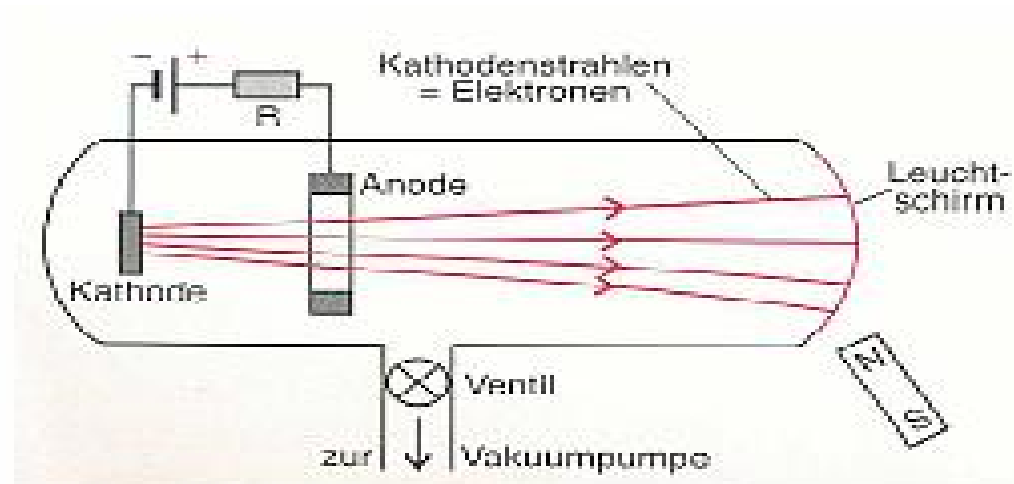


Spezielle Relativitätstheorie

Experimente
der
relativistischen Dynamik

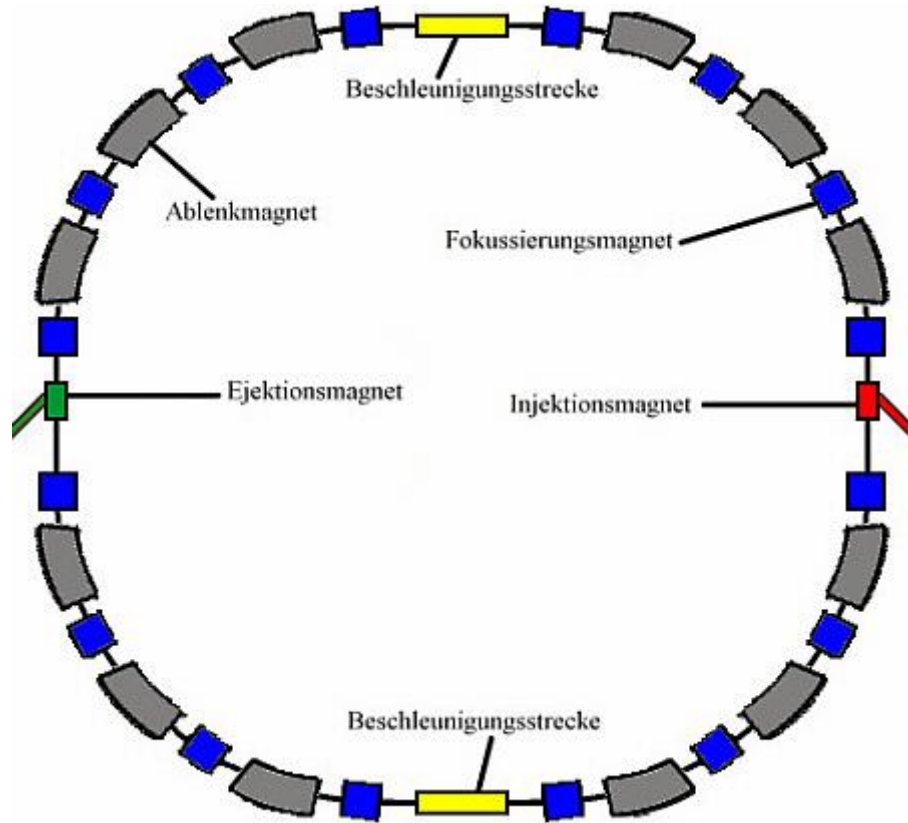


Massenzunahme



- Walter Kaufmann (1871 - 1947) wies 1901 die Zunahme der Elektronenmasse bei wachsender Geschwindigkeit nach (bis $v \approx 0,94 c$).
- Die Ergebnisse wurden unter dem Titel „*Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen*“ 1902 veröffentlicht.
- H.A. Lorentz deutete dieses Ergebnis im Sinne seiner Elektronen-Theorie und kommt aufgrund seiner Hypothese der Längenkontraktion bei Bewegungen gegen den Äther auf eine identische Formel wie Einstein.

Relativistische Masse im Synchrotron



$$v = 0.999999875 \cdot c$$

Feynman berichtet, daß zur Ablenkung der Elektronen im Synchrotron von Caltech ein 2000mal stärkeres Magnetfeld erforderlich ist, als aufgrund der klassischen Physik zu erwarten wäre.

Die Elektronen sind demnach bei der Geschwindigkeit 2000mal schwerer als im Ruhezustand.

Aus der Beziehung der relativistischen Masse läßt sich die Geschwindigkeit berechnen:

$$\frac{m(v)}{m_0} = 2000 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2000}\right)^2}$$



Masse-Energie Äquivalent

- Das Energie-Äquivalent ist auch eine in unserer Erfahrung – Mesokosmos – nicht erfahrbare Tatsache.
- Die Massezunahme beim Wasserkochen ist praktisch nicht wahrnehmbar:
 - um 1 Liter Wasser auf 100° C zu erhöhen, sind 360.000 J an Energie erforderlich;
 - das entspricht einer Massezunahme von $4 \cdot 10^{-12}$ kg, eine Zunahme, die nicht meßbar ist.
- Erst in atomaren Dimensionen macht sich der Effekt bemerkbar:
Zitat [Einstein 1905]:
„Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maße veränderlich ist (z.B. bei den Radiumsalzen) eine Prüfung der Theorie gelingen wird. Wenn die Theorie den Tatsachen entspricht, so überträgt die Strahlung Trägheit zwischen den emittierenden und absorbierenden Körpern.“



Massendefekt und Bindungsenergie

Beispiel Helium ${}^4\text{He}$: besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen

Die Massenäquivalente
der Teilchen sind:
(Quelle: www.codata.org)

$$\text{Proton} : m_p \cdot c^2 = 938,272029 \text{ MeV}$$

$$\text{Neutron} : m_n \cdot c^2 = 939,565\,346 \text{ MeV}$$

$$\text{Helium} : m_\alpha \cdot c^2 = 3727,379\,109 \text{ MeV}$$

Die Summe der Massenäquivalente
der einzelnen Teilchen sind:

$$2 \cdot m_p \cdot c^2 = 1876,544058 \text{ MeV}$$

$$2 \cdot m_n \cdot c^2 = \frac{+1879,130692 \text{ MeV}}{= 3755,674750 \text{ MeV}}$$

