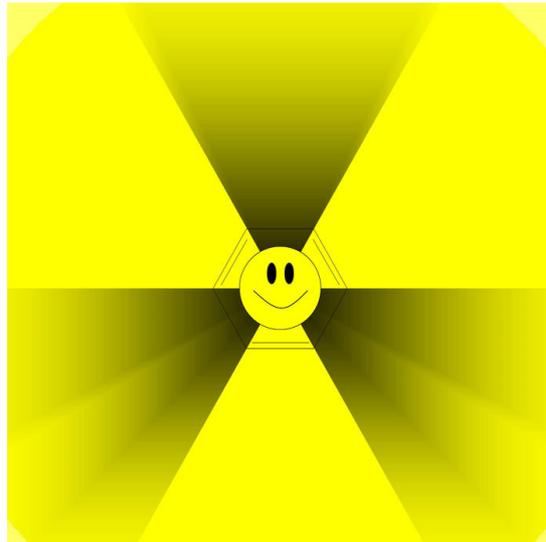




# Kernchemie

Das Lernziel dieser Unterrichtseinheit beinhaltet folgende Punkte:

Elementarteilchen, Was ist Radioaktivität überhaupt, wie sind die Elemente entstanden, alpha- beta- und gamma-Zerfall, Halbwertszeit, C-14-Altersbestimmung, Kernspaltung, Kernfusion, Tschernobyl und vieles mehr ...



Many thanks for the download. More  
documents and much more on  
[www.rainer.ch](http://www.rainer.ch)

kind regards, Dr. R. Steiger

**Inhaltsverzeichnis**

Kernchemie	1
<b>9.1 Kernbausteine</b>	<b>1</b>
<b>9.2 Radioaktivität = Ionisierende Strahlung</b>	<b>2</b>
9.2.1 Die Entdeckung der Radioaktivität	2
<b>9.3 Strahlenarten</b>	<b>2</b>
9.3.1 alpha-Strahlung	3
9.3.2 Beta-Zerfall	3
9.3.3 Gamma-Zerfall	3
9.3.4 Zerfallsreihe des $^{238}\text{U}$ :	4
9.3.5 Stabilität von Atomkernen	4
<b>9.4 Physikalische Eigenschaften der Radioaktivität</b>	<b>5</b>
9.4.1 Eindringtiefe	8
9.4.2 Zeitdauer	8
9.4.3 Grössen und Masseinheiten	8
<b>9.5 Halbwertszeit <math>T_{1/2}</math></b>	<b>5</b>
<b>9.6 Die Radiokarbon- oder <math>^{14}\text{C}</math>-Methode</b>	<b>7</b>
9.6.1 Produktion und Verteilung von $^{14}\text{C}$	7
<b>9.7 Quellen von Radioaktivität</b>	<b>9</b>
<b>9.8 Biologische Wirkungen in einer Zelle:</b>	<b>10</b>
9.8.1 Direkte Wirkung	10
9.8.2 Indirekte Wirkung	10
<b>9.9 Die Entdeckung der Kernspaltung</b>	<b>11</b>
<b>9.10 Woher kommt die Energie: Massendefekt und Bindungsenergie</b>	<b>12</b>
<b>9.11 Kettenreaktion</b>	<b>13</b>
<b>9.12 Kontrollierte Kernspaltung</b>	<b>14</b>
<b>9.13 Kernkraftwerktypen</b>	<b>16</b>
<b>9.14 Atombombe</b>	<b>17</b>
<b>9.15 Kernfusionsreaktoren</b>	<b>18</b>
<b>9.16 Die Entstehung der Elemente</b>	<b>19</b>
<b>9.17 Die Häufigkeiten im Sonnensystem</b>	<b>21</b>

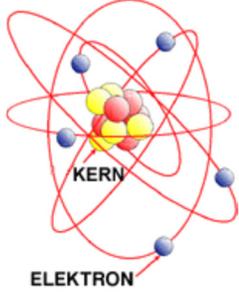


## 9.1 Kernbausteine

Repetition:

Der Kern jedes Atoms enthält eine unterschiedliche Anzahl folgender Bausteine:

Teilchen	Symbol	Masse [kg]	Ladung
Proton	p	$1.673 \cdot 10^{-27}$	positiv
Neutron	n	$1.675 \cdot 10^{-27}$	neutral
Elektron	$e^-$	$9.11 \cdot 10^{-31}$	negativ



Proton und Neutron haben ungefähr die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt nur  $1/1836$  der Masse des Protons, so dass man diesen Betrag bei der Betrachtung von Atommassen vernachlässigen kann. Die gesamte Masse des Atoms ist also im Kern konzentriert.

Als **Nukleonen** (lat. nucleus „der Kern“) bezeichnet man die Atomkernbausteine, also jene Teilchen, aus denen Atomkerne bestehen, nämlich Protonen und Neutronen.

Ein **Nuklid** ist eine Atomsorte, die durch ihre Massenzahl, Ordnungszahl und den Energiezustand des Atomkerns gekennzeichnet ist. Dadurch ist auch die Anzahl der Protonen und Neutronen im Kern festgelegt, zum Beispiel  $^{13}\text{C}$ .

Die verschiedenen Nuklide ein und desselben chemischen Elements, mit gleicher Zahl von Protonen aber unterschiedlichen Zahlen von Neutronen, werden als **Isotope** dieses Elements bezeichnet



Übersicht der an Kernreaktionen beteiligten Teilchen:

Teilchen	Neutron	Proton	Elektron	$\alpha$ -Teilchen	$\beta$ -Teilchen	Positron
Symbol	$^1_0n$	$^1_1p$ oder $^1_1H$	$^0_{-1}e$	$^4_2He$ oder $^4_2\alpha$	$^0_{-1}e$ oder $^0_{-1}\beta$	$^0_1e$ oder $^0_1\beta$
Ladung	0	+1	-1	+2	-1	+1



## 9.2 Radioaktivität = Ionisierende Strahlung

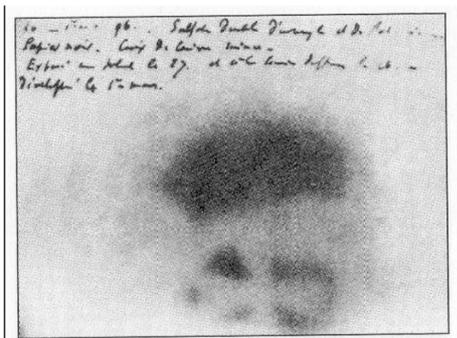
### Einleitung

Radioaktivität ist in aller Munde. Doch was versteht man darunter? Das Duden Fremdwörterbuch schreibt dazu:

Was ist denn ionisierende Strahlung?

Teilchen- oder Photonen- (d. h. Elektromagnetische Wellen-)Strahlung wird als ionisierende Strahlung bezeichnet, wenn sie in der Lage ist, Atome oder Moleküle zu ionisieren, d. h. **aus diesen Elektronen zu entfernen**.

### 9.2.1 Die Entdeckung der Radioaktivität



Becquerel entdeckte 1896, dass Uransalze auch bei vollkommener Dunkelheit eine Photoplatte durch seine lichtdichte Verpackung hindurch zu schwärzen vermochten. Becquerel schloss, dass die Schwärzung nur durch eine vom Uransalz stammende Strahlung verursacht werden konnte. Er nannte diese Strahlung dann auch Uranstrahlung



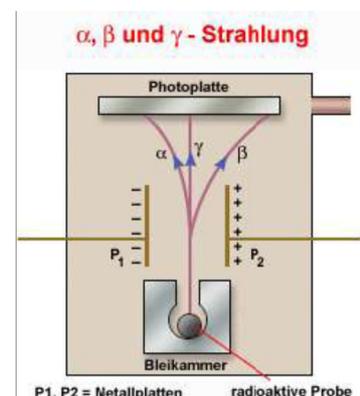
Kurz darauf fand das Ehepaar Curie, dass weitere Minerale zum Teil noch wesentlich stärker strahlten. Alle diese Materialien brauchten nicht zuerst zum Strahlen angeregt zu werden. Sie strahlten spontan und selbständig. Pierre und Marie Curie prägten für dieses aktive Strahlen den Begriff Radioaktivität. Heute kennt man rund 1500 verschiedene Nuklide. Lediglich 249 davon sind stabil (nicht radioaktiv). Der Rest sind instabile Radionuklide (radioaktive Nuklide). Diese erstrecken sich über alle Elemente. D. h. es gibt kein Element, das nicht mindestens ein radioaktives Isotop besäße. Erkenntnis:



Die Strahlung wird nicht aus der Atomhülle emittiert, die Strahlung muss aus dem Kern stammen.

### 9.3 Strahlenarten

Mit dem Experiment rechts kann man Radioaktivität nachweisen. Die Strahlung radioaktiver Proben wird durch die geladenen Metallplatten unterschiedlich abgelenkt und schwärzt eine Photoplatte an unterschiedlichen Stellen. Was kann aus der Ablenkung der ausgesagt werden?

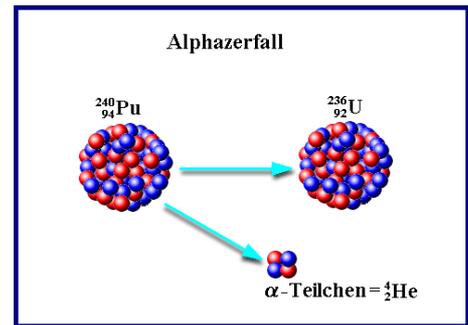




### 9.3.1 $\alpha$ -Strahlung

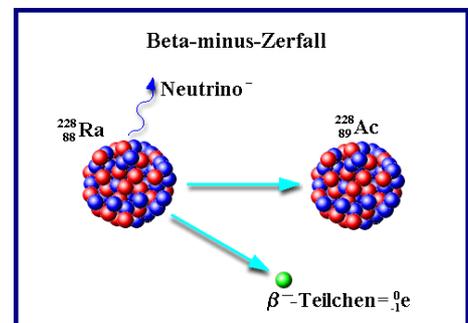
Beim Alphazerfall wird ein zweifach positiv geladenes Heliumion (ein Heliumkern) aus dem Atomkern emittiert (ausgesandt). Das heisst, dass sich die Kernmasse um zwei Protonen und um zwei Neutronen verringert.

Beispiele:

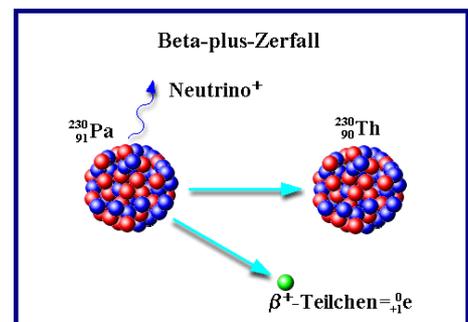


### 9.3.2 Beta-Zerfall

Beim **Beta-Minus-Zerfall** zerfällt ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Das Elektron und das Antineutrino werden emittiert. Das ionisierende Teilchen ist das Elektron. Die Nukleonenzahl bleibt gleich und die Kernladungszahl erhöht sich um eins.



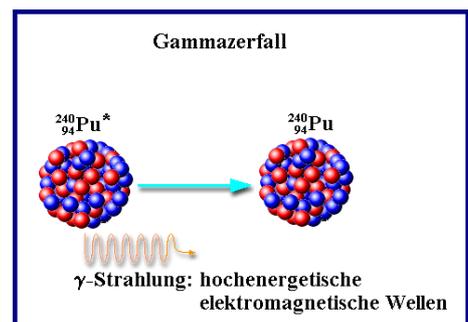
Beim **Beta-Plus-Zerfall** zerfällt ein Proton in ein Neutron, ein Positron (Antiteilchen des Elektrons) und ein Neutrino. Das Positron und das Neutrino werden emittiert. Das ionisierende Teilchen ist das Positron.



### 9.3.3 Gamma-Zerfall

Beim Gammazerfall werden hochenergetische elektromagnetische Wellen aus dem Atomkern emittiert. Diese Wellen sind Photonen, die eine viel höhere Frequenz und kürzere Wellenlänge als Licht haben. Ein Gammazerfall erfolgt dann, wenn zuvor ein Alpha- oder Betazerfall stattgefunden hat und der Kern sich in einem höheren Energiezustand befindet. Um sich vor Gammastrahlung schützen zu können braucht man mehrere Zentimeter dickes Blei.

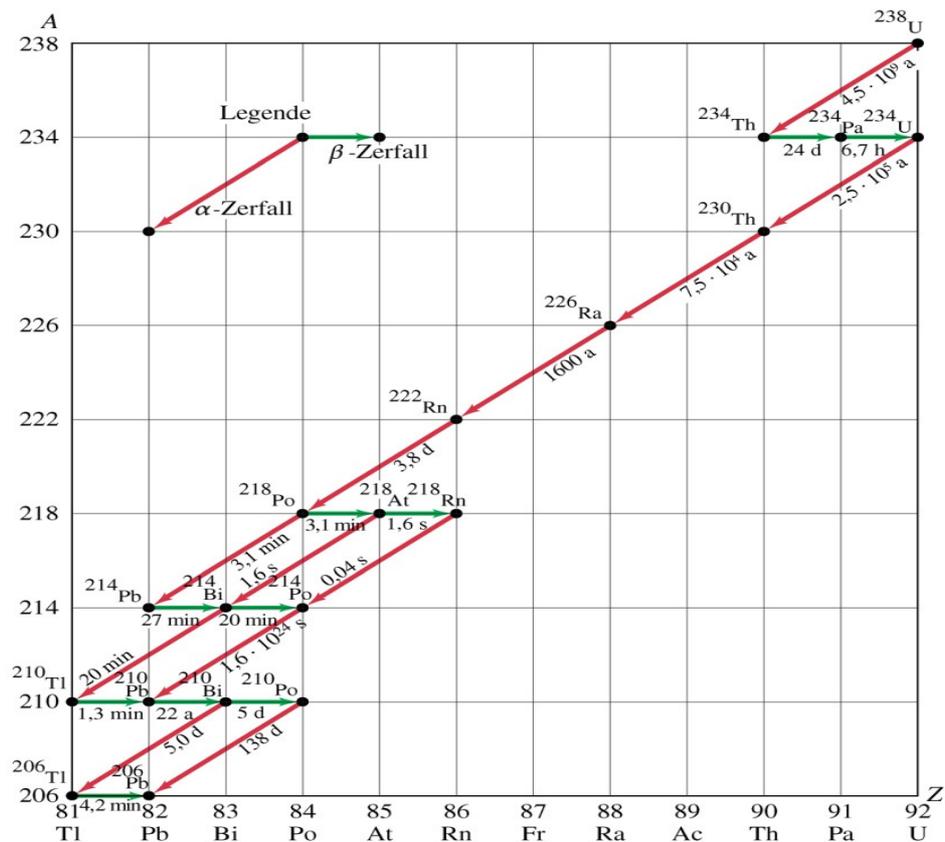
Es bleiben Kernladungszahl und Massenzahl unverändert.





### 9.3.4 Zerfallsreihe des $^{238}\text{U}$ :

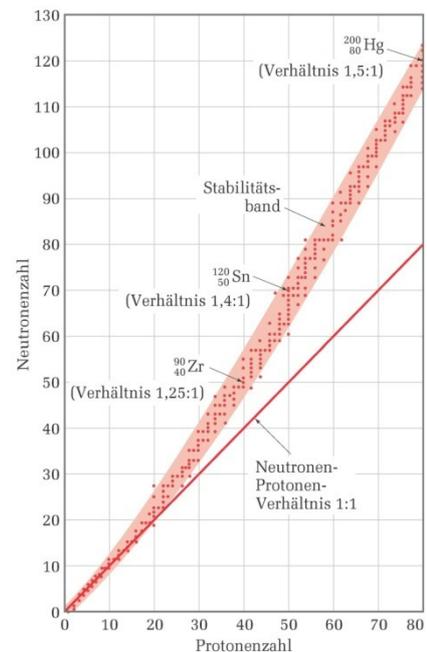
Die Kerne werden in dieser Reihe durch Punkte mit den Koordinaten  $A$  und  $Z$  gekennzeichnet. Die Halbwertszeiten (siehe Kapitel später) sind in Sekunden (s), Minuten (min), Stunden (h), Tagen (d) und Jahren (a) angegeben. Beachte, dass ein horizontaler Pfeil einen  $\beta$ -Zerfall kennzeichnet ( $A$  ändert sich nicht), während eine Diagonale zu einem  $\alpha$ -Zerfall gehört ( $A$  ändert sich um 4,  $Z$  ändert sich um 2).



### 9.3.5 Stabilität von Atomkernen

Nebenstehende Abbildung zeigt die Zahl der Neutronen gegen die Zahl der Protonen für natürlich vorkommende, nicht radioaktive Atomkerne. Die Punkte zeigen die stabilen Kombinationen von Protonen und Neutronen und bilden zusammen eine **Zone der Stabilität**. Atomkerne mit Zusammensetzungen ausserhalb dieser Zone erfahren radioaktive Umwandlungen, die zu Kernen führen, die in oder näher bei der Zone liegen.

Stabile Kerne von leichteren Atomen enthalten Neutronen und Protonen etwa im Verhältnis 1:1. Die schwereren Kerne enthalten mehr Neutronen als Protonen. Je mehr Protonen vorhanden sind, desto grösser ist der notwendige Überschuss an Neutronen, um die abstoßenden Kräfte zwischen den Protonen zu überwinden. Gegen Ende der Stabilitätszone ist das Verhältnis von Neutronen und Protonen etwa 1,5. Der grösste stabile Atomkern ist der von  $^{209}\text{Bi}$ . Grössere Kerne sind bekannt, aber alle sind radioaktiv.



