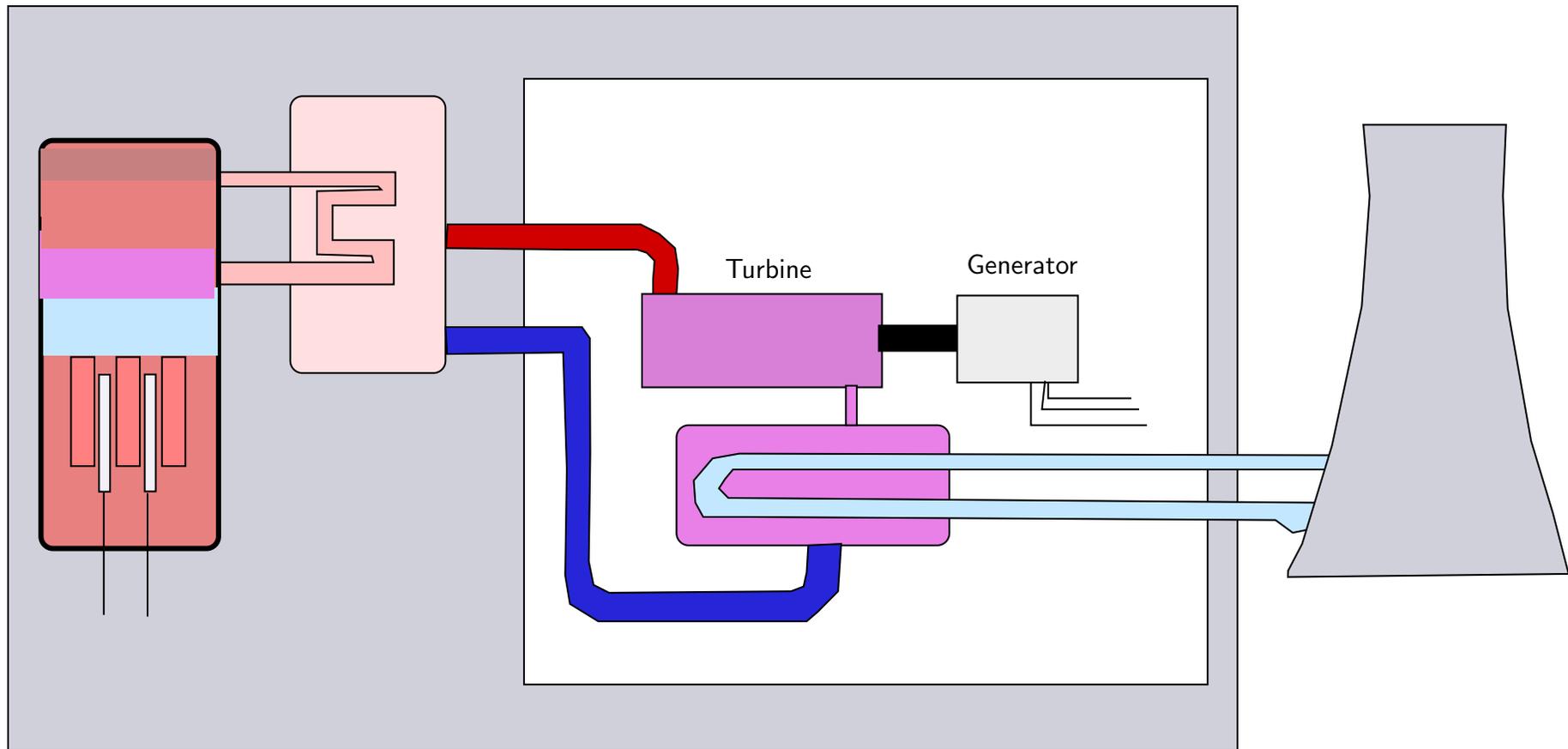
$$\dot{N} = \frac{k - 1}{\tau} N \Rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{(k-1)t/\tau}, \text{ wo } \tau \sim 1\text{ms} \text{ und } k \approx 1.007.$$

Heute kann wegen der geringen natürlichen Isotopenhäufigkeit von ^{235}U mit leichtem Wasser kein Natur-Uran Reaktor gefahren werden. Vielmehr ist eine relativ komplizierte Steuerung der im Reaktor ablaufenden und links stark vereinfacht dargestellten Reaktionen erforderlich. Der Neutronenquelle Kernspaltung stehen verschiedene zeitabhängige Verlustquellen gegenüber. Vereinfachend stellen wir fest, dass pro Kernspaltung netto $k = p_1 \cdot p_2 \cdot V_1 \cdot V_2$ thermische Neutronen entstehen, die für eine weitere