Die Differenz der Massenäquivalente
wird frei bei der Vereinigung:

$$- \frac{3727,379109 \text{ MeV}}{= 28,295641 \text{ MeV}}$$

Diese Energie muß aufgewendet werden, um Helium in seine Teile
zu zerlegen: Bindungsenergie



Massenzahl und Ordnungszahl

Massenzahl = Anzahl Protonen + Anzahl Neutronen

Ordnungszahl = Anzahl Protonen

Beispiel Kohlenstoff C:

${}^12_6\text{C}$ besteht aus 6 Protonen und 6 Neutronen, stabil
natürlicher Anteil: 98,9 %

${}^{13}_6\text{C}$ besteht aus 6 Protonen und 7 Neutronen, stabil
natürlicher Anteil: 1,1 %

${}^{14}_6\text{C}$ besteht aus 6 Protonen und 8 Neutronen, instabil
Halbwertszeit 5736 Jahre



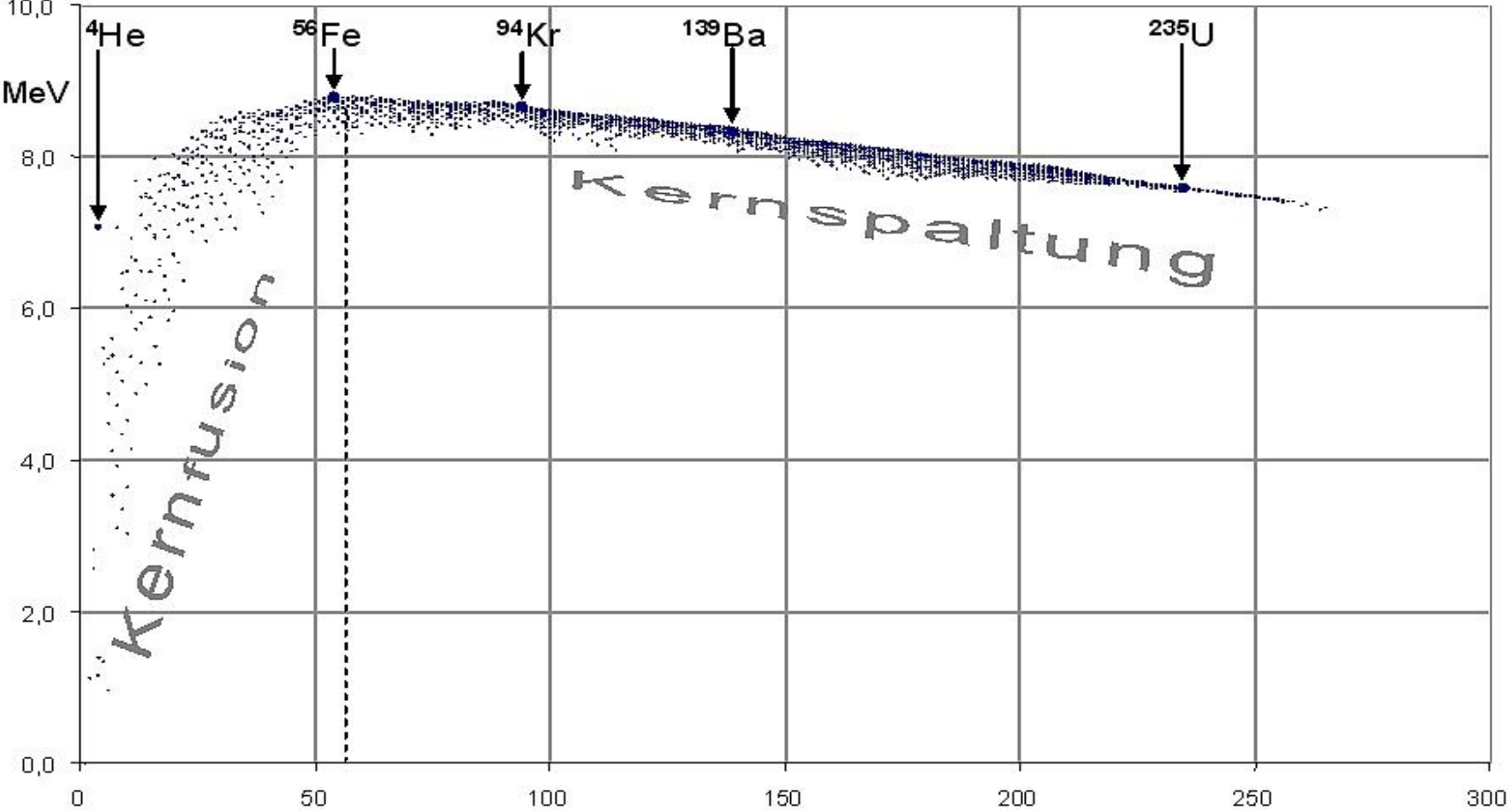
Alle Isotope des Kohlenstoffes

Massenzahl	Ordnungszahl	Isotopname	Kernmasse [MeV]	Bindungsenergie [MeV]	Bindungsenergie pro Kernteilchen
8	6	8C	7.483,980	24,783	3,098
9	6	9C	8.409,291	39,037	4,337
10	6	10C	9.327,573	60,320	6,032
11	6	11C	10.254,018	73,440	6,676
12	6	12C	11.174,862	92,162	7,680
13	6	13C	12.109,481	97,108	7,470
14	6	14C	13.040,870	105,285	7,520
15	6	15C	13.979,217	106,503	7,100
16	6	16C	14.914,532	110,753	6,922
17	6	17C	15.853,371	111,479	6,558
18	6	18C	16.788,756	115,660	6,426
19	6	19C	17.727,740	116,241	6,118
20	6	20C	18.664,374	119,172	5,959