#### Definition radioaktiver Zerfall:

Beim radioaktiven Zerfall wandeln sich Kerne, die ausserhalb der Zone stabiler Nuklide liegen, freiwillig bzw. spontan durch Aussenden einer radioaktiven Strahlung in einen stabileren Kern mit niedrigerem Energieinhalt um.

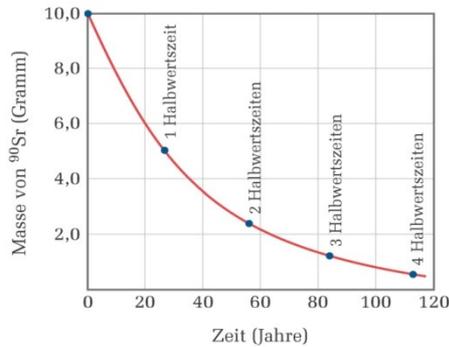


## 9.4 Physikalische Eigenschaften der Radioaktivität

### 9.4.1 Halbwertszeit $T_{1/2}$

Die radioaktiven Elemente variieren in ihrer Strahlung beträchtlich. Radium strahlt z.B. wesentlich schneller als Uran. E. Rutherford untersuchte den Zerfall der verschiedenen radioaktiven Elemente (1902) und machte diesen durch die Zerfallsgleichung berechenbar. (Nobelpreis 1908)

Wird der Zerfall einer radioaktiven Probe (zum Beispiel  $^{90}\text{Sr}$ , 10 g) experimentell untersucht, so ergibt sich folgendes Diagramm:



Die **Halbwertszeit  $T_{1/2}$**  ist also die Zeit, die vergeht, bis die Anzahl der anfangs vorhandenen radioaktiven (also instabilen) Atome durch Zerfall auf die Hälfte abgenommen hat. Es gilt somit:

Aus all diesen Überlegungen und ein bisschen Mathematik ergibt sich folgendes Zerfallsgesetz:

#### Zerfallsgesetz

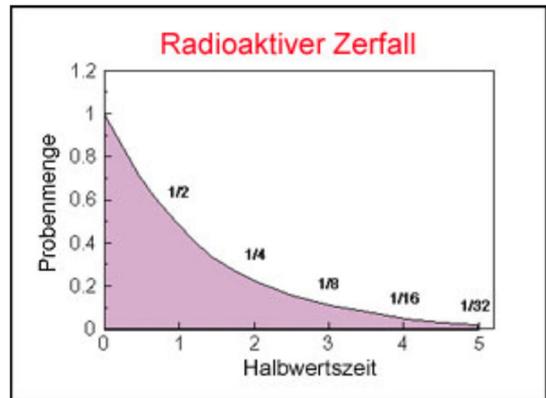
Bei einem radioaktiven Stoff mit der **Halbwertszeit  $T_{1/2}$**  sind von anfänglich  $N_0$  Kernen nach der Zeit  $t$  noch

Kerne vorhanden.

Für spätere Berechnungen gilt, dass zwischen zwei Halbwertszeiten jeweils ein linearer Zerfalls stattfindet (erleichtert Berechnungen erheblich):

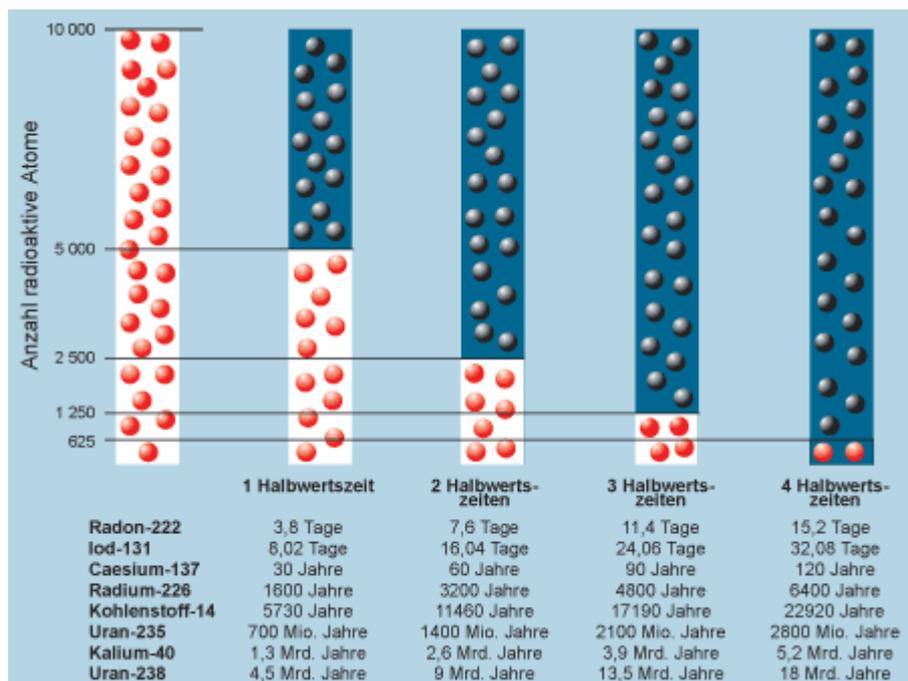


Die Halbwertszeit besagt, nach welcher Zeit sich die Zahl der Nuklide und damit die Aktivität halbiert haben wird. Nach Ablauf einer zweiten Halbwertszeit hat sich die Zahl der Nuklide erneut halbiert. Sie ist nun die Hälfte der Hälfte, also ein Viertel. Nach dem Verstreichen einer weiteren Halbwertszeit beträgt die Nuklidzahl ein Achtel, dann ein Sechzehntel usw. Mathematisch zusammengefasst lässt sich schreiben:



Übersicht einiger Halbwertszeiten

Radionuklid	Halbwertszeit
$^{214}\text{Po}$	0,16 ms
$^{222}\text{Radon}$	3,8 Tage
$^{226}\text{Radium}$	1600 Jahre
$^{14}\text{Kohlenstoff}$	5730 Jahre
$^{235}\text{Uran}$	700 Millionen Jahre
$^{40}\text{Kalium}$	1,3 Milliarden Jahre
$^{238}\text{Uran}$	4,5 Milliarden Jahre
$^{87}\text{Rubidium}$	48 Milliarden Jahre





### 9.4.2 Die Radiokarbon- oder $^{14}\text{C}$ -Methode

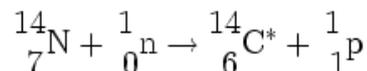
Im September 1991 wurde in den Ötztaler-Alpen (Österreich) eine mumifizierte Leiche entdeckt. Über diesen Fund, der von grosser geschichtlicher Bedeutung ist, wurde auch in der Presse viel berichtet. Liebevoll wurde die Mumie "Ötzi" genannt. Das Hauptinteresse galt natürlich dem Alter des Leichnams, denn bis an hin wurde angenommen, dass die Eisregionen der Alpen in der Vergangenheit von den Menschen gemieden wurden. Um das Alter der Mumie zu bestimmen, verwendet man die so genannte  $^{14}\text{C}$ -Methode.



### 9.4.3 Produktion und Verteilung von $^{14}\text{C}$

#### Entstehung von $^{14}\text{C}$ :

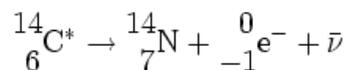
$^{14}\text{C}$  wird ständig durch Kernreaktionen in den oberen Schichten der Erdatmosphäre neu gebildet. Wenn die kosmische Strahlung auf Atome der Atmosphäre trifft, werden Neutronen freigesetzt. Trifft ein solches einen Kern des Stickstoff-Isotops  $^{14}\text{N}$ , so kann die Kernreaktion erfolgen, in der dieses Neutron eingefangen und dafür ein Proton abgespalten wird. Dadurch entsteht aus dem  $^{14}\text{N}$ -Kern ein  $^{14}\text{C}$ -Kern:



Die Kosmische Strahlung besteht zu 97% aus einer Ionenkomponente und zu 3% aus einer Elektronenkomponente. In der Ionenkomponente überwiegen Protonen und Alpha-Teilchen.

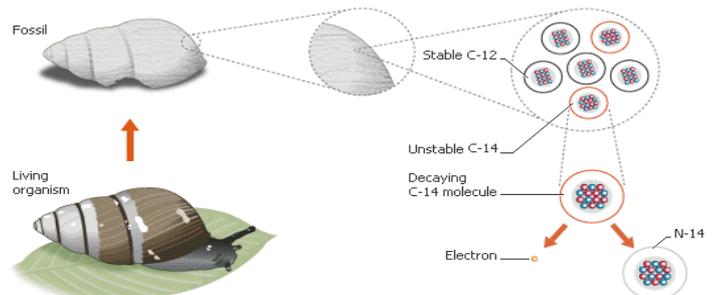
#### Zerfall von $^{14}\text{C}$

Während  $^{12}\text{C}$  und  $^{13}\text{C}$  stabil sind, zerfällt  $^{14}\text{C}$  mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren durch  $\beta^-$ -Zerfall zu  $^{14}\text{N}$ -Kernen:



#### Kohlenstoffkreislauf:

Der in der Atmosphäre erzeugte Radiokohlenstoff verbindet sich mit vorhandenem Sauerstoff zu **Kohlendioxid**. Durch die **Photosynthese** der Pflanzen gelangt  $^{14}\text{C}$  so anschliessend in die Biosphäre. Da Lebewesen bei ihrem Stoffwechsel ständig Kohlenstoff mit der Atmosphäre austauschen, stellt sich in lebenden Organismen dasselbe Verteilungsverhältnis der Kohlenstoff-Isotope ein, wie es in der Atmosphäre vorliegt.



Wird Kohlenstoff aus diesem Kreislauf herausgenommen (das heisst: wird er fossil), dann ändert sich das Verhältnis zwischen  $^{14}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$ , weil die zerfallenden  $^{14}\text{C}$ -Kerne **nicht** durch neue ersetzt werden und es gilt das Zerfallsgesetz:

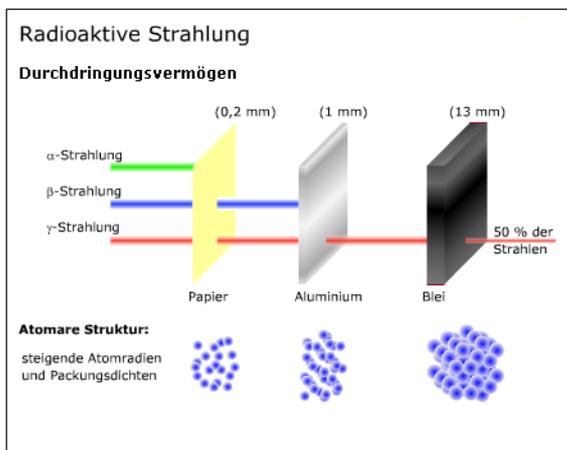
$$\left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}\right) = \left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}\right)_{\text{Luft}} \cdot e^{-\lambda_{14}t}, \lambda_{14} = 1,21 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{a}}$$

Der hierfür entscheidende Zeitpunkt ist das Ende des Stoffaustauschs mit der Atmosphäre, also der Tod des Lebewesens. So ist das Verhältnis zwischen  $^{14}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$  eines organischen Materials ein Mass für die Zeit, die seit dem Tod eines Lebewesens - beispielsweise dem Fällen eines Baums und Verwendung dessen Holzes - vergangen ist. Mithin ist es ein Mass für das Alter des Materials. Auch in nicht-organische Stoffe kann biogener Kohlenstoff und damit Radiokohlenstoff gelangen, beispielsweise in geschmolzene Metalle oder mit anderen thermischen Verfahren gewonnene Werkstoffe. Das  $^{14}\text{C}$ -Alter zeigt dann den Zeitpunkt der Herstellung an, evtl. zuzüglich des Alters des verwendeten organischen Kohlenstoffs.

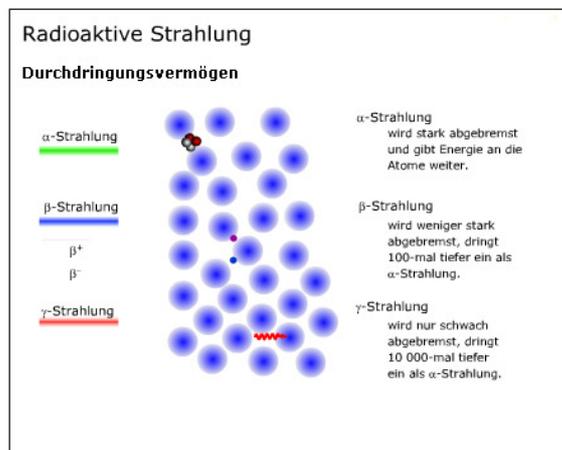


### 9.4.4 Eindringtiefe

Schäden durch Einwirkung radioaktiver Strahlung hängen von der Eindringtiefe in den Körper und von der Strahlendosis ab.  $\gamma$ -Strahlen werden durch Luft praktisch nicht absorbiert und haben auch im Körper die



grösste Eindringtiefe, weshalb sie auch innere Organe schädigen können. Dagegen ist selbst energiereiche  $\beta$ -Strahlung weniger gefährlich, denn sie hat in Luft nur eine Reichweite von maximal 9 cm und kann nur ca. 10 mm tief in das Gewebe eindringen.  $\alpha$ -Strahlen haben die geringste Eindringtiefe, sie werden schon durch ein



Blatt Papier zurück gehalten. Auch in Luft haben  $\alpha$ -Strahlen eine nur geringe Reichweite von 3 bis 9 cm.

### 9.4.5 Zeitdauer

Die Bestrahlung hängt neben der Dosishöhe massgeblich von der Dauer der Bestrahlung ab. Der Schaden ist geringer, falls eine bestimmte Dosis während längerer Zeit verabreicht wird, als wenn jemand dieselbe Dosis in kürzerer Zeit empfängt. Vergleich mit Sonnenbaden:

Wichtig ist hierbei auch der Zeitraum zwischen zwei Bestrahlungen. Wieso?

### 9.4.6 Grössen und Masseinheiten

**Aktivität:** Als *Aktivität* bezeichnet man die Anzahl der Zerfallsereignisse pro Zeiteinheit, die in einer Probe eines radioaktiven oder radioaktiv kontaminierten Stoffes auftritt.

**Becquerel (Bq)** 1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde. SI-Einheit für die Aktivität.

Des weiteren gibt es eine Unzahl weiterer Grössen, ein Beispiel sei die *Äquivalentdosis*. Sie ist ein Mass für die Stärke der biologischen Wirkung einer bestimmten Strahlendosis. Gleich grosse Äquivalentdosen sind somit unabhängig von der Strahlenart in ihrer Wirkung auf den Menschen vergleichbar.



## 9.5 Quellen von Radioaktivität

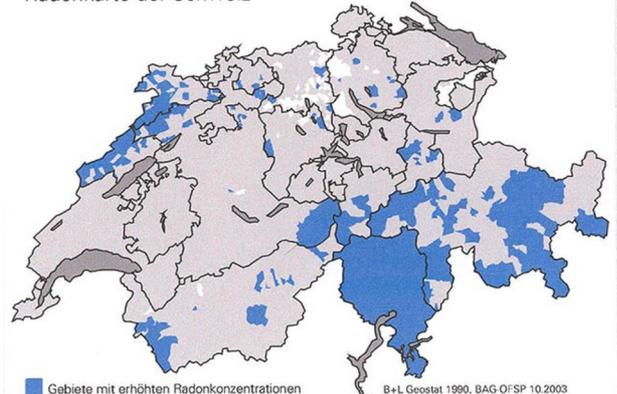
Natürliche Strahlung ist seit jeher Bestandteil unserer Umwelt. Sie stammt aus

Daneben sind wir auch künstlich verursachter Strahlung ausgesetzt. Worin unterscheidet sich diese künstliche Strahlung von der natürlichen Strahlung, wie sieht es mit den Eigenschaften aus?

Massgebliche Belastungen entstehen durch Strahlenuntersuchungen und -therapien, weit weniger durch industrielle Anwendungen.

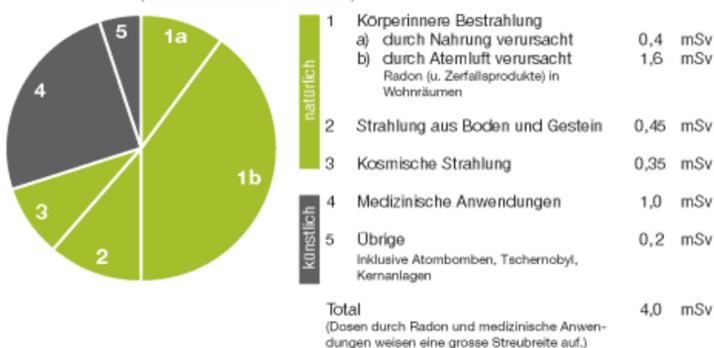
In der Schweiz werden wir durchschnittlich mit 4,0 Millisievert Strahlung pro Jahr belastet (die Einheit Sievert wird später noch definiert). Die individuelle Dosis schwankt jedoch stark. Sie ist unter anderem abhängig von der Lage und Höhe des Wohnortes, der Häufigkeit medizinischer Untersuchungen; die höchste Belastung wird durch das gasförmige Radon in unseren Wohnräumen verursacht.

Radonkarte der Schweiz



Für eine mögliche zusätzliche Strahlenbelastung aus einem geologischen Lager für radioaktive Abfälle verlangen die Behörden als Schutzziel eine Maximaldosis von 0,1 Millisievert pro Jahr. Dies könnte im Extremfall rund 2% der bestehenden natürlichen Belastung verursachen.