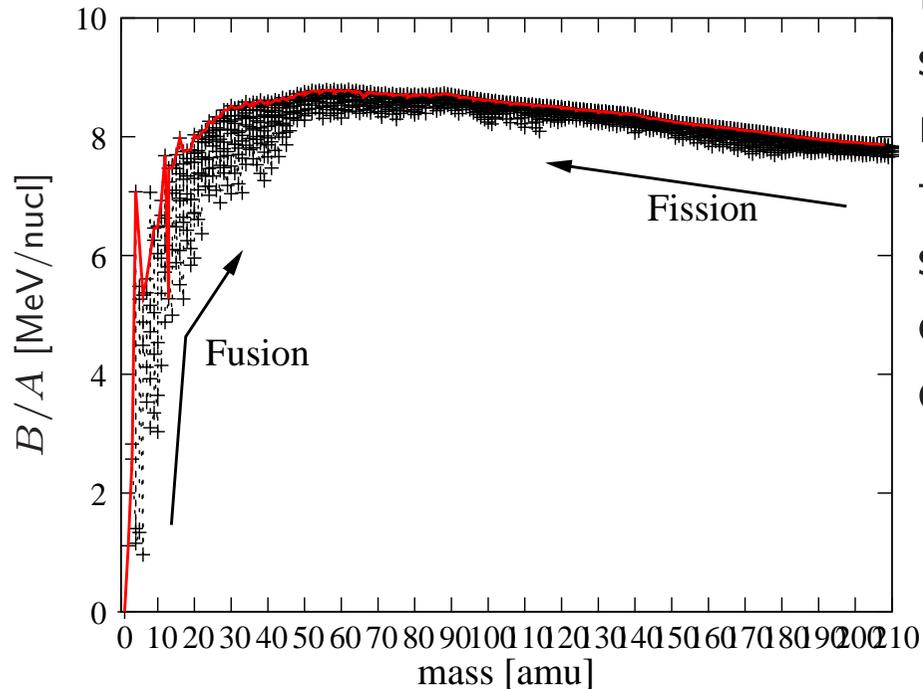
Siedewasserreaktoren



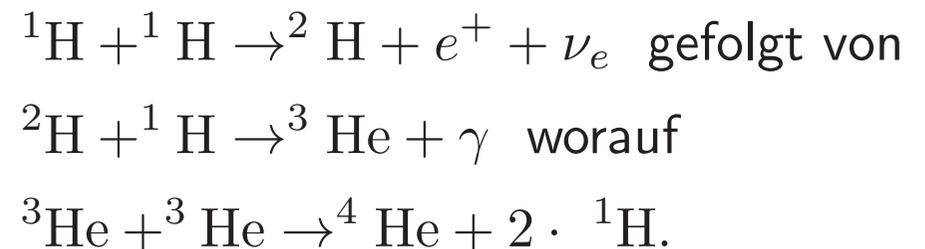
Druckwasserreaktoren



Kernfusion

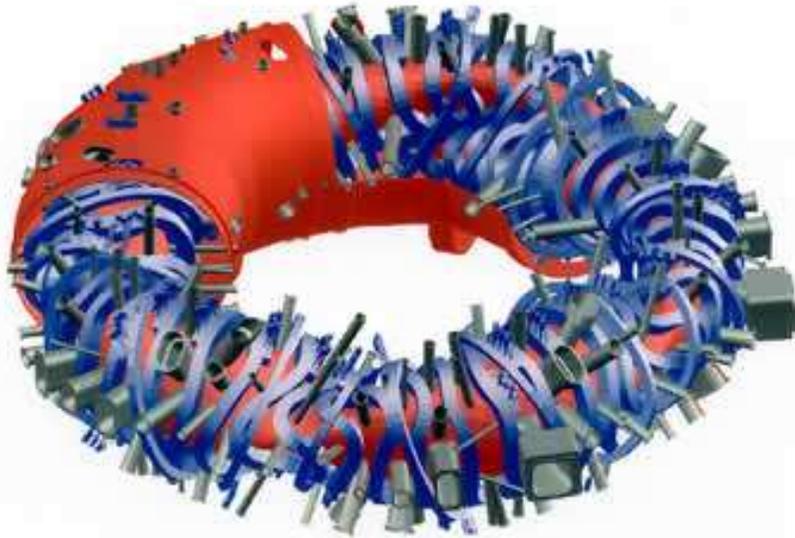


Neben der Fission, die schwere Kerne spaltet und so Energie freisetzt, könnte man auch leichtere Kerne zu schwereren fusionieren (links). Die Sonne fusioniert so laufend netto vier Wasserstoffkerne zu einem Helium-4 Kern hauptsächlich durch die Reaktionen



Dabei werden etwa 6.55 MeV pro Proton freigesetzt.