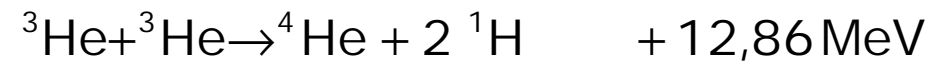
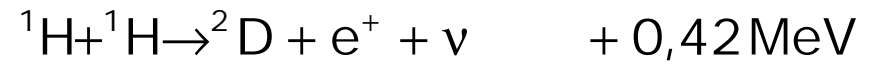
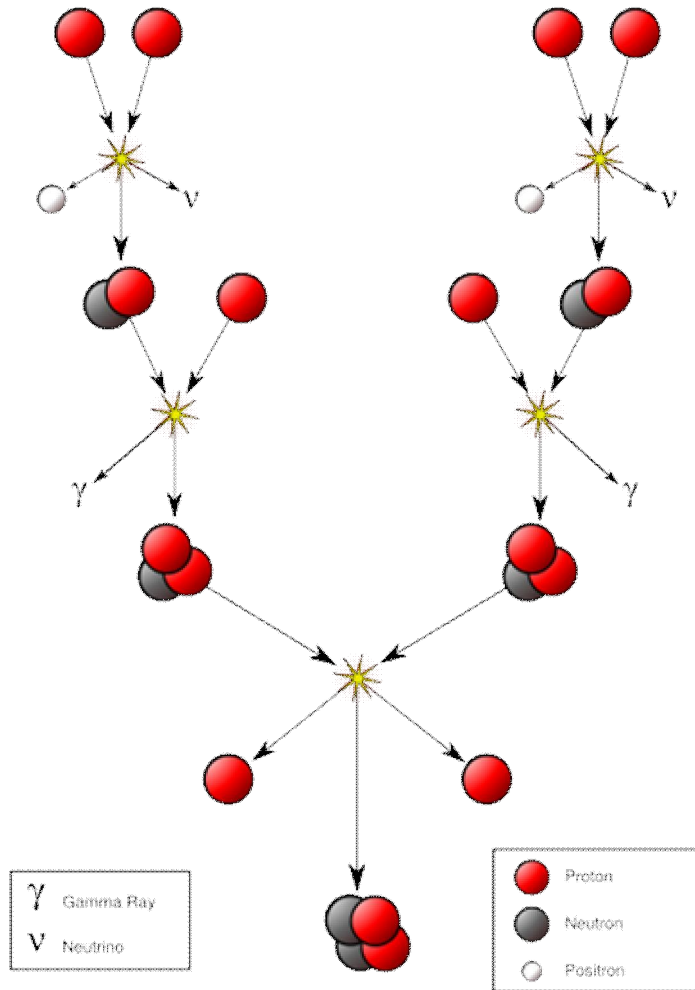
aus: http://www.nndc.bnl.gov/amdc/web/nubase_en.html



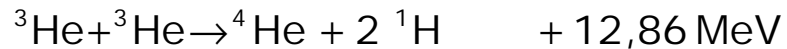
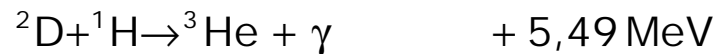
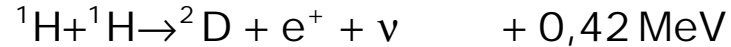
Bindungsenergie pro Kernteilchen



Kernfusion – p-p-Kette



Energieüberschuß der p-p-Kette



Zur Berechnung des Energieüberschusses:

1. Die ersten beiden Reaktionen müssen doppelt gezählt werden, da zwei ${}^3\text{He}$ -Atome benötigt werden, um ein ${}^4\text{He}$ -Atom zu bilden.
2. Das Positron e^+ reagiert mit einem Elektron der Umgebung und zustrahlt in 2 Gamma-Quanten von 1,022 MeV.
3. Die kinetische Energie von 0,26 MeV des Neutrinos verschwindet ungehindert aus dem Stern.

Energieüberschuß:

$$2 \cdot (0,42 \text{ MeV} + 1,022 \text{ MeV} + 5,49 \text{ MeV} - 0,26 \text{ MeV}) + 12,86 \text{ MeV} = 26,204 \text{ MeV}$$