Mittlere jährliche Strahlendosis für eine Person in der Schweiz  
(Zahlen: Bundesamt für Gesundheit)



Wenn vom Radon (Abkürzung: Rn) die Rede ist, so wird in aller Regel das Nuklid  $^{222}\text{Rn}$  gemeint, welches der  $^{238}\text{Uran}$ -Reihe angehört. Uran zerfällt über Thorium und Radium zu Radon. Die Freisetzung von Radon ist dann besonders stark, wenn das Ausgangsmaterial (Fels, Lockergestein, Boden) viel Uran resp. Radium enthält, wenn die Mineralkörner aufgelockert sind, so dass viel Radon in den Porenraum entweichen kann, und wenn der Porenraum gross ist. Radonreiche Bodenluft wird in Gebäude eingesogen und führt bei den BewohnerInnen zu einem Gesundheitsrisiko.

Das Radonproblem wird dadurch verursacht, dass Radon gasförmig ist, und nach kurzer Zeit (Halbwertszeit 3,82 Tage) in weitere radioaktive Stoffe wie Polonium, Bismut und Blei zerfällt. Die Zerfallsprodukte lagern sich an Staubpartikel an, welche eingeatmet werden und in der Lunge zu einer Schädigung führen und das Lungenkrebsrisiko erhöhen können. In der Schweiz wird jeder 10. Lungenkrebsfall dem Radon zugeordnet (Radonkarte). Nach dem Rauchen gilt Radon als zweitwichtigste Quelle von Lungenkrebs; welchen Einfluss die Luftverschmutzung hat, ist bisher nicht geklärt<sup>1</sup>.

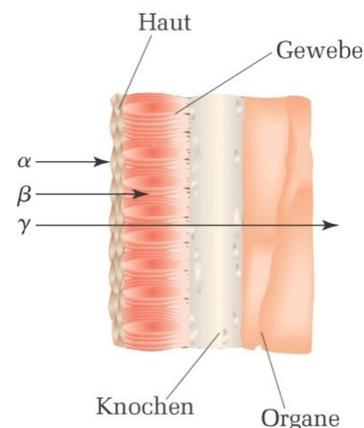
<sup>1</sup> <http://www.boehmgeol.ch/de/radon/gesundheitsrisiko.html>



## 9.6 Biologische Wirkungen in einer Zelle:

Das Durchdringungsvermögen von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung im Vergleich:

Tritt ionisierende Strahlung in eine Zelle, so ionisiert sie Atome und Biomoleküle. Dabei erfolgt die schädigende Wirkung auf zweierlei Art:



### 9.6.1 Direkte Wirkung

Ein Biomolekül wird direkt getroffen und ionisiert. Das führt zu chemischen Veränderungen. Welches ist das wichtigste Molekül und was ist seine Funktion?



Mögliche Folgen der radioaktiven Einstrahlung:

Einzelstrangbruch mit zerstörter (geschädigter) Endgruppe

Basenschaden (ohne Bruch)

Doppelstrangbruch (Kettenbruch direkt gegenüber oder versetzt)

DNA-Protein-Vernetzung (Nukleosid-Aminosäure-Verknüpfung), entsteht auch nach Ultraviolettbestrahlung

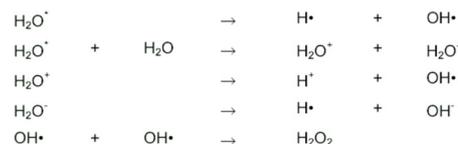
Denaturierte Region mit Basenschäden

Daraus können Genmutationen und mikroskopisch feststellbare Chromosomenveränderungen entstehen. Die Zelle verfügt über ein Reparatursystem, das Schäden an der DNS korrigieren kann. Wieso ist dann die Radioaktivität überhaupt gefährlich?

### 9.6.2 Indirekte Wirkung

Biomoleküle können durch Substanzen, die vorher durch das Ionisationsvermögen der Strahlung direkt entstanden sind, chemisch verändert werden. Woraus und zu wie vielen Bestandteilen besteht der menschliche Körper hauptsächlich?

Deshalb ist die Radiolyse des Wassers (= chemische Veränderung des Wassers bei Strahleneinwirkung) ein wichtiger Prozess für die indirekte Wirkung. Dabei entstehen Ionen, Radikale und neue chemische Verbindungen.



$\text{H}_2\text{O}^{\bullet}$ : angeregtes Wassermolekül  
 $\text{H}^{\bullet}, \text{OH}^{\bullet}$ : Radikale  
 $\text{H}_2\text{O}^+, \text{H}_2\text{O}^{\bullet}$ : ionisierte Wassermoleküle  
 $\text{H}_2\text{O}_2$ : Wasserstoffperoxid

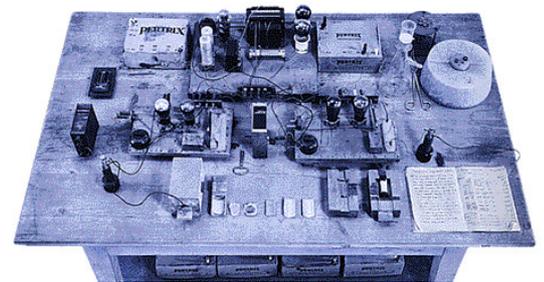
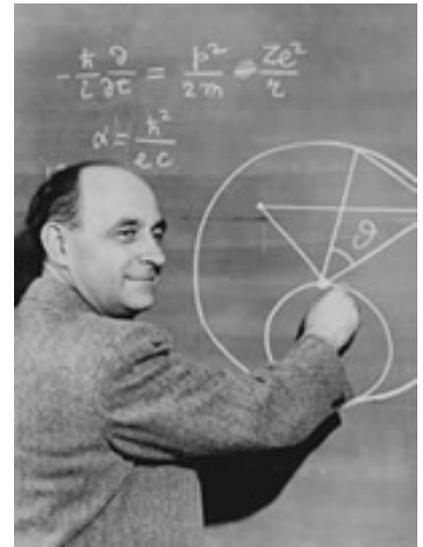
Alle diese Produkte können Ausgang für chemische Reaktionen mit Biomolekülen (z.B. DNA) sein, die unter Umständen zu Krebs führen können.



## 9.7 Die Entdeckung der Kernspaltung

Am 2. Dezember 1942 gelingt dem Physiker Enrico Fermi und seinem Team an der Universität von Chicago die erste kontrollierte nukleare Kettenreaktion - und damit erstmalig Energiegewinnung aus Kernspaltung.

Notizen zum Film: Blick auf Tage, die die Welt bewegten



Arbeitsplatz an welchem die erste Spaltung eines Atoms durchgeführt wurde

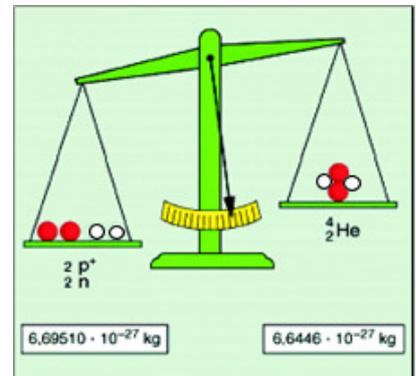


## 9.8 Woher kommt die Energie: Massendefekt und Bindungsenergie

Wie stark die Kernteilchen im Kern zusammengehalten werden, lässt sich berechnen. Das ist am einfachsten am Kern des Heliumatoms darzustellen. Er besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Masse des Kerns müsste sich eigentlich aus zwei Protonenmassen ( $m_p$ ) und zwei Neutronenmassen ( $m_n$ ) ergeben:

$$\begin{aligned} 2 \cdot m_p &= 2 \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34524 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ 2 \cdot m_n &= 2 \cdot 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34986 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ m_{2p + 2n} &= 6,69510 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

Sehr genaue Massenbestimmungen des Heliumkerns haben ergeben, dass seine Masse aber  $m(\text{He}) = 6,644656 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  beträgt. Die Masse des Heliumkerns ist also um  $0,050444 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  geringer als die Summe der Massen der einzeln existierenden Teilchen. Dieser Verlust macht etwa 0,8 % aus. Wie kommt dieser Massenverlust, auch Massendefekt zustande?



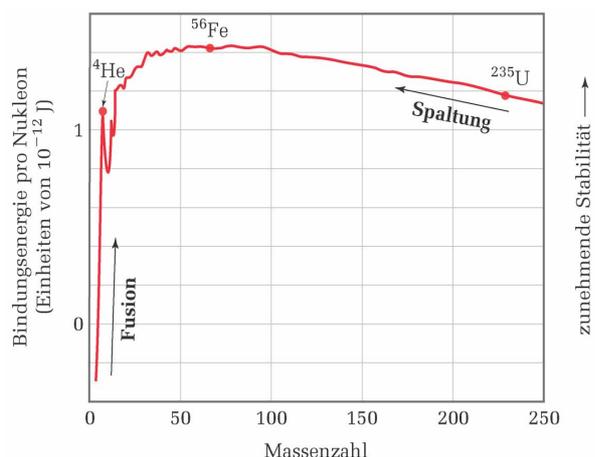
Die Differenz zwischen der Summe der Einzelmassen zweier Neutronen und Protonen sowie der Masse des He-Kerns beträgt also 0,0304 g/mol. Rechnet man diese vermeintlich geringe Massendifferenz nach der EINSTEIN-Gleichung in Energie um, so stellt man fest, dass dieser Massendifferenz ein enormes Energieäquivalent entspricht.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta m \cdot c^2 = 0,0304 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} \cdot (3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 \\ &= 2,74 \cdot 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} = 2,74 \cdot 10^9 \text{ kJ mol}^{-1} = 2,74 \cdot 10^{12} \text{ J mol}^{-1} \end{aligned}$$

(Vergleiche: ein Gramm Wasser wird von 4,18 Joule um ein Kelvin erwärmt, also ca.  $6.5 \cdot 10^5$  Tonnen Wasser pro mol He, oder ein Wasserwürfel von ca. 85 m Kantenlänge)

Die **Kernbindungsenergie** ist die Energie, die bei der Zerlegung eines Kerns in seine einzelnen Nukleonen, das heißt, Protonen und Neutronen, aufgebracht werden muss.

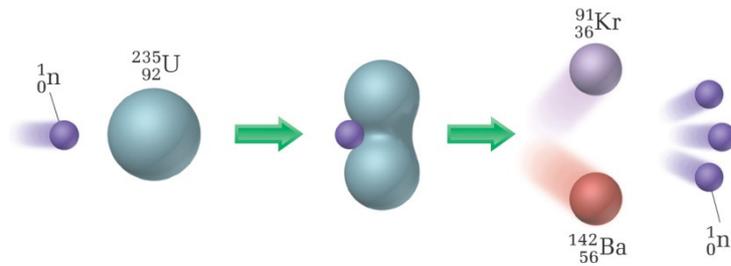
Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon nimmt mit steigender Massenzahl zu, erreicht bei Werten um 50 bis 60 ein Maximum und fällt für schwerere Kerne langsam ab. Aufgrund dieses Verhaltens wird bei der Fusion von leichten Kernen und bei der Spaltung von schweren Kernen Energie frei; beide Prozesse sind exotherm.



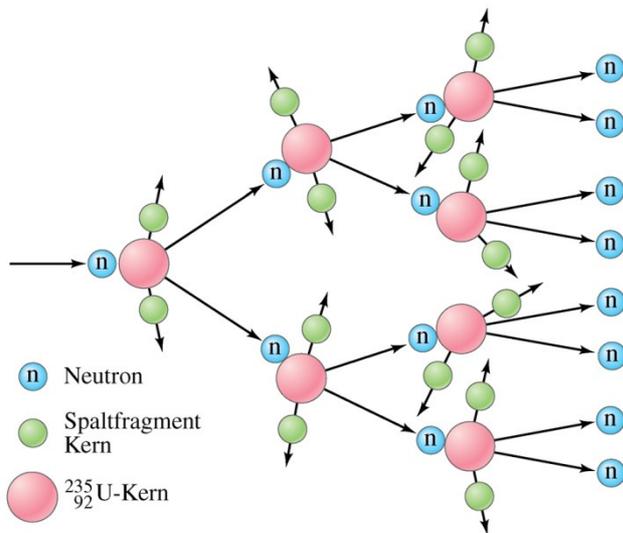


## 9.9 Kettenreaktion

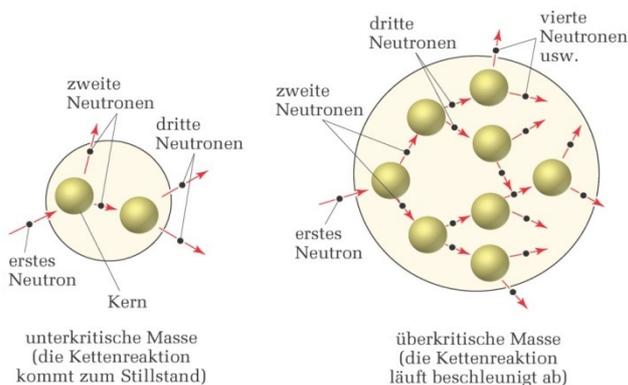
Hahn und Strassmann (Kernphysiker) äusserten bereits in ihren beiden ersten Aufsätzen über die Kernspaltung die Vermutung, dass **neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen entstehen müssten**. Dies wurde von dem französischen Forscher Joliot im März 1939 experimentell bestätigt. Damit hatte man die Möglichkeit erkannt, **einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen**. Unter geeigneten Bedingungen können nämlich die freigesetzten Neutronen sofort weitere Uranatome spalten, so dass ein lawinenartig ablaufender Spaltprozess entsteht. Er wird allgemein als **Kettenreaktion** bezeichnet.



Ein Diagramm zur Spaltung eines Uran-235-Kerns. Hier ist nur eine von vielen Spaltungsformen zu sehen.



Geht man davon aus, dass nach jeder Spaltung zwei freie Neutronen zur Verfügung stehen (tatsächlich sind es im Mittel 2.3), sind es in den weiteren Schritten 4, 8, 16, 32, 64, 128 usw. Wenn genügend Urankerne vorhanden sind, keine Neutronen nach aussen verloren gehen oder von Fremdatomen eingefangen werden, verdoppelt sich die Anzahl der Kernspaltungen von Neutronengeneration zu Neutronengeneration, und der gesamte Vorgang läuft lawinenartig ab. Dabei werden ungeheure Mengen an Energie in kürzester Zeit frei.



Unterkritische und überkritische Spaltung. Bei einer **unterkritischen Masse** kommt die Kettenreaktion schnell zum Stillstand, da Neutronen entkommen, ohne weitere Spaltungen auszulösen. Wenn die Masse ansteigt, entkommen weniger Neutronen und bei einer **überkritischen Masse** kommt eine beschleunigte Kettenreaktion in Gang.

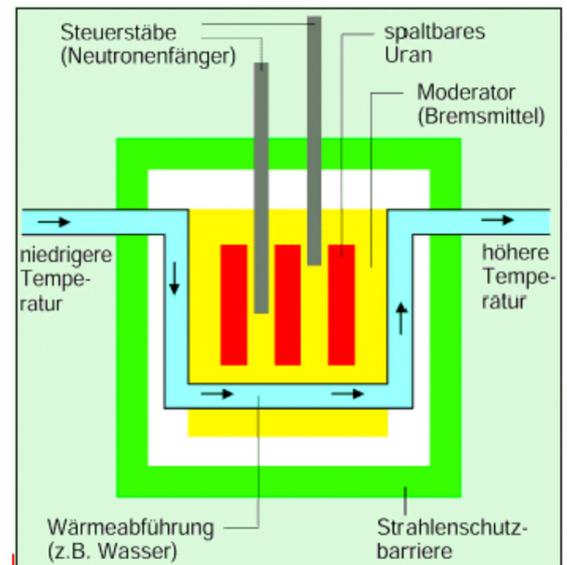


## 9.10 Kontrollierte Kernspaltung

Anlagen, bei denen Kettenreaktionen kontrolliert ablaufen, bezeichnet man als **Kernreaktoren** oder kurz als **Reaktoren**. Sie bestehen im Prinzip aus fünf Komponenten

- Ausreichende Masse an spaltbarem Material,
- Stoff zur Abbremsung der Neutronen (Moderator)
- Vorrichtungen zum Einfang von Neutronen (Steuer- bzw. Regelstäbe),
- Medium zur Wärmeabführung,
- Barrieren für den Strahlenschutz und die Rückhaltung radioaktiver Stoffe.

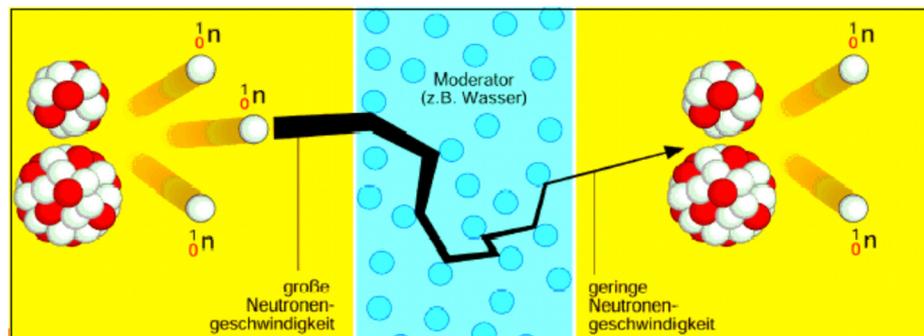
Die **Wahrscheinlichkeit für eine Kernspaltung nimmt in der Regel mit wachsender Neutronenenergie ab**. Daher muss die **Geschwindigkeit der Neutronen reduziert werden**.