Irdische Kernfusion



Die große freiwerdende Energiemenge pro Gramm fusioniertem Material macht die Kernfusion zu einer sehr attraktiven Energiequelle. Seit gut 50 Jahren macht man fortwährend Fortschritte in der Entwicklung von Fusionsreaktoren. Allerdings bestehen nach wie vor erhebliche Schwierigkeiten in der technischen Realisierung einer kontrollierten und beständigen Kernfusion. Links ist eine Darstellung des Ver-

suchsaufbaus Wendelstein-7X am IPP Greifswald zu sehen. Durchmesser 5.5m, Magnetfeld 3 Tesla, Heizleistung 14 MW, Plasmamenge, - volumen und Temperatur 5-30 mg, 3 m³ und 60 - 100 MK. Die technischen Herausforderungen sind gewaltig.

Kernfusion II

Einige der Hauptschwierigkeiten liegen in den folgenden Punkten:

- Plasma muss bei genügend hoher Dichte und Temperaturen $T > 10^8 \text{MK}$ erzeugt und gehalten werden.
- Es muss lange genug für die Fusion bei dieser Temperatur gehalten werden. Die auftretenden Plasmainstabilitäten müssen möglichst durch das Design minimiert und kontrollierbar gemacht werden.
- Die Wechselwirkung mit den Wänden muss minimiert und trotzdem die freigesetzte Energie abgeführt werden.
- Das “Verbrennungsprodukt” ^4He muss rasch entfernt werden, bevor es die Fusion zum Erliegen bringt.

Endlagerung

Jahr für Jahr entsteht weltweit radioaktiver Abfall aus verschiedensten Quellen: Medizin, Materialforschung, Qualitätskontrollen, Kernkraft und Kernwaffenprogrammen. Pro Kopf entsteht durch die Kernkraft etwa 1 Liter Abfall pro Jahr, wovon wenige Prozent 95% der Aktivität enthalten. Wegen seiner Schädlichkeit muss radioaktiver Abfall - unabhängig von seinem Erzeuger - sicher entsorgt werden. Das Wort "entsorgt" drückt den Wunsch aus, dass man dann damit keine Sorgen mehr hat. Die Anforderungen an eine sichere Entsorgung sind vielfältig:

- Schutz während der Transportphase
- Kein Zugriff für Unbefugte
- Keine Verschmutzung von Grundwasser und der Umwelt auch in der fernsten Zukunft

Wo endlagern?

Heute sagt jedes Land, dass - aus Verantwortung für zukünftige Generationen - radioaktive Abfälle nur im eigenen Land entsorgt werden dürfen. Man mag dies aus heutiger politischer Sicht verstehen - wer würde sich dieser Verantwortung entziehen wollen! - zum Glück wurde die Kernkraft nicht bereits vor der Französischen Revolution genutzt!



Mitteleuropa zu Beginn der Französischen Revolution 1789

Quelle: <http://www.bpb.de/izpb/142639/karten>

. . . und in Zukunft?



Natürliche Analoga

Die Halbwertszeiten von radioaktivem Abfall sind lange verglichen mit der menschlichen Erinnerung. Deshalb muss man auch nach natürlichen Analoga suchen an denen man das Verhalten von radioaktivem Abfall und dessen Container und Umgebung untersuchen oder wenigstens abschätzen kann:

- Die römischen Nägel von Inchtuthil: Von den 1 Million römischen Nägeln, die AD 87 5m unter der Erdoberfläche vergraben wurden, sind nur die obersten stark korrodiert. Damit haben sie die darunterliegenden vom im Wasser gebundenen Sauerstoff geschützt.
- Die Kanone von Kronan sank 1676 in der Schlacht von Öland. Sie blieb unter Wasser im Schlick stecken und erhalten. Ihr hoher Kupfergehalt ist einigen Endlagerbehältern ähnlich. Aus Untersuchungen der Korrosionsraten an der Kanone schließt man auf $0.15 \mu\text{m}/\text{Jahr}$.

- Hadrians Wall wurde AD 122 aus Stein und einem Vorläufer von Zement erbaut. Dessen Zusammensetzung ist sehr ähnlich wie heutiger Portland-Zement.



Ein eindrucksvolles Beispiel ist der touristisch interessante fossile Wald von Dunarobba, Italien. Trotz seines Namens sind die Baumstrünke nicht versteinert, sondern bestehen größtenteils noch aus Holz, welches ein gutes Analogon für Zellulose und anderes organisches Material in medizinischen Abfällen liefert. Das Holz wurde durch die lehmige Erde konserviert. Sauerstoffreiches Oberflächen-

wasser konnte deshalb die ca. 2 Millionen Jahre alten Bäume nicht erreichen. Die Vorkommnisse im Salzbergwerk Asse liefern ein bedenkenswertes Beispiel, wie die Endlagerung nicht angegangen werden darf. . .