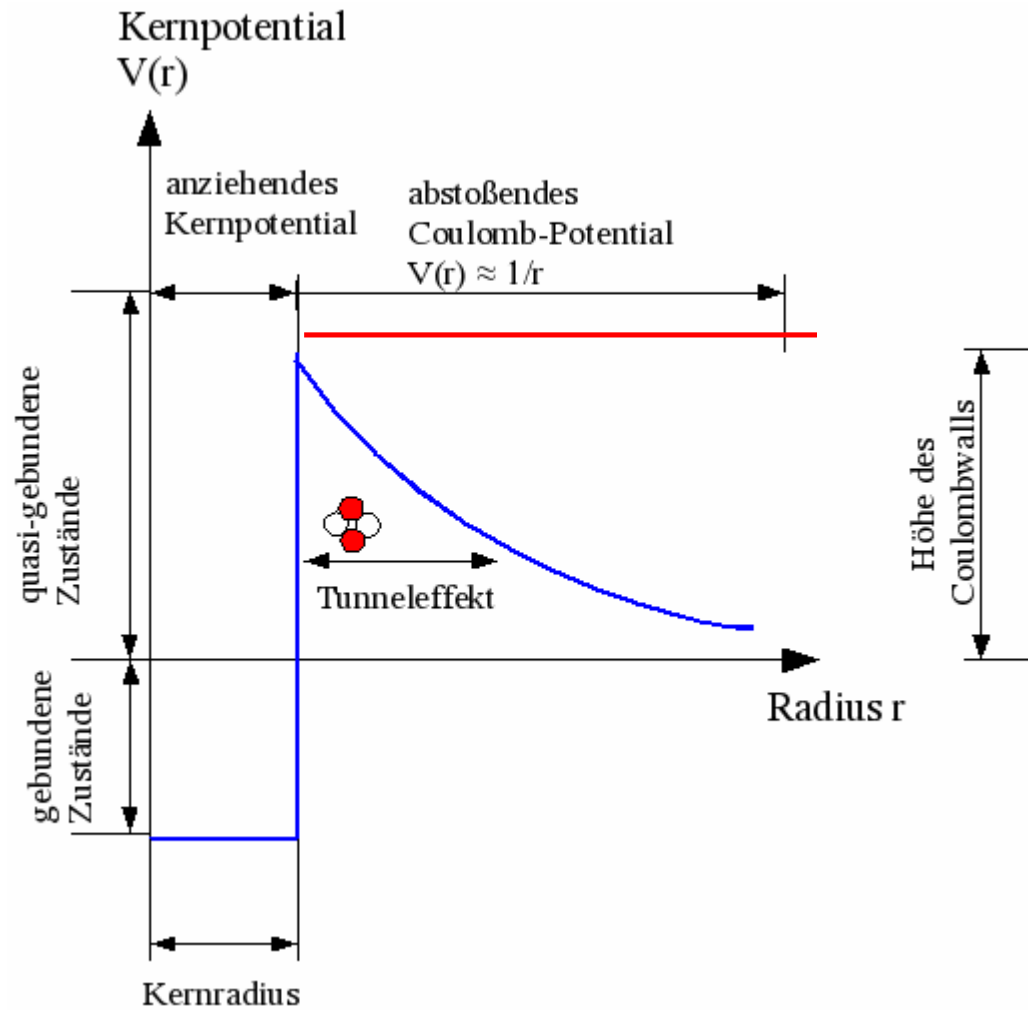


Wasserstoff-Fusion in der Sonne

- In der Sonne dauert es im Schnitt $14 \cdot 10^9$ Jahre, bis sich zwei Protonen für die erste Reaktion treffen.
- Nach durchschnittlich 10^6 Jahren fusionieren zwei ^3He -Kerne zu ^4He (letzte Reaktion).
- Temperatur muß zwischen 10 und 14 Millionen Kelvin liegen.
- Die bei der Reaktion der p-p-Kette frei werdende Energie von 26,204 MeV entspricht $\approx 4,2 \cdot 10^{-12}$ J. Ein scheinbar sehr kleiner Wert.
- Allerdings werden pro Sekunde im Zentrum der Sonne 564 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 560 Millionen Tonnen Helium fusioniert, wobei eine Gesamtleistung von etwa $3,7 \cdot 10^{26}$ W = 370 Quadrillionen Watt freigesetzt und letztendlich abgestrahlt wird.



Kernfusion



Quelle: Wikipedia

Für die Fusion – Verschmelzung der Protonen – muß der Potentialwall überwunden werden.

D.h. die (Bewegungs-) Energie der Teilchen muß so groß sein, daß sie die gegenseitige Abstoßung überwinden können.

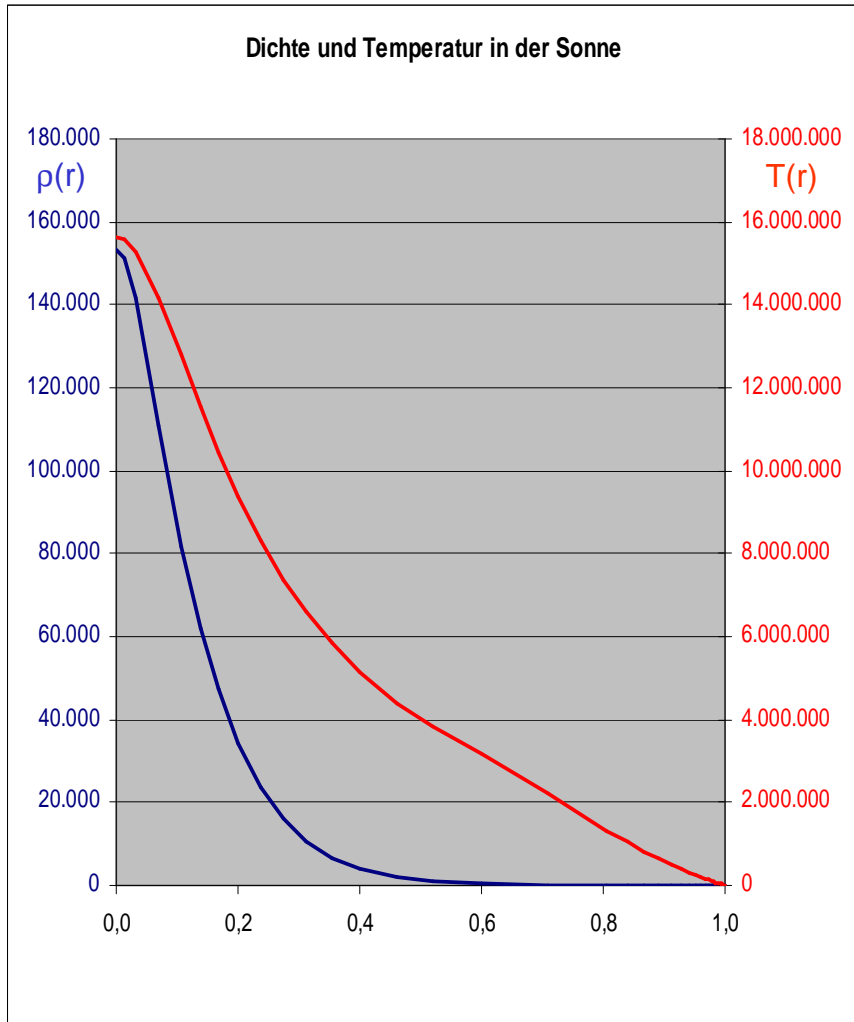
Je höher die Temperatur, um so größer die Energie der Teilchen.

Je höher die Ordnungszahl der beteiligten Teilchen, um so höher der Potentialwall.

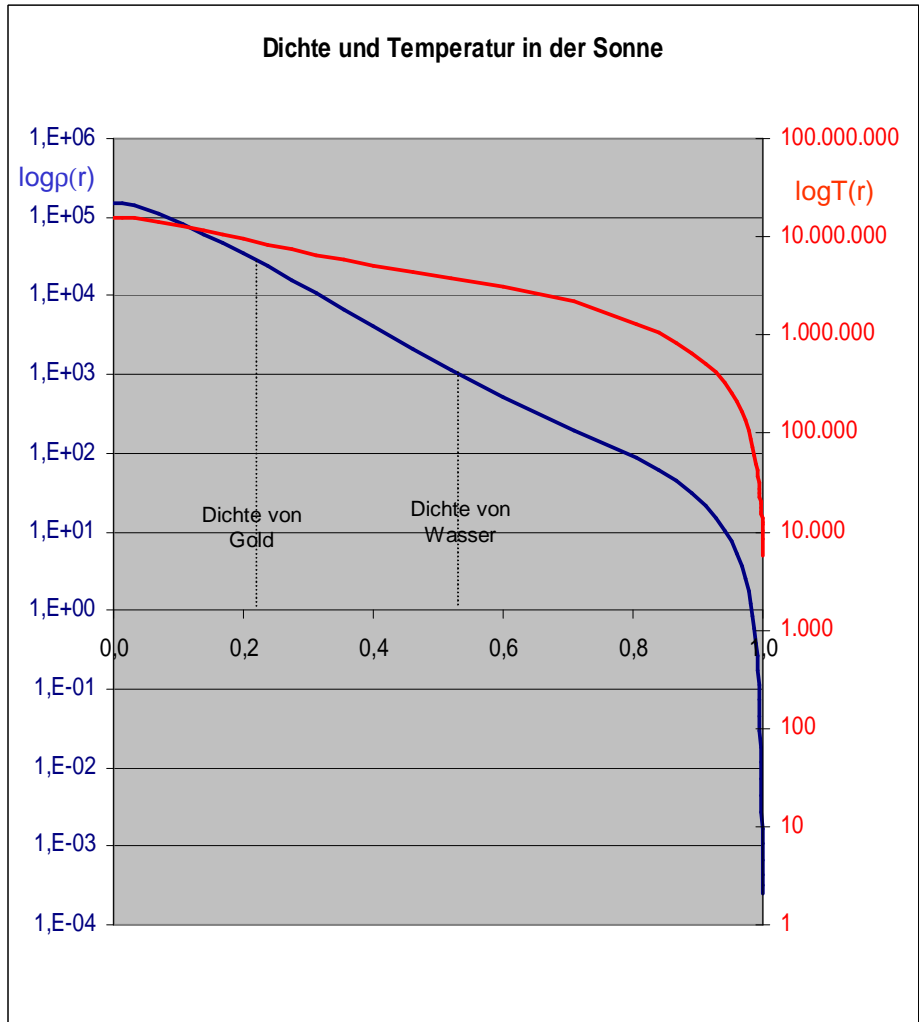
Bei etwas niedriger Energie bewirkt der Tunneleffekt, daß trotzdem die Teilchen fusionieren können.