### Moderator

Neutronen, die bei der Spaltung von Kernen des  $^{235}\text{U}$  freigesetzt werden, haben eine relativ hohe Geschwindigkeit. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie weitere Kernspaltungen hervorrufen, sehr gering. Wenn dennoch mit den schnellen Neutronen eine Kettenreaktion in Gang gehalten werden soll, muss man eine hohe  $^{235}\text{U}$ -Konzentration wählen und eine aufwendige Reaktortechnik anwenden.

Langsame Neutronen führen mit sehr viel größerer Wahrscheinlichkeit im  $^{235}\text{U}$  zu Spaltungen. Die bei jeder Kernspaltung entstehenden schnellen



Neutronen müssen deshalb durch geeignete Substanzen auf niedrige Geschwindigkeiten abgebremst werden. Das geschieht mit Hilfe so genannter **Moderatoren** (Bremsmittel).

Die Neutronen werden an den Kernen des Moderators durch Stöße abgebremst. Beim Einsatz eines Moderators kommt man mit niedrigen Spaltstoffkonzentrationen aus. Im Prinzip reicht dann der im natürlichen Uran vorhandene Anteil von etwa 0,7 %  $^{235}\text{U}$ . Gute Moderatoren müssen zwei Bedingungen erfüllen:



### Temperaturabhängigkeit des Moderatoreffekts

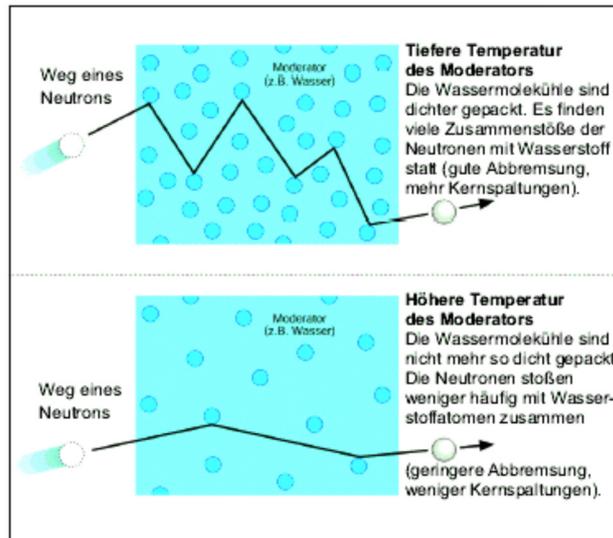
Die Temperatur in den Brennstäben eines Reaktors schwankt in Abhängigkeit von der verlangten Reaktorleistung. Sie liegt bei Vollast im Innern der Brennstäbe bei etwa 800 °C. Die Temperatur hat Einfluss auf die Wirksamkeit des Moderators. Ein Vergleich zwischen den Moderatoren Graphit und Wasser macht das deutlich.

Bei dem Reaktor vom Typ **Tschernobyl** sind der Moderator (Graphit) und das Kühlmittel (Wasser) unterschiedliche Stoffe. Wenn die Anzahl der Kettenreaktionen und damit die Leistung ansteigen, entstehen im Kühlmittel Wasser mehr Dampfblasen.

Da Wasserdampf pro Volumen weniger Moleküle enthält als Wasser, werden weniger Neutronen absorbiert. Am Moderator Graphit kann nun eine höhere Anzahl von Neutronen abgebremst werden, so dass auch die Anzahl der Kernspaltungen steigt.

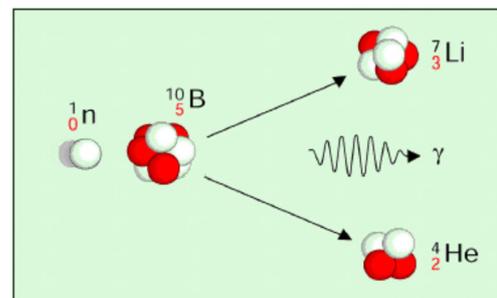
Durch eine erhöhte Anzahl von Kernspaltungen steigt dann aber auch die Leistung an, die zu noch mehr Dampfblasen führt usw. Man sagt, der **Dampfblasenkoeffizient** des Moderators ist **positiv**. Nur durch geeignete Sicherheitseinrichtungen wird verhindert, dass der Leistungsanstieg ausser Kontrolle gerät.

In den Leichtwasserreaktoren (speziell Siedewasserreaktoren) ist das Wasser Kühlmittel und Moderator. Steigen die Anzahl der Kernspaltungen und damit auch die Leistung an, erhöht sich auch hier der Dampfblasenanteil. Da das Wasser aber gleichzeitig Moderator ist, bedeuten mehr Dampfblasen eine Verdünnung des Moderators. Es werden jetzt zwar weniger Neutronen absorbiert, noch weniger aber abgebremst (Moderatoreffekt ist von grösserem Gewicht als der Absorptionseffekt). Dadurch sinkt die Anzahl der Kernspaltungen von selbst. Der **Dampfblasenkoeffizient** ist hier also **negativ**.



### Steuerung der Kettenreaktion

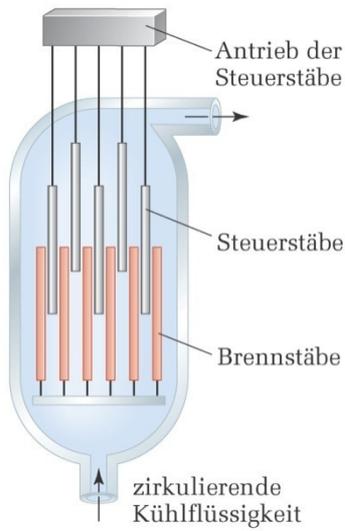
In einem Reaktor wird die Kettenreaktion dadurch gesteuert, dass man von aussen in den Neutronenhaushalt eingreift. Das geschieht mit Hilfe von Stoffen, die eine grosse Neigung zur Absorption von Neutronen besitzen (z. B. Bor, Indium, Silber, Cadmium). Werden diese Steuerstäbe tief in die Spaltzone geschoben, absorbieren sie viele Neutronen. Zieht man sie wieder heraus, ist die Neutronenabsorption entsprechend geringer. Folgende Reaktionen werden beobachtet:



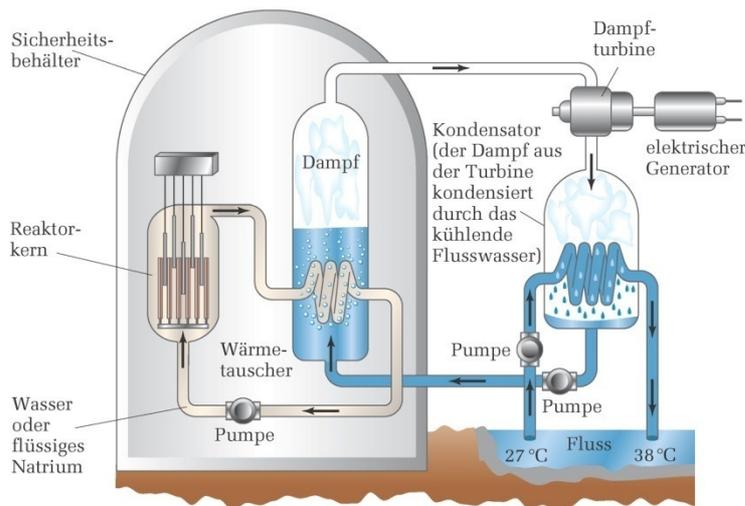
Das entstehende Lithium gelangt zum Teil in das Kühlmittel des Reaktors und wird zusammen mit anderen Verunreinigungen durch die Kühlmittelreinigungsanlage fortlaufend entfernt. Die Alphateilchen wandeln sich durch Aufnahme von Elektronen in Helium um, das in den Röhren der Steuerstäbe einen beachtlichen Gasdruck erzeugt. Die Abnahme der Borkonzentration und der Druckaufbau begrenzen die Lebensdauer der Steuerstäbe. Der Austauschrhythmus beträgt etwa sechs Jahre.



### 9.11 Kernkraftwerktypen



Darstellung eines Reaktorkerns. Die Abbildung zeigt die Brennelemente, die Steuerstäbe und die Kühlflüssigkeit. Ein Moderator zur Bremsung der Neutronen ist ebenfalls vorhanden.



(a)



(b)

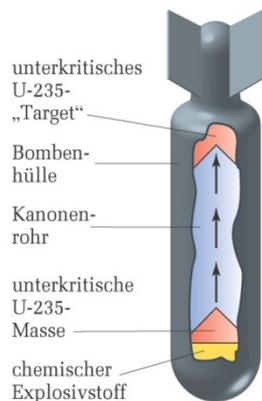
Der grundlegende Aufbau eines Kernkraftwerks. (a) Eine Flüssigkeit, Wasser oder flüssiges Natrium, transportiert die im Reaktorkern entstandene Wärme zu einem Wärmetauscher, wo Dampf entsteht. Diese Flüssigkeit befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf. Der erzeugte Dampf treibt einen elektrischen Generator an. (b) Ein Kernkraftwerk in Salem, New Jersey. Beachten Sie die kuppelförmige Betonschale.



## 9.12 Atombombe<sup>2</sup>

*Ich bin nicht sicher, mit welchen Waffen der dritte Weltkrieg ausgetragen wird, aber im vierten werden die Menschen mit Stöcken und Steinen kämpfen*

(Albert Einstein)

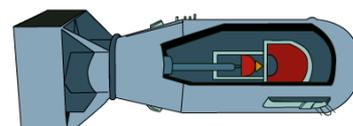


Schematischer Aufbau einer Atombombe. Mit Hilfe eines gewöhnlichen Explosivstoffes vereinen sich zwei unterkritische Massen zu einer überkritischen Masse

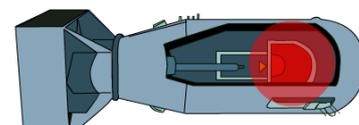
Die Kernspaltungsbombe ist im Prinzip ein schneller Reaktor mit sehr hoher Reaktivität, d.h. es werden jeweils viel mehr Neutronen produziert, als ausfließen oder absorbiert werden. In einer Kernspaltungsbombe muss das spaltbare Material so angeordnet sein, dass es unterkritisch bleibt. Das geschieht entweder dadurch, dass die gesamte Masse in mehrere Teile aufgeteilt wird, die getrennt voneinander lagern, oder dass es bei geringer Dichte über ein grosses Volumen verteilt wird.

Zur Zündung der Kernexplosion wird das spaltbare Material durch eine konventionelle Sprengladung zusammengepresst, so dass auf engem Volumen die sehr hoch überkritische Masse vereinigt wird.

Um Atombomben zur Detonation zu bringen, wird im einfachsten Konstruktionsystem spaltbares Material auf ein Ziel aus dem gleichen Material geschossen.



Beim Zusammentreffen z.B. der beiden <sup>235</sup>Uran-Blöcke verschmelzen sie zu einer superkritischen Anordnung.



Nach Zündung der Bombe knapp oberhalb des Zielgebietes, wird eine sich schnell ausbreitende Druckwelle erzeugt, die die grösste Zerstörung durch den Luftüberdruck verursacht.



In der Luft erreicht der Explosionsfeuerball seinen maximalen Durchmesser und strahlt eine extrem heisse Hitzewelle ab, die zu schwersten Verbrennungen führen kann



Findet eine nukleare Explosion nahe der Oberfläche statt, wird Erde oder Wasser in eine pilzförmige Wolke gesogen und mit den Überresten der radioaktiven Waffe verseucht.



Der radioaktive Niederschlag (**Fallout**) schwebt langsam zu Boden und kann je nach Dauer der Schwebzeit mehr oder minder starke Verstrahlungen verursachen.

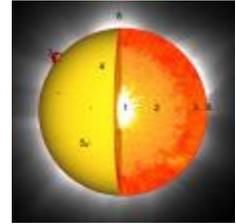


<sup>2</sup> Bilder: [www.stern.de](http://www.stern.de), Text: [www.fundus.de](http://www.fundus.de)



## 9.13 Kernfusionsreaktoren

Wurde bisher versucht, mittels der Spaltung von Kernen Energie zu gewinnen (AKW, Atombombe), so kann auch durch die Fusion zweier Kerne Energie gewonnen werden. Diese Idee ist nicht neu, unsere Sonne betreibt diese Art von Energiegewinnung mit Erfolg seit circa 4.5 Milliarden Jahren.

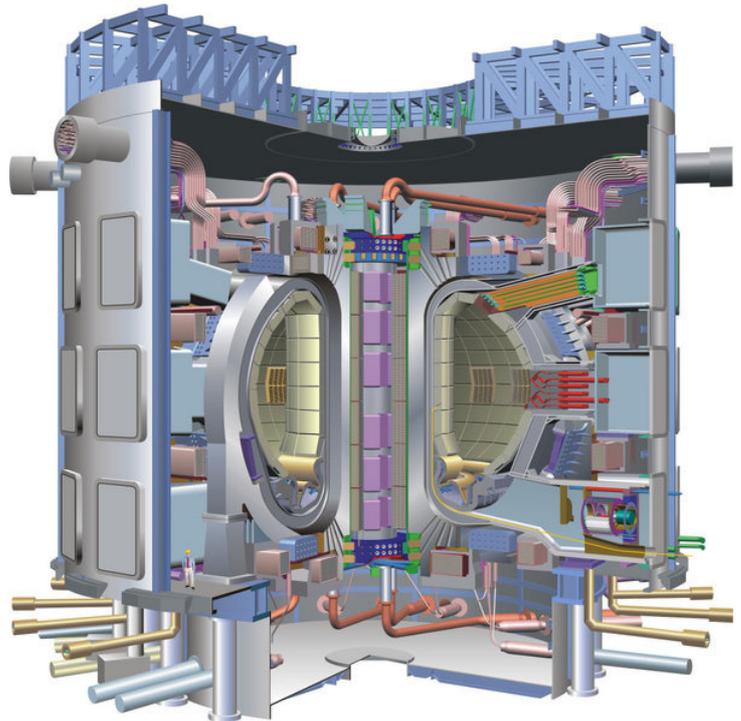


Als **Kernfusionsreaktor** bezeichnet man nukleare Reaktoren, die durch **Verschmelzung (Fusion) leichter Atomkerne Wärmeenergie** und damit z.B. Strom erzeugen.

Bisher ist es noch nicht gelungen, Kernfusionsreaktoren zu bauen, die dauerhaft mehr Energie liefern, als sie für die Fusion aufnehmen müssen. Gelingt ein solches Reaktorkraftwerk, dann könnte es mit vergleichsweise geringem Brennstoffverbrauch grosse Mengen an Strom liefern und damit alle anderen Energiequellen überflüssig machen.

An Kernfusionsreaktoren wird seit etwa 1960 intensiv geforscht. Die grundlegenden nuklearen Reaktionen und deren Potenzial zur Energiefreisetzung sind durch die Entwicklung der Wasserstoffbombe bestens bekannt, jedoch verläuft dort die Reaktion unkontrolliert. Die erste kontrollierte Kernfusion gelang 1970 mit Tokamak 3 in der Sowjetunion.

Nach Ansicht der meisten Experten sind aber funktionierende Kernfusionsreaktoren frühestens in fünfzig Jahren zu erwarten. Der erste Versuchsreaktor, der mehr Energie erzeugen soll, als zum Aufbau des Fusionsplasmas benötigt wird, ist der **ITER**, dessen Planungsphase kürzlich abgeschlossen wurde. Die Europäische Union, die USA, Japan, die Volksrepublik China, Russland, Indien und Südkorea gaben am 28. Juni 2005 nach langen Verhandlungen den Startschuss für den Bau dieser Versuchsanlage. Sie soll in Cadarache in Südfrankreich mit Kosten von insgesamt 9,6 Milliarden Euro aufgebaut und 20 Jahre lang betrieben werden.



### Verfügbarkeit des Brennstoffs

Die ersten Fusionsreaktoren sollen die Deuterium-Tritium-Reaktion (D-T-Reaktion) nutzen:

Diese Reaktion besitzt allerdings den Nachteil, dass Tritium radioaktiv und in der Natur fast nicht verfügbar ist, also erzeugt werden muss:

Da Lithium seltener vorkommt als Deuterium, stellt es den begrenzenden Brennstoff dar. Die technisch nutzbaren Lithiumvorkommen reichen jedoch aus, um den Energiebedarf der Menschheit für einige tausend Jahre zu decken. Der Brennstoff ist also

- langfristig vorhanden,
- leicht zu gewinnen,
- preiswert und
- weltweit verteilt (so dass keine politischen Abhängigkeiten auftreten).



## 9.14 Die Entstehung der Elemente<sup>3</sup>

### Der Urknall\*

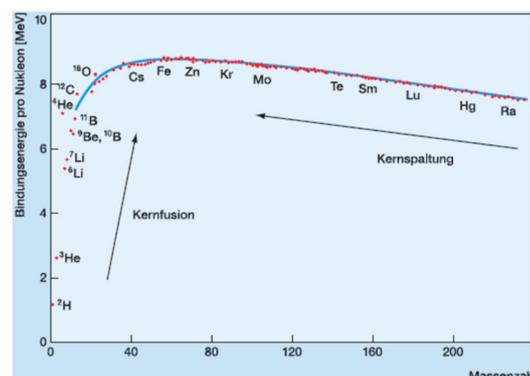
Zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellte der amerikanische Astronom Edwin Hubble (1889-1953) fest, dass sich die fernen Nebel von uns wegbewegen und zwar umso schneller je weiter sie bereits von uns weg sind. Die Grundlage für die spätere Urknalltheorie war gefunden, denn wenn sich diese Galaxien jetzt von uns entfernen, müssen sie zu einem früheren Zeitpunkt nahe beisammen gewesen sein. Aus dem Verhältnis ihrer Geschwindigkeit und ihrer Entfernung lässt sich der Zeitpunkt des Anfangs des Universums ermitteln. Die heute gültige Schätzung für sein Alter ist 14 Milliarden Jahre. Die Hypothese von Edwin Hubble widersprach zu ihrer Zeit allen gängigen Vorstellungen von einem stabilen Universum.