Tschernobyl und Fukushima

Bitte lesen Sie z. B. die entsprechenden Artikel im Wikipedia - Sie sollten am Ende dieser Doppelstunde in der Lage sein, sie in den meisten, auch den technischen, Details zu verstehen:

http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe_von_Tschernobyl

http://de.wikipedia.org/wiki/Nuklearkatastrophe_von_Fukushima

Risiko

Der Risikobegriff spielt in unserer modernen Gesellschaft eine zunehmende Rolle. Dabei spielt es für diese Vorlesung keine Rolle, ob diese zunehmende Bedeutung aus einer zunehmenden Quantifizierung oder Objektivierung oder aber aus einem zunehmenden Risikobewusstsein entspringt.

Die ISO 31000:2009 Norm umschreibt Risiko als “die Auswirkung von Ungewissheit auf Ziele”. Ein Risiko R wird mathematisch auch als Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit p und Ausmaß des Schadens C definiert.

$$R = p \cdot C.$$

Dabei muss man ehrlicherweise sagen, dass beide Faktoren erheblichen subjektiven Unsicherheiten unterliegen können. Allein die Tatsache, dass man einer Größe einen Wert zuordnen kann, heisst noch lange nicht, dass dieses Risiko gesellschaftlich akzeptiert wird.

Risiko Kernkraft

Welche Risikofaktoren sollen bei der Kernkraft berücksichtigt werden? Wer trägt sie?

- **Eintretenswahrscheinlichkeit:** Von was? Wie kann ich die Wahrscheinlichkeit von etwas abschätzen, wenn ich u. U. gar nicht weiß, was bzw. dass es eintreten kann?
- **Ausmaß des Schadens:** Wie groß ist das Ausmaß eines Schadens? Wie messe ich ihn? In Euro? In Liter Tränen? In Anzahl Toten? In Umweltschäden (und wie messe ich diese?)

Beispiel: Nehmen wir die bisher bekanntesten größeren Unfälle in Kernkraftwerken: Harrisburg, Tschernobyl, Fukushima. Zum

27. November 2016 waren weltweit 450 KKWs in Betrieb (Quelle: <http://www.euronuclear.org/1-information/map-worldwide.htm>). Dies entspricht z. Zt. total 17'132 Betriebsjahren (<https://www.iaea.org/pris/>) bei einer durchschnittlichen Betriebsdauer von etwa 34 Jahren und einer durchschnittlichen Wartezeit zwischen großen Unfällen von 5700 Betriebsjahren. Bei 450 KKWs dürfen wir also alle 13 Jahre wieder mit einem größeren Unfall rechnen. . . ? Die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Unfalls in einem beliebigen Jahr irgendwo auf der Welt beträgt also ca. 8% (oder ca. 10%, was man sich besser merken kann und sich bei der "Messgenauigkeit" nicht von 8% unterscheidet). Noch im Februar 2011 wäre diese Wahrscheinlichkeit wesentlich kleiner gewesen. Wir hantieren hier mit Wahrscheinlichkeiten seltener Ereignisse - und entsprechend großen Unsicherheiten in diesen Werten.

Wie groß ist der Schaden in einem derartigen Unfall? Hier variieren die Schätzungen noch viel stärker. Bei Wikipedia⁵ findet man für Tschernobyl

⁵http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_accidents_and_incidents

die Angaben, es seien 56 Menschen an den direkten Folgen und zwischen 4'000 und 985'000 an Krebs gestorben. Die WHO schätzt ca. 4'000 Tote, der TORCH-Report⁶ zwischen 30'000 und 60'000, eine Greenpeace-Studie soll über 200'000 nennen.

Selbst wenn wir uns auf 'die Anzahl Tote' als Maß für den Schaden einigen könnten, haben wir eine Unsicherheit von einem Faktor 50 bis 250 (. . . aber nicht mehr 50%).

⁶<http://rebecca-harms.de//files/9/2/12C9R25RKE/torch.pdf>

Vergleich mit anderen Risiken

Tote im deutschen Straßenverkehr	< 4000/Jahr	stat. Bundesamt
Tote Raucher in Deutschland	340 pro Tag	Stern, 13.5.2003
Tote wegen Alkohol weltweit	2,5 Millionen/Jahr	WHO
Tote wegen Übergewicht (BMI > 30)	> 170'000/Jahr	NIH, USA
Tote aufgrund Kohlekraftwerke	30'000/Jahr	Greenpeace, USA

Greenpeace spricht davon, dass Kohlekraftwerke die größten Quellen der Quecksilberschmutzung sind (nämlich zu einem Drittel, Quelle: EPA).

Wie sehr beruhen die Zahlen der jeweiligen Studien auf dem Studienziel?