Sonnenmodell



Dichte $\rho(r)$ in kg/cbm



Dichte der Sonnenatmosphäre (Sonnenrand) ist $2 \cdot 10^{-4}$ der Dichte der Erdatmosphäre in Meereshöhe



Massenverlust der Sonne

- Wenn dieser Energiestrom von $3,7 \cdot 10^{26}$ W pro Sekunde abgestrahlt wird, kann man daraus die Masse berechnen, die die Sonne pro Sekunde allein dadurch verliert:

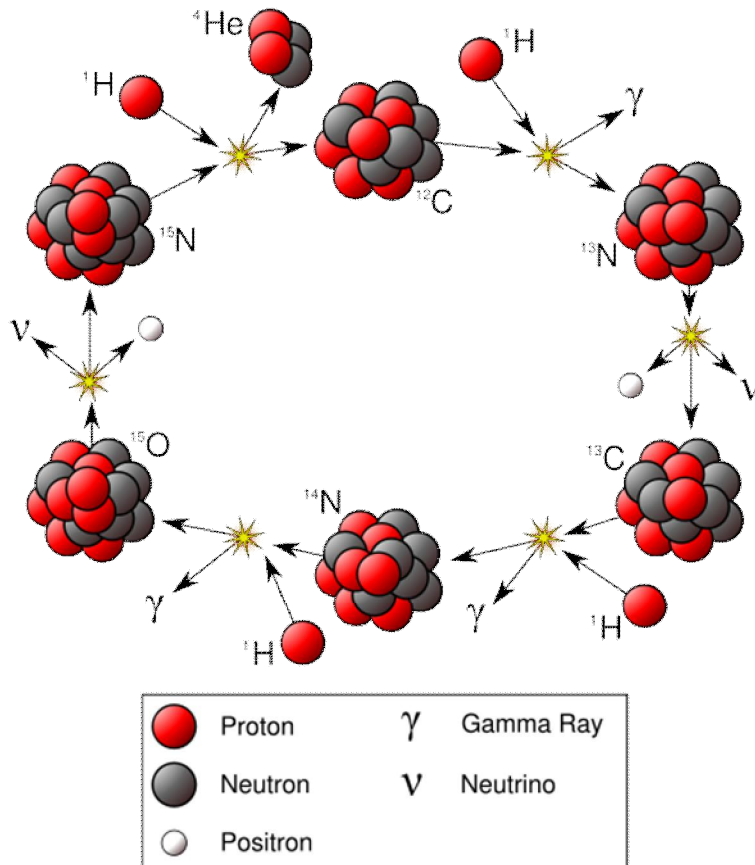
$$m = E/c^2 = 3,7 \cdot 10^{26} [\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}] / (3 \cdot 10^8 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}])^2 \approx 4 \cdot 10^9 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Ein Masseverlust von ca. 4 Millionen Tonnen pro Sekunde!

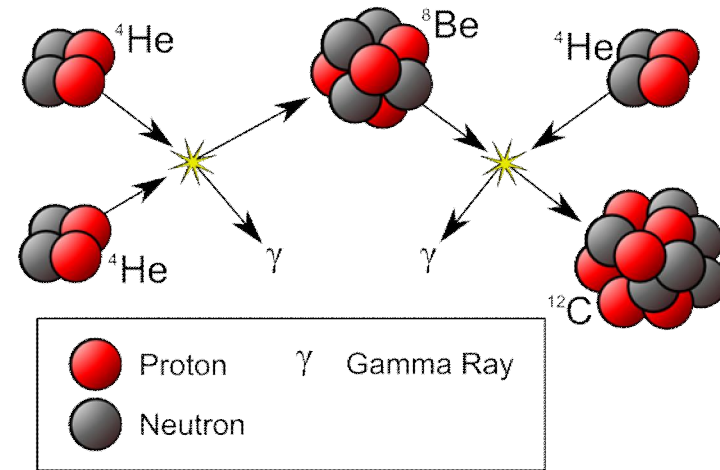
- Ein Viertel dieser Masse – ca. 1 Million Tonnen – verliert sie pro Sekunde durch den Sonnenwind (Partikel).
- Die Lebensdauer im gegenwärtigen Zustand (als Hauptreihen-Stern) wird auf ca. 11 Milliarden Jahre geschätzt, also von heute an noch etwa 5 bis 6 Milliarden Jahre.



Fusionsreaktionen bei höheren Temperaturen



Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus) ab 14 Millionen Kelvin; ab 30 Millionen Kelvin vorherrschend.



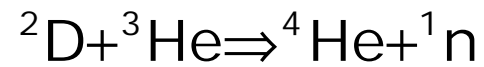
Salpeter-Prozess (Helium-Brennen) ab 100 Millionen Kelvin.

Erzeugungsrate ist proportional T^{30}

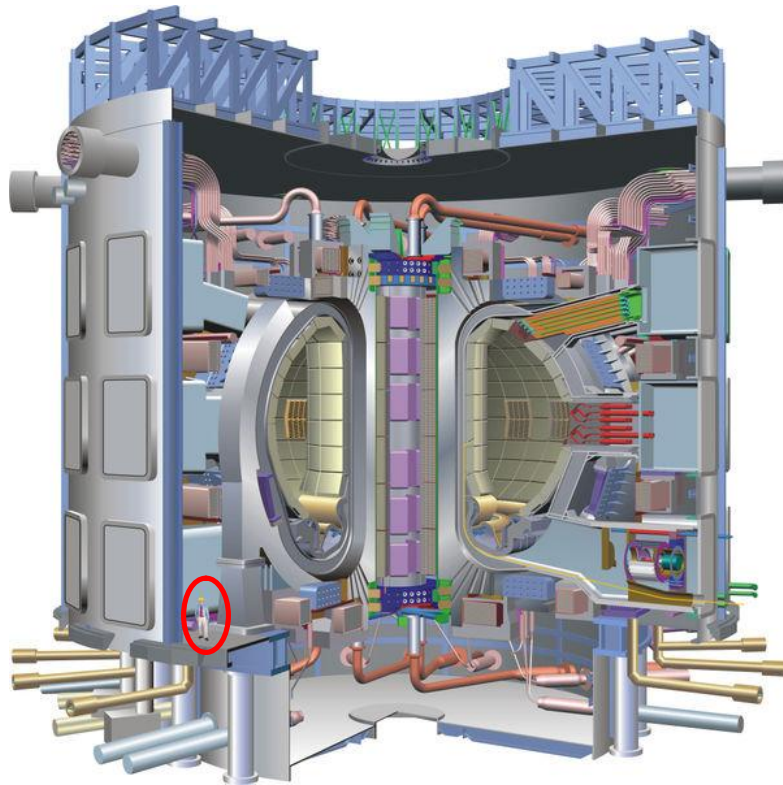
Elemente höherer Ordnungszahl als 12 werden im Zentrum massereicher Sterne bei noch höheren Temperaturen erzeugt.