Die Theorie des Urknalls postuliert einen Anfang von Raum und Zeit und ein Universum von zunächst unvorstellbar kleinem Volumen und unvorstellbar hoher Temperatur und Dichte, wo die uns bekannten Naturgesetze versagen. Doch schon Bruchteile einer Sekunde später, bei der Zeit von  $10^{-42}$  Sekunden nach dem Urknall, können diese Gesetze das Verhalten des Universums beschreiben. Die nun folgende Geschichte des Universums ist eine Kette a priori völlig unwahrscheinlicher Ereignisse, von denen jedes einzelne in der Lage gewesen wäre, die weitere Entwicklung zu einem vorzeitigen Ende zu bringen. Da wir nun aber einmal da sind, erscheinen a posteriori diese Ereignisse nicht mehr als Zufälle, sondern als Notwendigkeiten.

### Der erste Schritt: $H \rightarrow He$

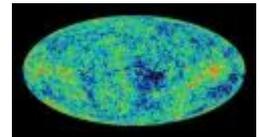
Bereits 1 Millisekunde nach dem Big Bang wäre es zwar für die Existenz von stabilen Heliumkernen schon kühl genug gewesen, weil diese sehr stark gebunden sind. Die Dichte der Materie war aber schon so gering, dass die direkte (Vierkörper-)Reaktion zweier Protonen und zweier Neutronen zu  $^4He$  nicht mehr möglich war.





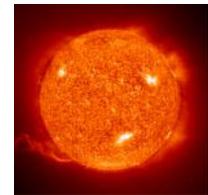
### Das dunkle Zeitalter

Etwa 350 000 Jahre nach dem Urknall betrug die Temperatur im Universum noch 10'000 K. Die Atomkerne waren nun in der Lage, **Elektronen zu binden** und somit elektrisch neutrale Atome zu bilden: das Universum wurde für Strahlung **transparent**. Durch die Expansion kühlte es sich immer mehr ab und wurde damit auch immer dunkler, das dunkle Zeitalter begann. Der abgekühlte Überrest dieser 10'000 K heißen Strahlung ist heute noch als kosmische Hintergrundstrahlung jenseits der fernsten Galaxien erkennbar.



### Die ersten Sterne

Ungefähr 700 Millionen Jahre nach dem Urknall war die Finsternis zu Ende. Winzige Fluktuationen (zufällige Unterschiede) der Hintergrundstrahlung erzeugten kleine lokale Dichteunterschiede in der Verteilung der Materie. Diese führten zu lokal erhöhten Gravitationsfeldern, die ihrerseits die Dichteunterschiede noch weiter verstärkten. In den Zentren erhöhter Dichte sammelte sich immer mehr Materie aus der Umgebung an und im Verlauf von Millionen Jahren hatten sich örtlich Wolken der hundertfachen Masse der heutigen Sonne zusammengeballt. Die Kontraktion der Wolke führte zu hohem Druck und hoher Temperatur in ihrem Innern, wodurch schliesslich erstmals seit dem Big Bang wieder Kernfusionsprozesse in Gang kommen konnten und dadurch Energie freisetzen: Die ersten leuchtenden Sterne waren entstanden. **Wie im Urknall verbrannte zuerst Wasserstoff zu Helium, aber im Unterschied zu damals ist in Sternen die Dichte viel höher, so dass mit weiteren Reaktionen die Massenlücken in der Nuklidkarte übersprungen und schwerere Elemente gebildet werden konnten.**



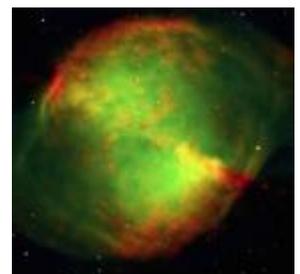
### Der zweite Schritt: He → C

Diese ersten Sterne erzeugten zunächst durch Wasserstoffbrennen Helium, das bereits vom Urknall her im Universum vorhanden war, sie trugen also noch nichts Neues bei. Die grössten unter ihnen hatten nach etwa 50 Millionen Jahren im Innern ihren Vorrat an Wasserstoff verbrannt und wurden zu Roten Riesen, Sterne gewaltiger Grösse, aber geringer Dichte. In ihrem Zentrum sind die Bedingungen geeignet, dass zwei  ${}^4\text{He}$ -Kerne zunächst zum instabilen  ${}^8\text{Be}$  verschmelzen und dieses sehr kurzlebige Isotop (Halbwertszeit von  $10^{-16}$  Sekunden) durch Einbau eines dritten  ${}^4\text{He}$ -Kerns den stabilen Kohlenstoff  ${}^{12}\text{C}$  bilden kann. Dafür ist aber eine wichtige Bedingung erforderlich:

Der  ${}^{12}\text{C}$ -Kern muss ungefähr die gleiche (kinetische) Energie aufweisen (,resonant') wie das Paar  ${}^4\text{He}$  und  ${}^8\text{Be}$ . Mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 1:1000 gelingt es diesem Paar ein stabiles Kohlenstoffatom  ${}^{12}\text{C}$  zu bilden. Bei den restlichen zerfällt das  ${}^8\text{Be}$  wieder in Heliumkerne. Da die weitere Kernsynthese, von  ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$  zu  ${}^{16}\text{O}$  und weiter, nicht resonant verläuft, bleibt genügend Kohlenstoff übrig. **Im anderen Falle wäre der für den Aufbau des Lebens so wichtige Kohlenstoff im Universum praktisch nicht vorhanden und auch das Leben wie wir es auf der Erde kennen unmöglich.**

### Der dritte Schritt: C → Fe

Viele der ersten Sterne waren wesentlich massiver als die heutige Sonne. In ihrem Innern geht während des Stadiums als Roter Riese der Heliumbrennstoff langsam zur Neige. Der Stern kontrahiert abermals, bis die Temperatur im Zentrum soweit angestiegen ist, dass die nächste Brennstufe zündet, das **Kohlenstoffbrennen**.

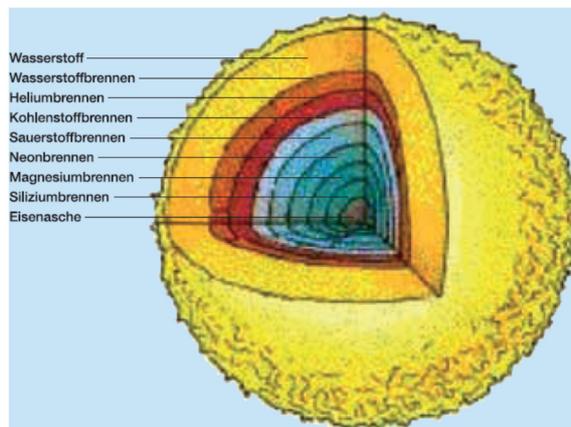


Beim Kohlenstoffbrennen verschmelzen zwei Kohlenstoffkerne zu einem angeregten Magnesiumkern, aus dem verschiedene Tochterprodukte entstehen können. (Weniger massive Sterne wie unsere Sonne enden dagegen nach dem Heliumbrennen als Weisse Zwerge, weil die nötige Temperatur für das Kohlenstoff brennen nicht erreicht werden kann.) So zünden im Zentrum in immer rascherer Folge weitere Brennstufen, während die anderen in Schalen weitergehen - der Stern erhält eine Zwiebelschalenstruktur.



Beim **Neonbrennen** wird ein Neokern durch ein energiereiches Photon in einen Sauerstoff- und einen Heliumkern gespalten. Letzterer kann mit einem zweiten Neokern zu Magnesium reagieren, als netto:

Beim **Sauerstoffbrennen** verschmelzen zwei Sauerstoffkerne zu einem angeregten Schwefelkern, aus dem wiederum verschiedene Tochterprodukte entstehen können:



Auf diese Weise werden alle weiteren Elemente bis hin zum Eisen erzeugt. Wenn die Kette dieser Fusionsprozesse beim Eisen angelangt ist, gibt es keine Reaktionen mehr, aus denen sich Energie gewinnen lässt, um den Stern zu stabilisieren. Er kollabiert schliesslich infolge seiner eigenen Gravitation und endet als Supernova vom Typ II. Er enthält bereits alle Elemente von Wasserstoff bis Eisen, eine beachtliche Vielfalt von 26 verschiedenen Atomen, aber alle schwereren Elemente als Eisen fehlen noch.

### Neutronen

Die Erzeugung von Elementen, die schwerer sind als Eisen, erfordert grosse Energiemengen. Dazu stehen verschiedene kosmische Prozesse zur Verfügung, wobei aber in allen Fällen die Neutronen die Hauptrolle spielen.

### Der vierte Schritt: Fe → U

Supernovae sind nicht nur das Ende einer Kette von Prozessen, die zum Eisen führen, sondern auch der Anfang weiterer Reaktionen, welche die Synthese von Atomkernen höherer Ordnungszahlen ermöglichen. In ihren abgestossenen Hüllen entstehen viele Neutronen im explosiven Sauerstoff- und Siliziumbrennen. Da Neutronen keine elektrische Ladung besitzen, können sie ungehindert in die vorhandenen Atomkerne eindringen. Dabei erhöht sich die Neutronenzahl des Kerns um den Wert 1. Wenn dabei ein instabiler Kern entsteht, zerfällt dieser, indem ein Neutron durch den  $\beta^-$ -Zerfall in ein Proton umgewandelt und somit ein neues Element gebildet wird. Freie Neutronen kommen nicht nur in Supernovae vor, sondern auch in Roten Riesen während des Heliumbrennens, wo sie in Nebenreaktionen entstehen. Die schweren Elemente können somit auch dort durch Neutronenaddition gebildet werden, sobald diese etwas Eisen enthalten. Entsprechend der unterschiedlichen Zeitskalen werden zwei Neutroneneinfangprozesse unterschieden:

Der **s-Prozess** (slow) addiert einzelne Neutronen in Zeiträumen von einigen 1000 Jahren.

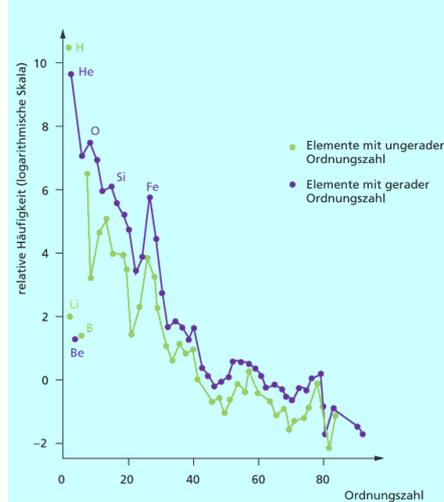
Der **r-Prozess** (rapid) addiert eine grosse Zahl von Neutronen innerhalb Bruchteilen von Sekunden.

## 9.15 Die Häufigkeiten im Sonnensystem

Die Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem lässt sich unter anderem durch die Analyse des Sonnenwinds ermitteln. Dieser besteht hauptsächlich aus Protonen und Elektronen, aber auch Kerne von Helium und schwererer Elemente kommen vor. Er widerspiegelt in erster Näherung und mit wenigen Ausnahmen die Zusammensetzung der Sonne, da diese rund 99,9% der Masse im Sonnensystem besitzt. Die heute feststellbaren Häufigkeiten sind ein angenähertes Abbild des damaligen Zustandes im lokalen interstellaren Raum, wo die Sonne vor 4,6 Milliarden Jahren entstand. Vor ihr waren schon Generationen von Sternen zu Supernovae geworden und hatten die Kette der Nukleosynthese durchgearbeitet. Von diesen früheren Sternen sind die schwereren Elemente als Eisen die wichtigsten Zeugen. Ihre relative Seltenheit zeigt jedoch, dass der Prozess der Nukleosynthese oder die galaktische chemische Evolution erst am Anfang ist: es stehen noch viele leichte Elemente zur Verfügung, welche die Energie liefern, um in den kommenden Milliarden von Jahren weitere schwere Elemente zu bilden.



Kosmische Häufigkeitsverteilung der Elemente



Die heutige Häufigkeitsverteilung der Elemente zeigt nebenstehende Abbildung. Eindeutig ersichtlich ist, dass Elemente mit gerader Ordnungszahl häufiger vorkommen! Warum wohl?

Hinweis: Elemente mit Ordnungszahl 3 und höher konnten sich nur durch Kernfusion (Verschmelzen zweier Kerne) von H, He oder mit sich selbst bilden.

Häufigkeit der Elemente. Die Zahlen geben an, wie viele Atome von insgesamt 100000 Atomen auf das jeweilige Element entfallen

	Universum	Erde	Erdrinde	Meerwasser	Körper
H	92 760	120	2 880	66 200	60 560
He	7 140	–	–	–	–
C	8	99	34	1,4	10 680
N	15	0,3	3	–	2 440
O	49	48 800	60 110	33 100	25 670
F	–	3,8	68	–	–
Ne	20	–	–	–	–
Na	0,1	640	2 160	290	75
Mg	2,1	12 500	1 960	34	11
Al	0,2	1 300	6 300	–	–
Si	2,3	14 000	20 800	–	0,9
P	–	140	70	–	130
S	0,9	1 400	17	17	130
Cl	–	45	8	340	33
K	–	56	1 100	6	37
Ca	0,1	460	2 100	6	230
Ti	–	28	250	–	–
Mn	–	56	35	–	–
Fe	1,4	18 870	2 100	–	0,4
Ni	–	1 400	3	–	–
	99 999,1	99 998,1	99 998	99 994,4	99 997,3



Vergleicht man die unbelebte Welt, also Sonne, Sterne, Erde, Atmosphäre mit den Lebewesen, stellt man die Bedeutung des **Kohlenstoffs** in Organismen fest. Dieser liegt in Tieren, Pflanzen, Pilzen und Mikroorganismen vornehmlich in den organischen Stoffen Kohlenhydrate (Zucker), Fette und Proteine (= Eiweisse) vor. Dies gilt auch für die Nahrung. Der hauptsächliche Bestandteil der Organismen ist **Wasser** (H<sub>2</sub>O).



In der **Erdrinde** sind **Sauerstoff** und **Silizium** am meisten verbreitet (,OSiAlFe'). Das Silizium für die Computerchips wird also nicht ausgehen



### Woher stammen Kohlenstoff, Eisen und Uran?

Der Kohlenstoff stammt aus Roten Riesen, wo durch die Verschmelzung von zwei <sup>4</sup>He Atomen zunächst das instabile <sup>8</sup>Be erzeugt wird, das sich mit einem weiteren <sup>4</sup>He-Kern auf Grund der Resonanzreaktion zum <sup>12</sup>C-Kern weiterentwickeln kann.

Das Eisen entsteht als Endprodukt der Kernfusionsprozesse in massereichen Sternen vor ihrer Explosion zu Supernovae.

Das Uran schliesslich stammt aus dem r-Prozess in den Hüllen von Supernovae (oder auch aus verschmelzenden Neutronensternen).



#####

**Bis hierhin o.k. ???????????????'**

**Jedenfalls ausgedruckt für 1nb**

#####

Exkurs: Computeranwendungen Atomtestsrechnungen, Seti etc.



## 9.16 Halbwertszeit $T_{1/2}$

Die radioaktiven Elemente variieren in ihrer Strahlung beträchtlich. Radium strahlt z.B. wesentlich schneller als Uran. E. Rutherford untersuchte den Zerfall der verschiedenen radioaktiven Elemente (1902) und machte diesen durch die Zerfallsgleichung berechenbar. (Nobelpreis 1908)

<sup>4</sup>Für einen gegebenen nicht stabilen Atomkern gibt es keine Möglichkeit vorherzusagen, wann er zerfallen wird. Jedoch hat sich gezeigt, dass sich die Wahrscheinlichkeit (Zerfallskonstante  $\lambda$  mit Einheit 1/s) für den Zerfall innerhalb des nächsten Zeitabschnitts sehr gut angeben lässt. Für die Gesamtheit einer grossen Anzahl  $N$  gleichartige Kerne lässt sich daher eine Aussage über die Zerfälle pro Zeiteinheit (Zerfallsrate) machen.

Die Änderung der Anzahl der Teilchen ( $dN$ ) pro Zeiteinheit ist vom Vorzeichen her negativ (es werden ja weniger) und vom Betrag her genauso gross wie die Zerfallsrate (jeder Zerfall entspricht einem radioaktiven Prozess), die aber positiv gezählt wird. Die Zerfallsrate selbst ist das Produkt aus Anzahl der Kerne  $N$  und der Zerfallskonstante  $\lambda$ . Wir können also schreiben:

Das Bemerkenswerte an dieser Aussage ist, dass  $dN/N$  **völlig zeitunabhängig** ist. Ganz anders als für Lebewesen, deren Todeswahrscheinlichkeit entscheidend vom bisher erreichten Alter abhängt - 100jährige haben eine extrem höhere Todesrate als 20jährige - hängt die Zerfallswahrscheinlichkeit von Atomkernen überhaupt nicht von ihrem bisherigen Lebensalter ab.