Experimentelle Fusionsreaktoren



Die Bildung von 1 kg Helium mittels dieser Reaktion liefert eine Energie von rd. 115.000.000 kWh (Deutscher Strombedarf für ca. 2 Stunden).



ITER



Wendelstein 7-X



Kernspaltung – Kernfission

Bei der *spontanen Kernspaltung* einiger Atomarten zerfällt der Atomkern ohne äußere Einwirkung – ein radioaktiver Zerfall, vergleichbar mit dem radioaktiven Zerfall.

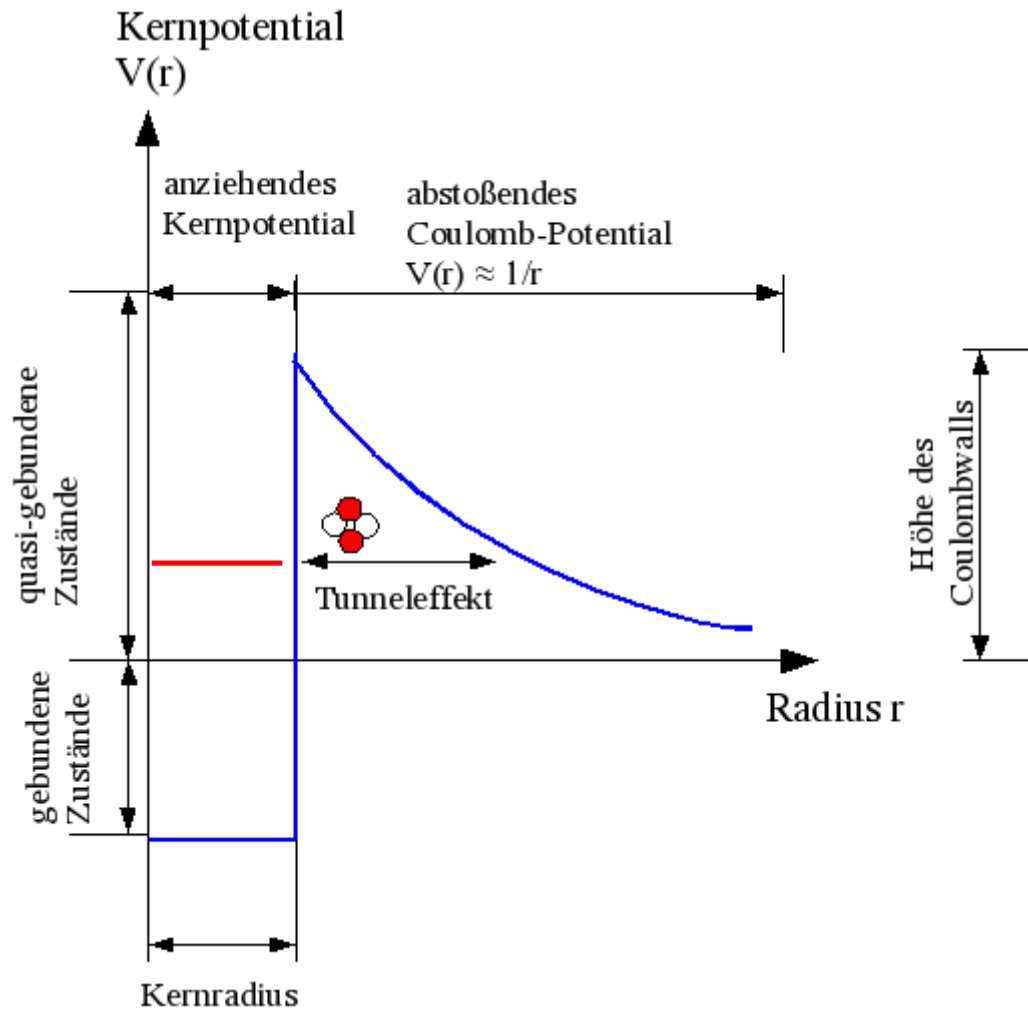


Bei der *induzierten Spaltung* wird ein stoßendes Teilchen – meist ein Neutron – von dem getroffenen Atom absorbiert. Der Kern gewinnt dadurch Bindungsenergie, geht in einen angeregten Zustand und spaltet sich normalerweise in zwei Bruchstücke.

Die induzierte Kernspaltung wurde am 17. Dezember 1938 von Otto Hahn und Fritz Strassmann am Beispiel Uran entdeckt.



Kernspaltung



Das stoßende Teilchen (Neutron) regt den Kern an, so daß er in den quasi-gebundenen Zustand übergeht.

Durch den Tunneleffekt können die Spaltprodukte den Coulomb-Wall durchdringen.

Die gegenseitige Abstoßung der Spaltprodukte und die Energie der Massendifferenz treibt sie mit hoher Geschwindigkeit auseinander.