Die obige Gleichung stellt also eine differentielle Gleichung dar, die den radioaktiven Zerfall beschreibt. Wollen wir die Anzahl der noch vorhandenen Kerne  $N$  zum Zeitpunkt  $t$  wissen - ausgehend von  $N_0$  Kernen zum Zeitpunkt  $t_0$  - so müssen wir beide Seiten jeweils integrieren, Mathematik ...  $\rightarrow$

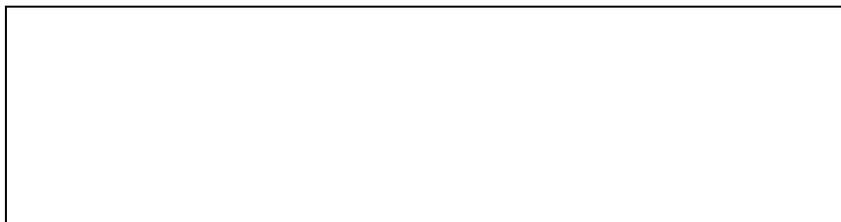
### Zerfallsgesetz

Bei einem radioaktiven Stoff mit der Zerfallskonstanten  $\lambda$  sind von anfänglich  $N_0$  Kernen nach der Zeit  $t$  noch

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Kerne vorhanden.

Die **Halbwertszeit**  $T_{1/2}$  ist die Zeit, die vergeht, bis die Anzahl der anfangs vorhandenen radioaktiven (also instabilen) Atome durch Zerfall auf die Hälfte abgenommen hat. Es gilt also:



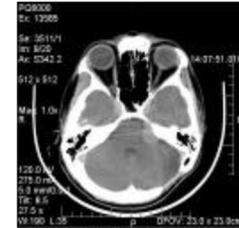
<sup>4</sup> From

<http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/atombau/atomkerne.vlu/Page/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/atombau/zerfallsgesetz.vscml.html>

## 9.17 Exkurs: Radioaktivität in der Medizin

### Computertomografie (CT)

Die Computertomografie (CT) gehört zu den radiologischen Untersuchungen (Röntgenuntersuchung) und liefert ein digitales Schnittbild eines ausgewählten Körperteils (Computertomogramm). Sie wird in allen Körperregionen zur Darstellung und Beurteilung verschiedenster krankhafter Veränderungen angewendet. Bei vielen computertomografischen Untersuchungen werden jodhaltige Kontrastmittel intravenös verabreicht.

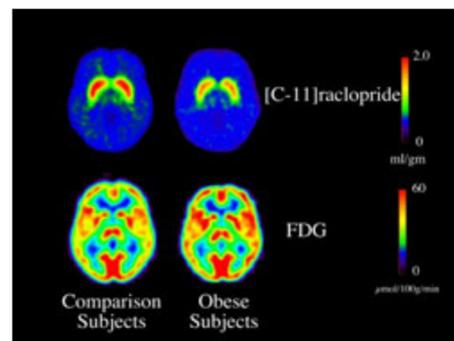


Im Unterschied zur normalen Röntgenuntersuchung wird bei der CT-Untersuchung nicht ein einfaches Schattenbild, sondern ein Schnittbild des betreffenden Körperteils erstellt. Der Computertomograf besteht aus einer rotierenden Röntgenröhre und einem Detektorring. Die Röntgenquelle rotiert bei der Aufnahme um das ausgewählte Körperteil (zum Beispiel um den Bauchraum) des Patienten, während die gegenüberliegenden Röntgendetektoren die durch die Organstrukturen des Patienten mehr (Knochen, Kontrastmittel) oder weniger (Weichteile) abgeschwächten Röntgenstrahlen erfassen.

Die aufgezeichneten Röntgenstrahlen werden in digitale Daten umgewandelt und in einen Rechner zur Bildbearbeitung eingespeist. Aus der Resorptionsanalyse der Strahlung errechnet der Computer ein Profil mit Flächen hoher Dichte (Knochen und Kontrastmittel, in der Darstellung weiss) und Flächen geringer Dichte (Weichteile, in der Darstellung grau bis schwarz). Das Ergebnis ist eine zwei- oder dreidimensionale Bildrekonstruktion auf einem Computerbildschirm und entspricht einem anatomischen Querschnitt.

### Positronen-Emissions-Tomografie

Die Positronen-Emissions-Tomografie (PET) ist ein nuklearmedizinisches bildgebendes Verfahren zur Überprüfung der Funktion von Organen, die sich der Eigenschaft des Positronenzerfalls bedient. Sie liefert Schichtaufnahmen nach dem Prinzip der Computertomografie. Der Bundesausschuss der Ärzte und Krankenkassen in Deutschland hat die Positronen-Emissions-Tomografie wegen zweifelhaften Nutzens als umstrittene Methode eingestuft.



Während andere Diagnoseverfahren (Röntgen, Magnetresonanztomografie) die Form von Organen und deren krankhafte Veränderung untersuchen, dient die nuklearmedizinische Untersuchung einer Diagnose der Aktivität und der Funktion von Organen und Stoffwechselforgängen sowie der Feststellung von Metastasenbildungen bei einer Krebserkrankung. Im Prinzip wird dabei eine radioaktive Substanz in den Körper eingebracht, deren Strahlung mit speziellen Detektoren registriert und in ein digital bearbeitetes Bild umgesetzt wird.



### Radiotherapie zur Krebsbehandlung

Obwohl die Radioaktivität in einem lebenden Organismus Krebs auslösen kann, werden nukleare Strahlungen erfolgreich zur Therapie verschiedener Krebsarten eingesetzt.

Die Radiotherapie zur Krebsbehandlung beruht auf der **höheren Empfindlichkeit** von Krebszellen gegenüber nuklearen Strahlungen im Vergleich zu gesunden Zellen.

Zur Radiotherapie werden  $\gamma$ -Strahlen eingesetzt, die von einem  $\gamma$ -Strahler ausgesandt werden. Das Nuklid  $\text{Ra}226$ , eine natürliche  $\gamma$ -Quelle, ist inzwischen weitgehend durch das künstliche (in einem Kernreaktor synthetisierte) Radioisotop  $\text{Co-60}$  abgelöst worden, das heute die wichtigste Strahlenquelle zur Radiotherapie darstellt.

Dabei ist es entscheidend, die richtige Dosis zu finden, welche ausreichend ist, um die Krebszellen zu zerstören, ohne dabei die gesunden Nachbarzellen zu schädigen. Intensität und Zeitdauer der Strahlungsexposition sind deshalb kritische Größen in dieser Art der Krebstherapie.

Abgesehen von der Exposition der befallenen Stellen des menschlichen Körpers mit einer externen  $\gamma$ -Quelle beinhalten andere Strategien die direkte Einführung der radioaktiven Quelle in den Körper.

Nachfolgende Ausführungen genereller Natur<sup>5</sup>:

Der Vorteil einer Radiotherapie im Vergleich zu einer Chemotherapie liegt zum Teil darin, dass Strahlentherapie auch makroskopische Größenordnungen dauerhaft kontrollieren kann, während dieser Wirkungsgrad durch Chemotherapie allerhöchstens im mikroskopischen Bereich erreicht werden kann. Ein weiterer grundsätzlicher Unterschied liegt darin, dass die Strahlentherapie eine lokale Massnahme darstellt, während die Chemotherapie systemisch im gesamten Organismus wirkt.

### Medikamentöse Tumortherapie<sup>6</sup>

Tumorzellen teilen sich rascher als gesunde Zellen. Auf diesem Unterschied beruht die Wirksamkeit von Medikamenten, die bei einer Chemotherapie verabreicht werden. Die verwendeten Medikamente werden Zytostatika genannt (kytos = Zelle, stasis = Stillstand). Die Wahl des Medikaments richtet sich nach dem Tumor: Gewisse Zellen sind empfindlicher gegen ein bestimmtes Produkt, andere gegen ein anderes oder gegen die Kombination mehrerer Produkte. Meistens werden Zytostatika direkt in die Blutbahn (intravenös) verabreicht. Sie gelangen in alle Zellen des Körpers und wirken auch auf gewisse gesunde, sich häufig teilende Zellen, wie Haarwurzeln und Schleimhäute in Mund, Magen und Darm. Dies erklärt den Haarausfall, die Übelkeit und den Durchfall, die bei der Behandlung unangenehm in Erscheinung treten können. Das Knochenmark, das die Blutkörperchen herstellt, reagiert auf die Behandlung ebenfalls empfindlich. Damit es sich erholen kann, wird zwischen den Behandlungszyklen eine Pause eingelegt.

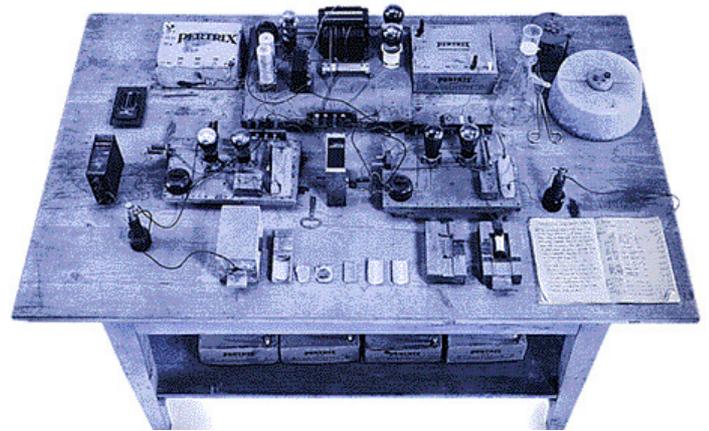
<sup>5</sup> <http://gin.uibk.ac.at/oegro/onkologisch/ablauf.html>

<sup>6</sup> [http://www.swisscancer.ch/dt/content/tuerkis/krebstherapien\\_content.php](http://www.swisscancer.ch/dt/content/tuerkis/krebstherapien_content.php)



## 9.18 Kernspaltung

Otto Hahn (Nobelpreis 1945 für Chemie) und Fritz Strassmann versuchten 1938, Transurane (Elemente mit einer höheren Ordnungszahl als Uran) zu erzeugen, indem sie natürliches Uran mit Neutronen beschossen. Statt eines Transurans fanden sie aber Barium-144. Lise Meitner und Otto Robert Frisch erkannten als Erste die Bedeutung dieses Ergebnisses: Es hatte eine Kernspaltung stattgefunden:



Arbeitsplatz an welchem die erste Spaltung eines Atoms durchgeführt wurde

Die Spaltung des Urankerns ist eine Sensation, denn seit der Antike gilt das »Atomos« als unteilbarer Bestandteil der Materie. Die Versuchsergebnisse richtig zu deuten, ist die grosse Leistung von Otto Hahn, Fritz Strassmann und Lise Meitner (1878 - 1968). Sie entwickeln die chemische Ultramikroanalyse, die es ermöglicht, winzige Mengen eines entstandenen Stoffes richtig zu bestimmen.

### Von der Kernspaltung...

Otto Hahn und Fritz Strassmann veröffentlichen 1939 die Entdeckung der Kernspaltung. Ihr Experiment und das Ergebnis ist in kürzester Zeit weltbekannt. Probleme bereitet aber die theoretische physikalische Deutung. Hier machen sich Lise Meitner und Otto Robert Frisch verdient. Lise Meitner arbeitet bereits seit 1907 mit Otto Hahn zusammen, muss aber als Jüdin im Sommer 1938 nach Schweden emigrieren.

Überall baut man Hahns Versuche nach und bestätigt die Ergebnisse. Werden weitere Details zum Spaltprozess bekannt: Die Kernenergiemengen und neue Neutronen frei, die weitere Atome Kettenreaktion ist möglich. 1942 gelingt Forschern in Chicago Kettenreaktion. Drei Jahre später fallen Atombomben auf gasaki.



gebnisse. Schnell spaltung setzt grosse spalten können: Eine schliesslich die erste Hiroschima und Na-

### ...zur Spaltung der Gesellschaft

Während Atombomben die internationale Politik bestimmen, glauben viele Menschen den süßen Verheissungen friedlicher Kernkraft. Die Kernkraft werde Flugzeuge, Lokomotiven und Autos antreiben, Wüsten und

Polareis in blühende Landschaften verwandeln. Mit radioaktiven Stoffen will man unheilbare Krankheiten besiegen, Pflanzen vor Schädlingen schützen oder Lebensmittel konservieren.

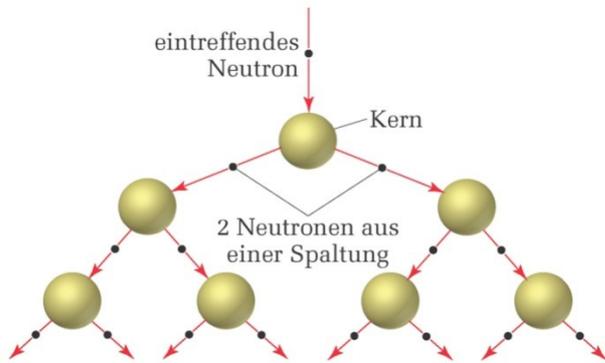
Die Realität hat die Atom-Visionen der 50er Jahre längst widerlegt. Neben der militärischen Nutzung setzen sich nur Kraftwerke durch. Atomkraftwerke decken heute etwa 40 Prozent des Stromverbrauchs. Doch auch die friedliche Anwendung der Kernkraft ist umstritten.

Störfälle in Kernkraftwerken und das ungelöste Problem, die langlebigen radioaktiven Abfälle unschädlich zu lagern, sorgen für Zweifel an der Sicherheit der atomaren Stromerzeugung. Auseinandersetzungen um die friedliche Nutzung der Kernspaltung spalten seit Jahren die Gesellschaft.





## Kettenreaktion

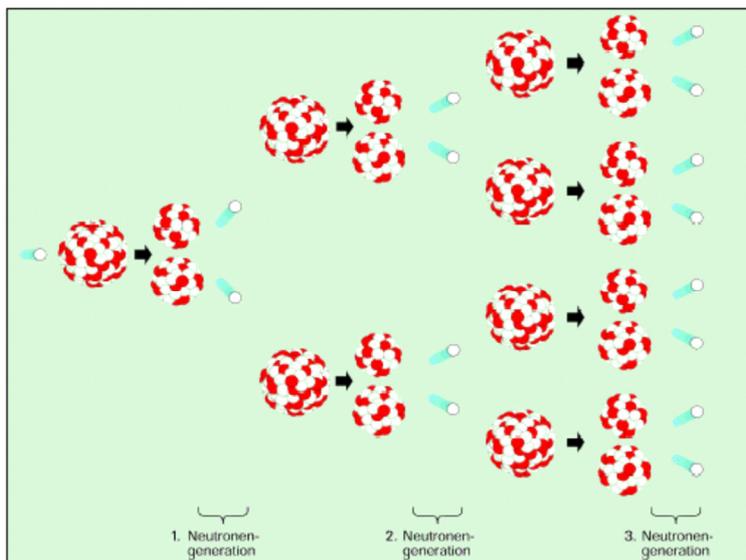


Eine Spaltungs-Kettenreaktion. Unter der Annahme, dass jede Spaltung zwei Neutronen freisetzt, verdoppelt sich die Anzahl der Spaltungen nach einem Potenzgesetz bei jedem Schritt und die Spaltrate steigt schnell an.



### Kettenreaktion im Uran-235

Hahn und Strassmann äusserten bereits in ihren beiden ersten Aufsätzen über die Kernspaltung die Vermutung, dass **neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen entstehen müssten**. Dies wurde von dem französischen Forscher Joliot im März 1939 experimentell bestätigt. Damit hatte man die Möglichkeit erkannt, **einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen**. Unter geeigneten Bedingungen können nämlich die freigesetzten Neutronen sofort weitere Uranatome spalten, so dass ein lawinenartig ablaufender Spaltprozess entsteht. Er wird allgemein als **Kettenreaktion** bezeichnet. Geht man davon aus, dass nach jeder Spaltung zwei freie Neutronen zur Verfügung stehen (tatsächlich sind es im Mittel 2,3), sind es in den weiteren Schritten 4, 8, 16, 32, 64, 128 usw. Wenn genügend Urankerne vorhanden sind, keine Neutronen nach aussen verloren gehen oder von Fremdatomen eingefangen werden, verdoppelt sich die Anzahl der Kernspaltungen von Neutronengeneration zu Neutronengeneration, und der gesamte Vorgang läuft lawinenartig ab. Dabei werden ungeheure Mengen an Energie in kürzester Zeit frei. Die Lebensdauer einer Neutronengeneration liegt im Bereich von milliardstel Sekunden!



Eine Reaktionsfolge, bei der sich ein Reaktionspartner immer wieder neu bildet, sodass die einmal in Gang gesetzte Reaktion von selbst weiterläuft, nennt man **Kettenreaktion**.