Versuchsaufbau zur Kernspaltung



Entdecker der Kernspaltung



Fritz Straßmann

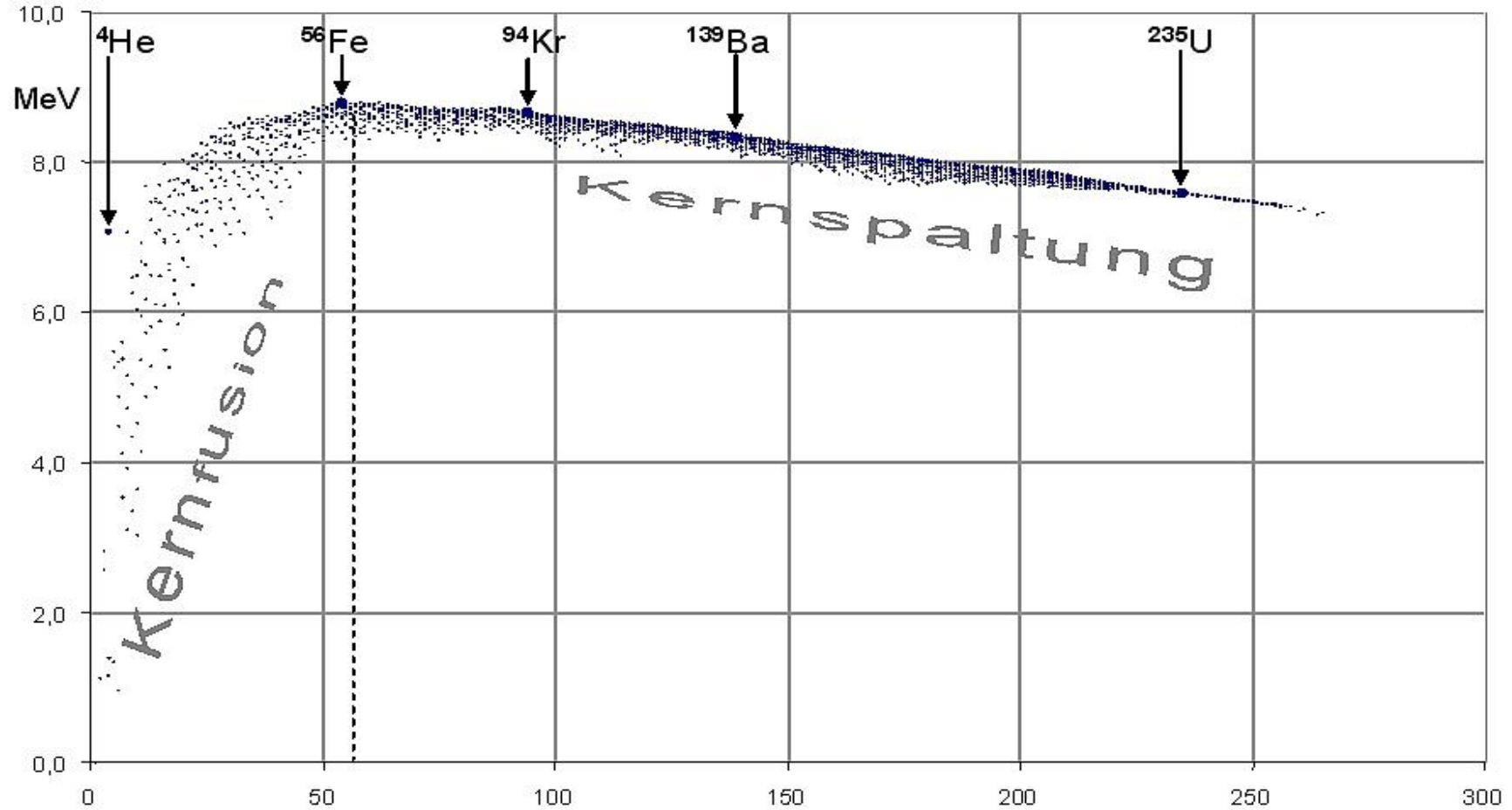
Lise Meitner

Otto Hahn

Otto Hahn und Fritz Straßmann wiesen die Spaltung von Uran chemisch nach;
Lise Meitner lieferte die physikalische Erklärung.



Bindungsenergie pro Kernteilchen



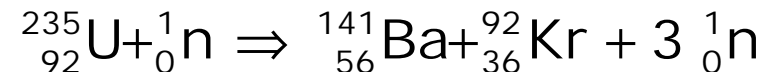
Kernspaltung

- Schwere Elemente mit Ordnungszahlen > 60 können entweder spontan zerfallen oder gespalten werden.
- Dabei sind die Spaltprodukte in ihrer Summe leichter als das Ausgangselement.
- Die dabei anfallende Massendifferenz wird entsprechend der Beziehung $E = m \cdot c^2$ in Energie umgesetzt.
- Unkontrolliert werden in Atombomben verheerende Energien freigesetzt.
- Kontrolliert kann dieser Vorgang zur Energiegewinnung in Atomreaktoren dienen,



Massenäquivalente bei Kernspaltung

Das wichtigste Beispiel einer Kernspaltung ist die des Urans. Als Spaltprodukte entstehen Barium und Krypton; zusätzlich werden dabei drei Neutronen frei.



Die Massenäquivalente der beiden Seiten der Reaktionsgleichung sind:

$${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \quad c \quad 218.895,002 \text{ MeV} + 939,565 \text{ MeV} = 219.834,567 \text{ MeV}$$

$${}_{56}^{141}\text{Ba} + {}_{36}^{92}\text{Kr} + 3 {}_0^1\text{n} \quad c \quad 131.232,314 \text{ MeV} + 85.610,268 \text{ MeV} + 2.818,695 \text{ MeV}$$

$$c \quad 219.661,277 \text{ MeV}$$

Die Massenäquivalente der Ausgangsstoffe ist auch hier größer als die Summe derer der Endprodukte.

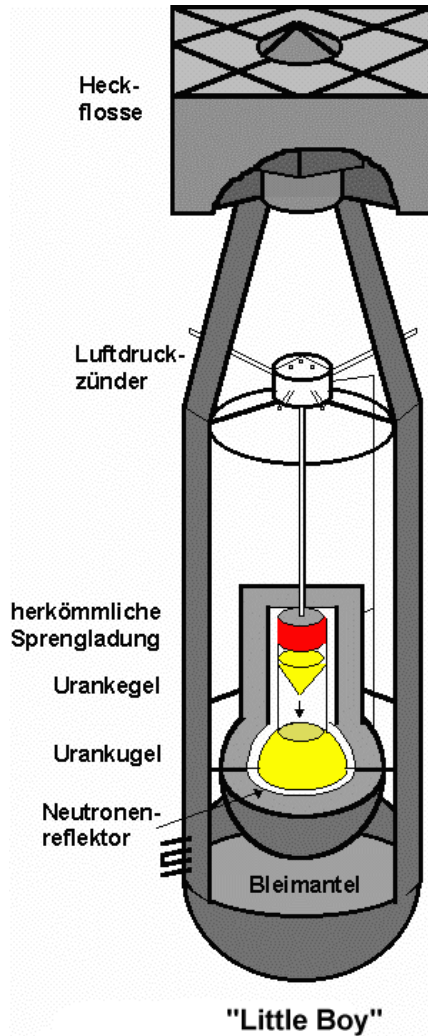


Kernspaltung von Uran-235

- Bei der Spaltung eines Atoms Uran-235 wird eine Energie von ≈ 173 MeV freigesetzt, die hauptsächlich als kinetische Energie der Spaltprodukte in Erscheinung tritt.
- Zur Spaltung des Atoms wird ein freies Neutron benötigt, nach der Spaltung stehen drei freie Neutronen für weitere Kernspaltungen zur Verfügung.
- Die Neutronen haben eine große Energie und können in der Substanz einen Weg von ca. 10 cm zurücklegen.
- Ist die Abmessung des Blocks kleiner als ca. 8 cm, so verlassen ihn die meisten Neutronen; es liegt eine „unterkritische Masse“ vor (≈ 41 kg).
- Bei einer „kritischen Masse“ ist die Menge und Geometrie des Uranblocks so beschaffen, daß eine Kettenreaktion eintritt.
- Innerhalb von 10^{-14} sec sind dann 99 % der Neutronen freigesetzt.