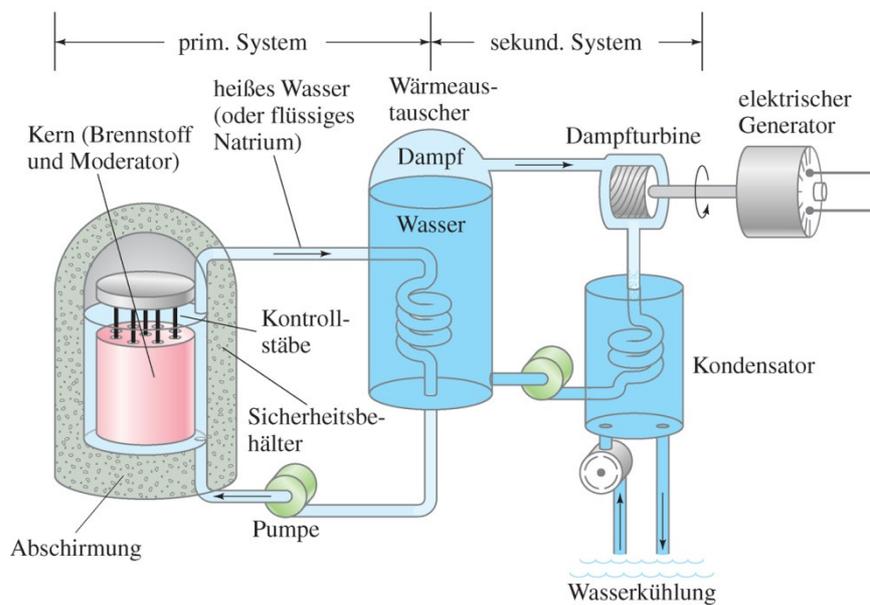
Die erforderliche Mindestmenge an spaltbarem Material, mit der eine Kettenreaktion in Gang gesetzt werden kann, wird **kritische Masse** genannt. Die kritische Masse von  $^{235}\text{U}$  beträgt 15 kg und von  $^{239}\text{Pu}$  4 kg.

Die Freisetzung von Neutronen bei einer Kernspaltung erlaubt eine kontinuierlich ablaufende Folge von Kernspaltungen. Zur stabilen Aufrechterhaltung einer solchen Kettenreaktion ist es notwendig, dass im Mittel eines der bei einer Kernspaltung freigesetzten Neutronen einen weiteren Atomkern spaltet.

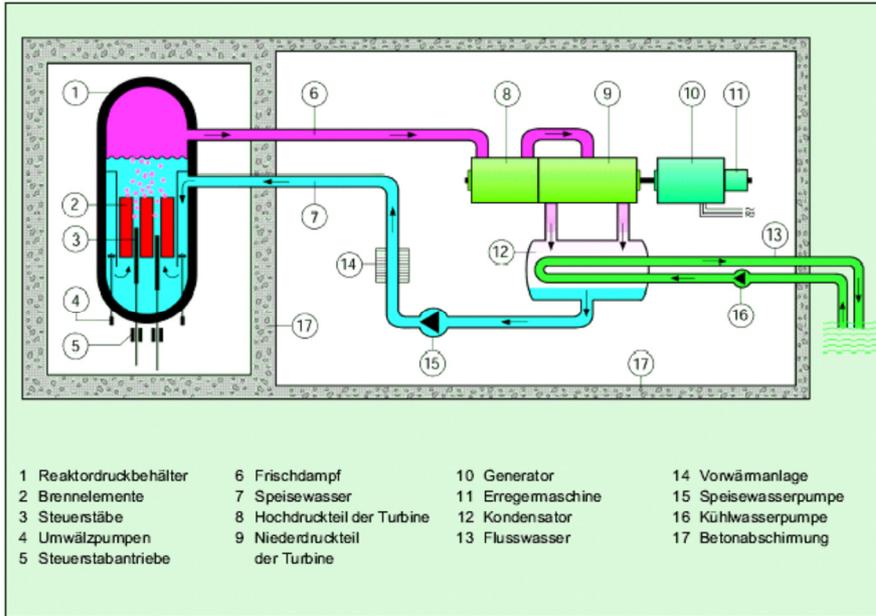
- Falls mehr als eines der freigesetzten Neutronen eine Kernspaltung bewirkt, nimmt die Anzahl der Reaktionen mit der Zeit exponentiell zu: Eine Explosion findet statt.
- Falls weniger als eines der freigesetzten Neutronen eine Kernspaltung bewirkt, nimmt die Anzahl der Reaktionen mit der Zeit exponentiell ab: Die Reaktion endet.

Technisch ist es notwendig, genau den Mittelpunkt zu finden. Dabei sind folgende Faktoren von Bedeutung:

- Anordnung des Materials,
- Geschwindigkeit der Neutronen, und
- Materialien im Reaktionsbereich.

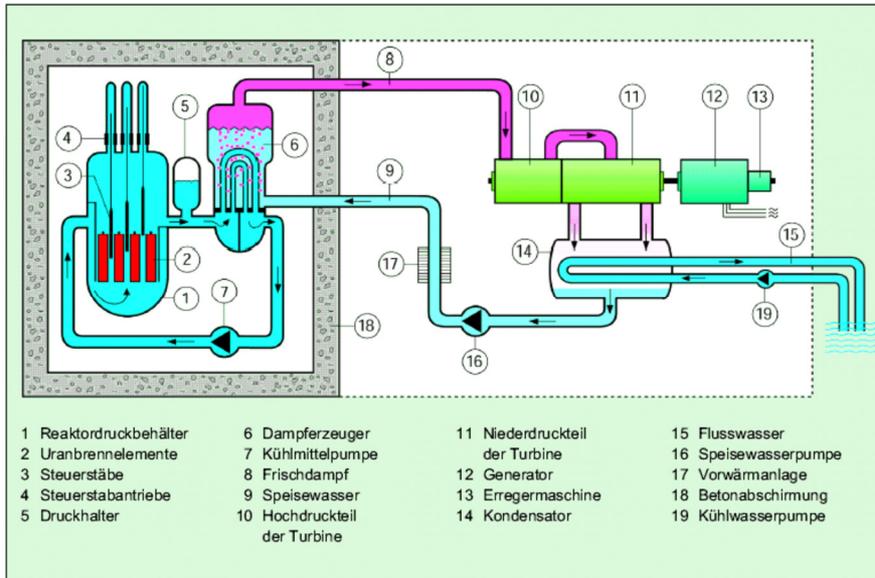


Ein Kernreaktor. Die während des Spaltungsprozesses in den Brennstäben erzeugte Wärme wird von heißem Wasser oder flüssigem Natrium aufgenommen und zur Erzeugung von Wasserdampf in einem Wärmeaustauscher benutzt. Der Dampf treibt eine Turbine an, die elektrische Energie erzeugt, und wird anschließend im Kondensator gekühlt.



**Siedwasserreaktor**  
(Leibstadt sowie Mühleberg, Schweiz)

**Druckwasserreaktoren**  
(Beznau I (seit 1969), Beznau II (seit 1971) und Gösgen (seit 1979))



Nenne einige Unterschiede eines Siedwasserreaktors resp. eines Druckwasserreaktors.



## 9.19 Exkurs Tschernobyl

Notizen zum Film: BBC/Blick Tschernobyl



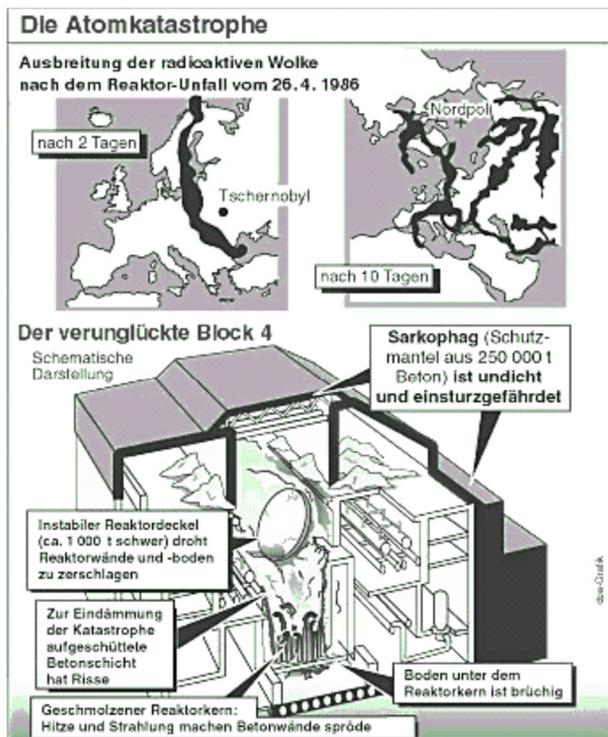


Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl am 26. April 1986 ist der folgenreichste Vorfall in der über 50jährigen Geschichte der Kernenergienutzung. Die beträchtliche Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten führte zu einer starken Belastung der Rettungsmannschaften und der Bevölkerung in der Nähe des Standorts. In vielen Ländern der Welt waren die Menschen in den Tagen nach dem Unfall besorgt über die ungewissen Folgen dieses Ereignisses, was durch die zögerliche Informationspolitik der sowjetischen Behörden noch verstärkt wurde. Ursachen, Hintergründe und Folgen des Unfalls sind in den vergangenen zehn Jahren von verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen untersucht und bewertet worden. Mittlerweile ergibt sich ein einigermaßen geschlossenes Bild.



### Der Tschernobyl-Reaktor

Bei den **RBMK-Reaktoren** (russische Bezeichnung für einen heterogenen, wassergekühlten, graphitmoderierten Druckröhrenreaktor) handelt es sich um eine sowjetische Reaktorlinie, die entwickelt wurde, um ursprünglich nicht nur Strom, sondern auch **Plutonium für militärische Zwecke** zu gewinnen. Im Vergleich zu deutschen und schweizerischen Kernkraftwerken weist die Konzeption dieser Reaktoren einige schwerwiegende Nachteile auf, die auch für den Unfall in Tschernobyl wesentlich mitverantwortlich waren. Die RBMK-Reaktoren sind **nicht inhärent** sicher, wie es bei den gängigen westlichen Reaktoren der Fall ist. Sie haben zudem **keine druck- und gasdichte Hülle** (Containment), die das Reaktorgebäude umschliesst, und zeigen **erhebliche Defizite bei den Sicherheitseinrichtungen und Notkühlsystemen**. Obwohl die technischen Mängel der RBMK-Reaktoren einzelnen sowjetischen Fachleuten bekannt waren, wurden sie weder abgestellt, noch in Form entsprechender Betriebsbeschränkungen den Betriebsmannschaften bewusst gemacht.



Typisch an RBMK-Reaktoren ist, dass der **Dampfblasenkoeffizient positiv** ist: Bei Leistungs- und Temperatursteigerung nimmt auch die Kettenreaktionsrate immer schneller zu. Dieser Effekt war u. a. eine der physikalischen Ursachen für den Unfall. Bei den RBMK-Anlagen ist zudem aufgrund der Grösse des Reaktorkerns und des positiven Dampfblasenkoeffizienten im Vergleich zu westlichen Anlagen eine aufwendigere Überwachung und Regelung nötig.

Der Unfall ereignete sich während eines Tests, bei dem geprüft werden sollte, ob man bei einem Stromausfall die Rotationsenergie der Turbine noch übergangsweise zur Stromerzeugung nutzen kann, bis die Notstromaggregate hochgelaufen sind. Etwa eine Minute nach Testbeginn gab es im Reaktor einen jähen Leistungsanstieg. Augenzeugen ausserhalb des Reaktors beobachteten zu diesem Zeitpunkt zwei Explosionen mit Materialauswurf. Die Anlage wurde stark beschädigt. Die Feuerwehrleute und die Hilfsmannschaften mussten mangels Erfahrung mit derartigen Unfällen improvisieren. Durch Wassereinspeisung, Abwurf verschiedener Materialien aus Militärhubschraubern und Einblasen von Stickstoff gelang es, die Freisetzung der radioaktiven Schadstoffe allmählich zu verringern. Aus der Region um

den havarierten Reaktor wurden in den ersten Tagen über 100.000 Menschen evakuiert. Nach ersten Untersuchungen ging man noch davon aus, dass menschliche Fehlhandlungen in Verbindung mit Systemschwächen der RBMK-Reaktorlinie den Unfall verursachten. Mittlerweile sieht man in den Systemschwächen die wesentlichen Ursachen.

### Erste Schutzmassnahmen

Da keine Katastrophen- und Notfallpläne existierten und auch keine Erfahrungen mit derartigen Unfällen vorlagen, mussten die Fachleute vor Ort über die Massnahmen zur Verringerung der Strahlenbelastungen des Personals und der Umwelt entscheiden. Man konzentrierte sich auf vier Gefahrenschwerpunkte:



- Verhinderung einer erneuten Kettenreaktion;
- Verhinderung eines weiteren Aufheizens der Brennelemente;
- ausreichende Abschirmung der Direktstrahlung;
- Minimierung der Freisetzung von radioaktiven Stoffen.

Die Umsetzung dieser Massnahmen erfolgte schwerpunktmässig in der Zeit vom 26. April bis 2. Mai 1986.

Schnellstmöglich begann man mit über 30 Militärhubschraubern folgende Materialien in den Reaktor zu werfen, in dem zwischenzeitlich als Folge der hohen Temperatur ein Graphitbrand entstanden war:

- ca. 40 t Borkarbid, um eine erneute Kettenreaktion zu verhindern;
- ca. 800 t Dolomit, dessen Zersetzung die Wärmeentwicklung auffangen sollte; gleichzeitig sollte mit Hilfe des entstehenden Kohlendioxids der mehrere Tage andauernde Graphitbrand erstickt werden;
- ca. 2400 t Blei, um durch den Schmelzvorgang die Hitze zu absorbieren und eine gewisse Abschirmung der Gamma-Strahlung zu erreichen;
- ca. 1800 t Sand und Lehm als Filtermaterial für die aus dem Brennstoff freigesetzten radioaktiven Stoffe.



ria-  
pera-

soll-

Wie viel des radioaktiven Inventars (ursprünglich bestand die Kernladung aus rund 200 t Uran) in den Reaktortrümmern blieb, konnte durch Messungen und später durch Bohrungen näherungsweise ermittelt werden. Der wesentliche Teil des Brennstoffs liegt jetzt unterhalb der unteren Reaktorplatte. Die restliche Menge befindet sich noch innerhalb des Kernbereichs bzw. im Bereich der oberen horizontalen Rohre. Insgesamt wurden rund 3,8 % des gesamten Kernbrennstoffs ausgeworfen.

### Erste Evakuierungen

Die Evakuierung der Bevölkerung begann am Sonntag, dem 27. April, nachdem genügend Transportmittel bereitgestellt und die entsprechenden Transportwege auf möglichst geringe radiologische Belastung überprüft waren. Die sowjetischen Behörden rechtfertigten ihre Entscheidung, mit der Evakuierung erst mehr als 24 Stunden nach dem Unfall zu beginnen, damit, dass die Freisetzung von radioaktiven Stoffen am 27. April wesentlich geringer als am Unfalltag war. Die Bewohner der Region wurden allerdings zu spät aufgefordert, in den Häusern zu bleiben. Freiwillige Helfer verteilten **Jodtabletten**. 36 Stunden nach dem Unfall wurden 45.000 Menschen aus der Stadt Pripjat evakuiert. In den folgenden Tagen und Wochen folgte aus dem inzwischen zur **Sperrzone** erklärten Gebiet im **30-km-Radius** um den Reaktor und aus besonders stark betroffenen Gebieten ausserhalb dieser Zone die Evakuierung weiterer **90.000 Menschen**.

### Europa

Aufgrund der meteorologischen Bedingungen wurde die von dem explodierten Reaktor emittierte radioaktive Wolke nach Westen getrieben, wo sie radioaktive Niederschläge in Mitteleuropa verursachte. Diese radioaktive Verseuchung führte zu einer Reihe von Gesundheitsproblemen, weil der niedergeschlagene radioaktive Staub von den Pflanzen absorbiert und somit in die Nahrungskette gelangen konnte.

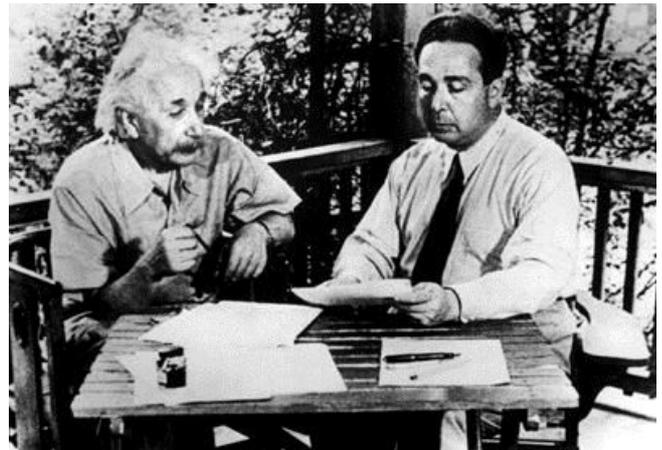
### 9.19.1 Exkurs: Hiroshima / Nagasaki

Die Atombombe trat am 6. August 1945 bei der Zerstörung der japanischen Stadt Hiroshima zum ersten Mal dramatisch in das Bewusstsein der Menschen. Atombomben gehören zusammen mit Wasserstoff- und Neutronenbomben zu den Kernwaffen bzw. nuklearen Sprengkörpern. Glücklicherweise ist die Apokalypse eines Atomkrieges, die viele Jahrzehnte als Drohung über der Menschheit lag, bis heute nicht Wahrheit geworden. Nach Hiroshima wurde nur noch einmal, und zwar am 9. August 1945 in Nagasaki, eine Atombombe gegen Menschen eingesetzt. Seither haben jedoch zahlreiche Versuchsexplosionen, sowohl über- als auch unterirdisch, stattgefunden. Im Besitz von Atomwaffen befinden sich derzeit mit Sicherheit die USA, Grossbritannien, Frankreich, China, Russland, Indien, Pakistan und Israel. Ob auch Nordkorea über A-Waffen verfügt ist nicht sicher.