Prinzip einer Atombombe

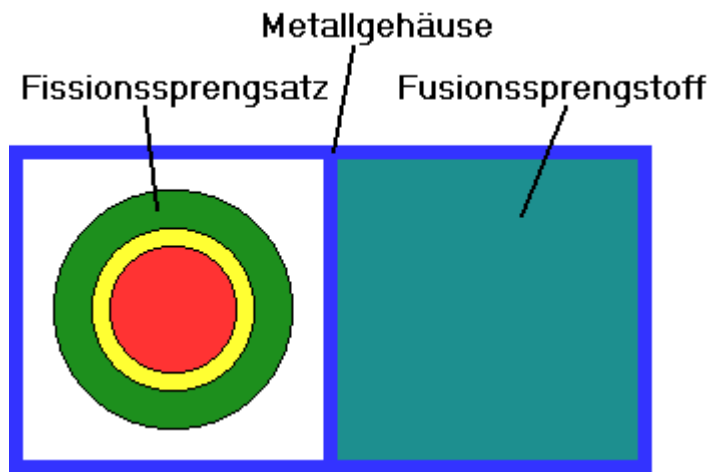


- Material für Atombomben ist ^{235}U Uran-235 (Anteil in Uranerz: 0,72 %).
- Die kritische Masse wird aufgeteilt in eine Kugel und einen hinein passenden Kegel.
- Zur Zündung der Atombombe wird der Uran-Kegel mit einer herkömmlichen Sprengladung in die Uran-Kugel geschossen.
- Durch immer vorhandene freie Neutronen kommt dann augenblicklich die Kettenreaktion zustande.



Quelle: Wikipedia

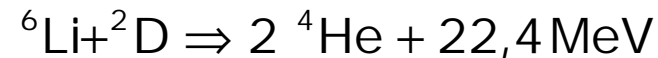
Prinzip einer Wasserstoffbombe



Zur Steigerung der Explosionskraft wird Kernspaltung und Kernfusion in der Wasserstoffbombe kombiniert.

Eine „Atombombe“ dient als Zünder, um die für die Kernfusion erforderliche hohe Temperatur (>10 Millionen Grad) zu erzeugen.

Material für die Fusion ist Lithium und Deuterium in Form von Lithiumdeuterid:



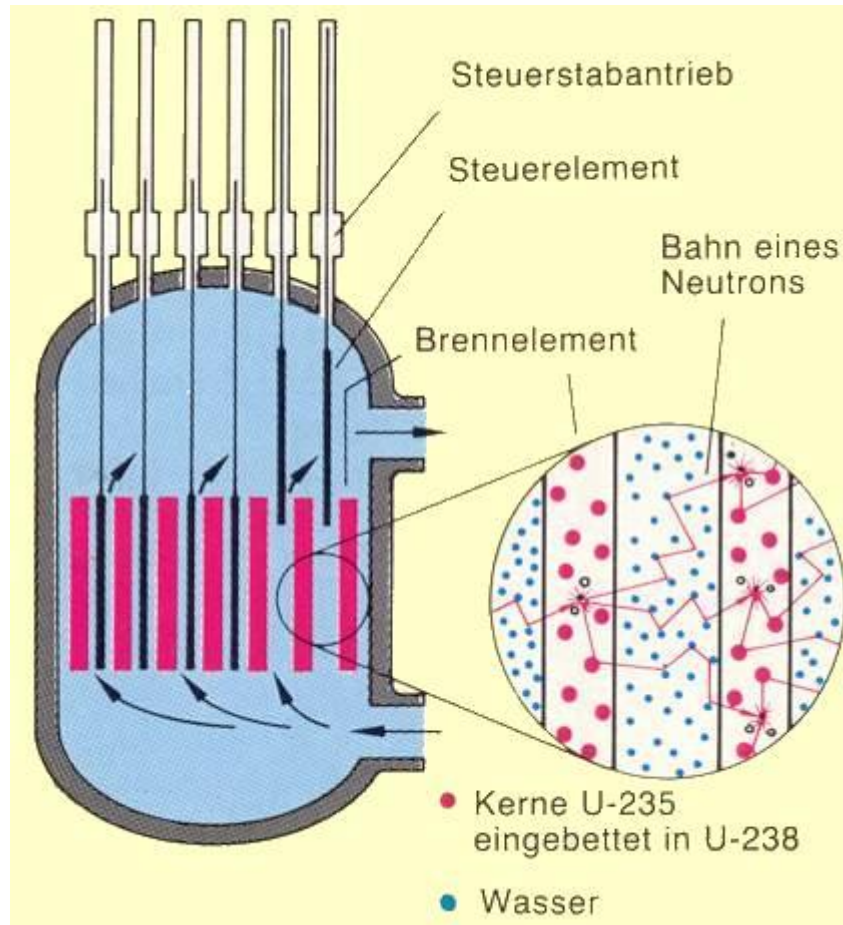
Pro MT (Megatonne) Sprengkraft sind ca. 36 kg Lithiumdeuterid nötig.

Bändigung der Kettenreaktion

- Die Kettenreaktion kann selbständig eintreten, da immer genügend freie Neutronen vorhanden sind, sei es durch spontanen Zerfall eines Uran-Kerns oder erzeugt durch die Höhenstrahlung.
- Die Kettenreaktion kann mit sog. Moderatoren „gebremst“ werden. Sie bremsen die schnellen Neutronen der Kettenreaktion so weit ab, daß sie zwar in Gang bleibt, aber nicht außer Kontrolle gerät.
- In Kernkraftwerken werden vorwiegend Wasser (H_2O), schweres Wasser (D_2O) oder Kohlenstoff als Moderatoren eingesetzt.



Prinzip der Kernreaktoren



- In den Brennelementen befindet sich das Spaltmaterial Uran-235.
- Das Wasser dient als Bremse für die schnellen Neutronen, da langsame Neutronen leichter eine Kernspaltung erzeugen.
- Zur Verhinderung unkontrollierter Reaktionen werden Moderatoren an Steuerelementen zwischen das Spaltmaterial gefahren.
- Das Wasser des Reaktors heizt einen Sekundär-Wasserkreislauf zur Dampferzeugung für die Turbinen zur Stromerzeugung.