#### Geschichtliches:

Aus Sorge darüber, dass Hitlerdeutschland in den Besitz der Atombombe kommen könnte, wurde 1942 das so genannte **Manhattanprojekt** unter strengster Geheimhaltung begonnen. Dabei wurden die ersten Produktionsanlagen in Hanford, die ersten Anreicherungsanlagen in Oak Ridge und das erste Atomwaffenlaboratorium in Los Alamos errichtet. Die erste Initiative zu diesem Projekt ging von **Albert Einstein** aus, der am 6. August 1939 ein diesbezügliches Schreiben an den Präsidenten der USA, **Franklin D. Roosevelt**, gerichtet hatte. Anfangs wurde das Schreiben mehr oder weniger ignoriert, was sich aber im Verlauf des Krieges sehr schnell änderte. Das daraufhin begonnene Projekt stand unter der militärischen Leitung von General Leslie Groves und der wissenschaftlichen Leitung von J. Robert Oppenheimer und vereinigte die Elite der damaligen Kern- bzw. Atomphysiker. Das Projekt kostete bis zum Einsatz der Bombe rund zwei Milliarden Dollar, nach heutiger Kaufkraft sicherlich ein zweistelliger Milliardenbetrag. Es waren in der gesamten Zeit bis zu 120.000 Menschen an dem Projekt beteiligt. Die erste Versuchsbombe wurde am 16. Juli 1945 in der Wüste von New Mexiko bei Alamogordo "erfolgreich" gezündet. Die UdSSR zündete am 29.8.1949, Grossbritannien am 3.10.1952, Frankreich am 13.2.1960, China am 16.10.1964 und Indien am 18. Mai 1974 ihre ersten A-Bomben.



#### Rechtliches

Um der zunehmende Verseuchung der Umwelt mit dem fall out der atmosphärischen Kernwaffentests Einhalt zu gebieten, wurde am 5. August 1963 der Vertrag **Limited Test Ban Treaty** in Moskau abgeschlossen und in Kraft gesetzt. Demnach waren alle Kernwaffentests im Wasser, in der Atmosphäre und im Weltraum verboten. Bis heute haben sich alle Länder daran gehalten. Auf Grund dieses Vertrages hatte sich der fall out sehr schnell dramatisch verringert, und spielt heutzutage praktisch keine Rolle mehr in der Strahlenbelastung der Menschen.

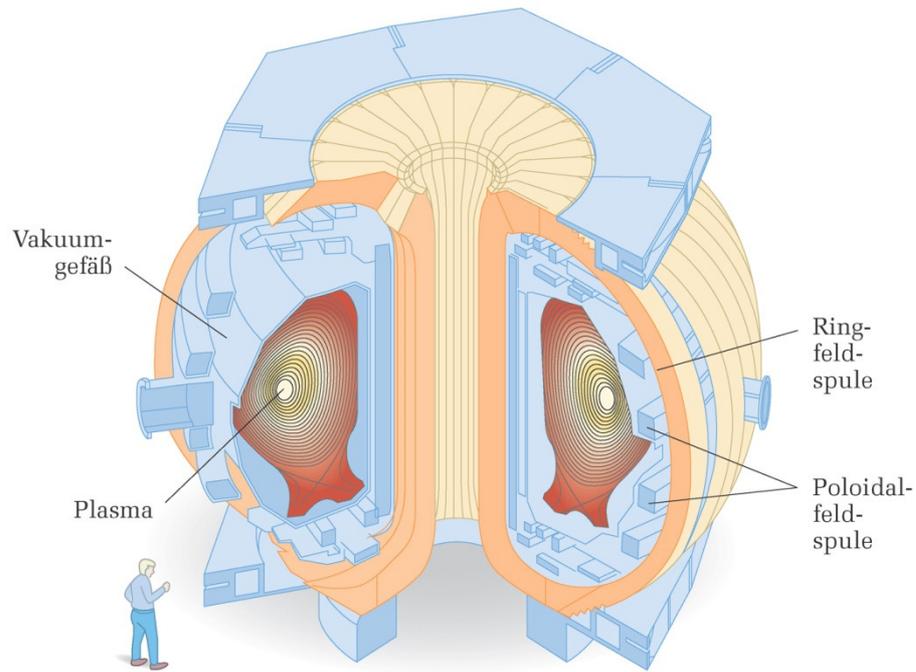
Am 24. September 1996 wurde in Genf der Vertrag über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (Atomtestverbotsvertrag) unterzeichnet. Bis zum Jahr 2003 war der Vertrag von 165 Staaten unterzeichnet, aber nur von 31 Staaten auch ratifiziert worden. Entsprechend dem Vertragstext tritt er aber erst in Kraft, sofern ihn mindestens 44 Staaten ratifiziert haben. Obwohl Präsident Clinton den Vertrag seinerzeit für die USA unterzeichnet hatte, wurde ihm im amerikanischen Senat auf Druck der Rüstungslobby die Zustimmung verweigert.



DVD Blick auf Tage, die die Welt bewegten.  
Hiroshima

Notizen zum Film





Ein Tokamak-Fusionsversuchsreaktor. Im Wesentlichen ist ein Tokamak ein magnetischer „Behälter“, in dem man Atomkerne einschließt und stark erhitzt, um eine Fusionsreaktion herbeizuführen.



### Umweltverträglichkeit und Sicherheit

Fusionskraftwerke haben

- keine Abgase, insbesondere keine Treibhausabgase wie  $\text{CO}_2$ ;
- keine Kernreaktion, die ausser Kontrolle laufen kann, da die Zündbedingungen aufwändig aufrecht-erhalten werden müssen und das Brennstoffinventar im Reaktor klein ist (<500g Superschwerer Wasserstoff);
- weniger radioaktive Abfallprodukte mit geringerer Halbwertszeit im Vergleich zur Kernspaltung;
- keine Verwendung von Kernwaffenmaterialien, daher keine Verbreitungsgefahr von Kernwaffen.

Im Vergleich zur Kernspaltung wird vergleichsweise wenig radioaktives Material erzeugt. Es entsteht aufgrund der Aktivierung der Reaktorbestandteile durch die bei der Fusionsreaktion freigesetzten Neutronen. Durch Verwendung geeigneter Baumaterialien, die allerdings zurzeit erst entwickelt werden, können die entstehenden Nuklide und somit deren Halbwertszeiten kontrolliert werden. Grundsätzlich lässt sich erreichen, dass die Halbwertszeiten der entstehenden Nuklide ganz überwiegend nur Hunderte, nicht aber Zehntausende von Jahren betragen. Entsprechend verringert sich die Problematik der Endlagerung.

Kritiker weisen auf die in weiter Zukunft liegende Verfügbarkeit hin und geben zu bedenken, dass Fragen der Sicherheit und Umweltverträglichkeit erst bei einem weiter entwickelten Konzept beantwortbar seien. Das im Reaktor verwendete und erbrütete Tritium ist radioaktiv so dass nach Inbetriebnahme der Reaktor nur noch mit dementsprechender Schutzausrüstung zugänglich ist. Reparaturen und Wartungsarbeiten am Reaktor müssen daher grossenteils ferngesteuert ausgeführt werden. Fusionsreaktoren wären demnach zwar eine deutliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Atomkraftwerken, aber dennoch nicht so umweltfreundlich wie Wasser-, Wind- oder Sonnenenergie.

Exkurs: Was ist denn überhaupt ein Plasma?

Als **Plasma** (gr:  $\pi\lambda\sigma\mu\alpha$ , das Geformte, das Gebilde) bezeichnet man in der Physik ein (teilweise) ionisiertes Gas, das zu einem nennenswerten Anteil freie Ladungsträger wie Ionen oder Elektronen enthält. Der Plasmazustand wird als vierter Aggregatzustand bezeichnet.

Ein Plasma kann nur durch äussere Energiezufuhr am Leben erhalten werden. Bleibt die Energieeinkopplung aus, so verlischt das Plasma, das heisst die positiven und negativen Ladungsträger rekombinieren zu neutralen Atomen, Molekülen oder Radikalen.

... und was ist ein Plasmabildschirm?

Beim Plasmabildschirm macht man sich die Lichterzeugung und Emission von UV-Strahlen zu Nutze. Die Funktionsweise ähnelt der einer Leuchtstoffröhre: Zwei erwärmte Kathoden geben Elektronen ab, die dann auf Quecksilberdampf treffen. Dieser wird dadurch zur Emission von ultraviolettem Licht angeregt. Dieses Licht bringt nun eine Phosphorschicht zum Leuchten.





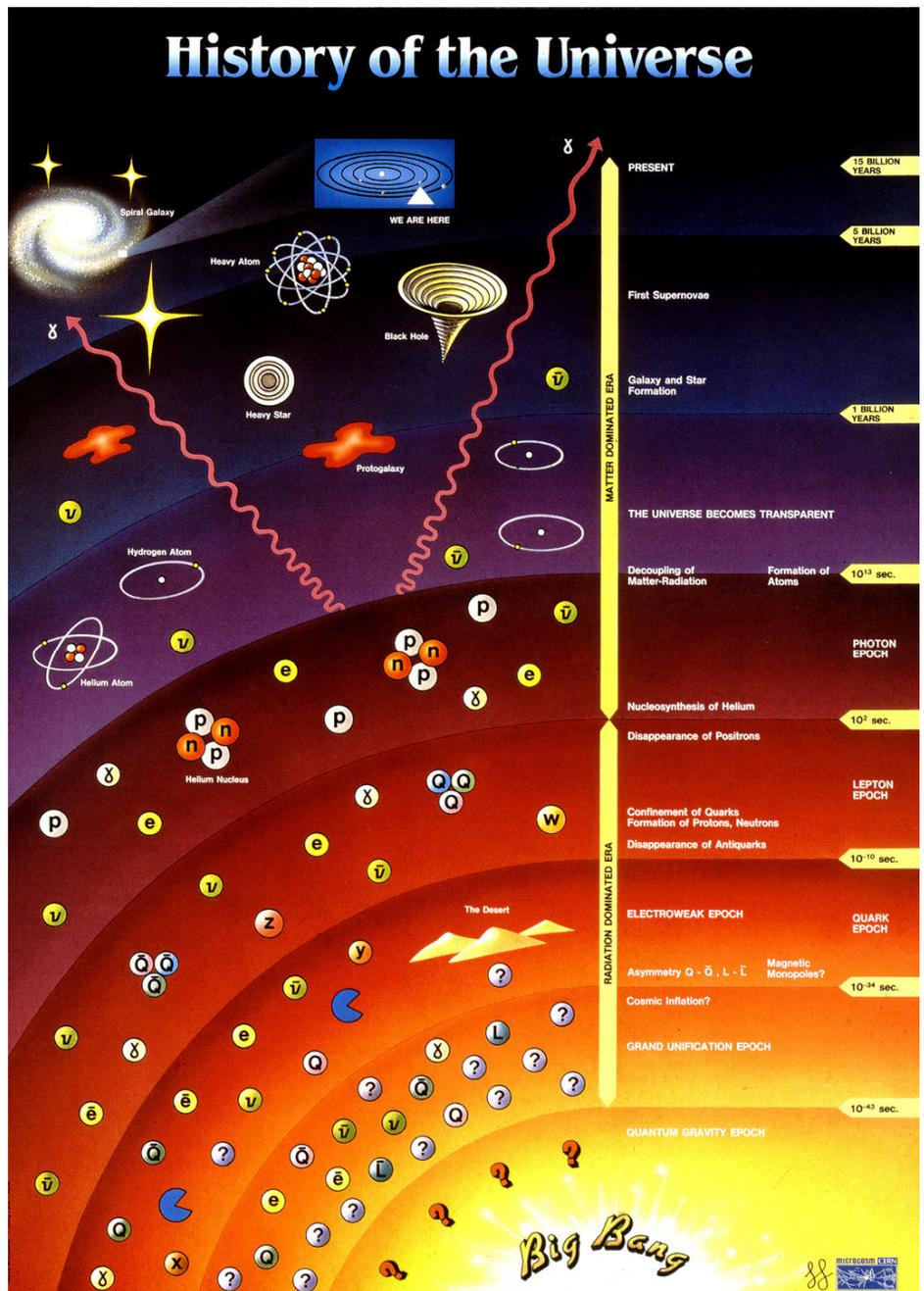
### 9.20 Entstehung des Universums und der Elemente<sup>7</sup>

Unser Universum ist vor ca. 15 bis 20 Milliarden Jahren in einem gigantischen Knall entstanden. Davon gehen heute die meisten Wissenschaftler aus, obwohl diese Theorie auch unter Fachleuten nicht unumstritten ist. Nach der Urknall-Theorie war die gesamte Materie des Universums zum Zeitpunkt 0 auf einem einzigen Punkt konzentriert bevor sich der "Schöpfungsknall" entlud und unsere Wirklichkeit gegenwärtig werden liess. Dieser 'Knall' wird auch als

umschrieben.

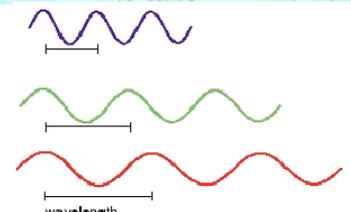
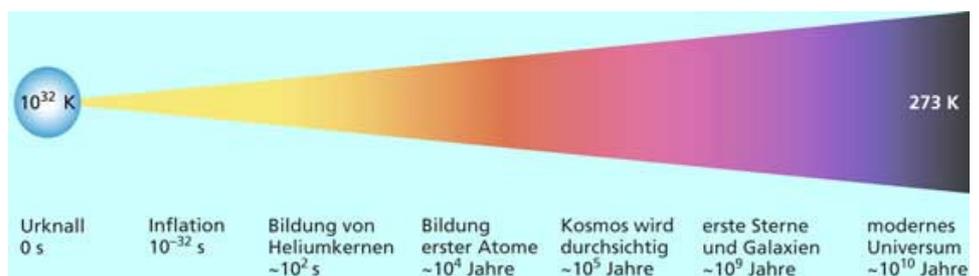
#### Urknall

Man nimmt heute an, dass die gesamte Masse des Universums vor etwa 15 Milliarden Jahren in einem Kern enormer Dichte ( $10^{26}g/cm^3$ ) und Temperatur ( $10^{32}K$ ) zusammengeballt vorgelegen hat. Bei dieser Explosion bildeten sich während der kosmischen Verteilung der Materie in wenigen Minuten zu



Das Universum expandiert und kühlt sich seit diesem Zeitpunkt immer weiter ab. Diese Prozesse gehen langsam vor sich. Sie dauern Milliarden von Jahren. Daher wurden aus dem im Urknall gebildeten Wasserstoff und Helium bis heute erst weniger als 2 % in weitere Elemente umgewandelt. Je mehr Sterne entstehen und je älter das Universum dabei wird, umso grösser wird der Anteil der schweren Elemente. Der Anteil dieser schweren Elemente müsste demnach früher, im jungen Universum, geringer gewesen sein.

Direkte Beweise für diesen

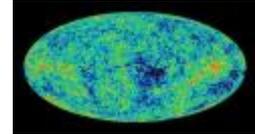


<sup>7</sup> Graphik von www.cern.ch

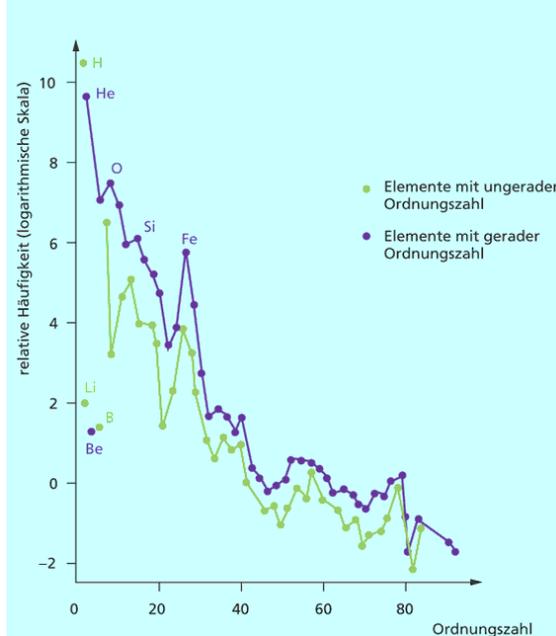


Urknall gibt es natürlich nicht, die Wissenschaft lieferte bisher aber mindestens zwei plausible Hinweise:

- Ist die Big-Bang Theorie richtig, dann müssten sich alle Punkte im Universum voneinander entfernen, vergleichbar mit Teilchen auf der Hülle eines Luftballons, der aufgeblasen wird. Dieses ‚voneinander entfernen‘ wird tatsächlich beobachtet und kann mittels dem **Doppler-Effekt** nachgewiesen werden. Wenn sich eine Lichtquelle vom Beobachter entfernt, so werden die Wellenlängen des Lichts länger, das heisst, sie verschieben sich in den roten Bereich des Spektrums, die sogenannte Rotverschiebung. Vergleiche dazu die Analogie eines Zug-Signals, welcher auf einem zufährt und sich dann wieder entfernt!
- Die kosmische **Hintergrundstrahlung** breitet sich mehr oder weniger gleichmässig am Himmel aus. Diese Strahlung kommt von der Bewegungsenergie der im Weltall vorhanden Materie.



Kosmische Häufigkeitsverteilung der Elemente



Die heutige Häufigkeitsverteilung der Elemente zeigt nebenstehende Abbildung. Eindeutig ersichtlich ist, dass Elemente mit gerader Ordnungszahl häufiger vorkommen! Warum wohl?

Hinweis: Elemente mit Ordnungszahl 3 und höher konnten sich nur durch Kernfusion (Verschmelzen zweier Kerne) von H, He oder mit sich selbst bilden.

Die Verteilung von Elementen in der Erdatmosphäre, Lithosphäre und im Menschen ist nachfolgender Tabellen zu entnehmen:

Häufigkeit der Elemente. Die Zahlen geben an, wie viele Atome von insgesamt 100000 Atomen auf das jeweilige Element entfallen

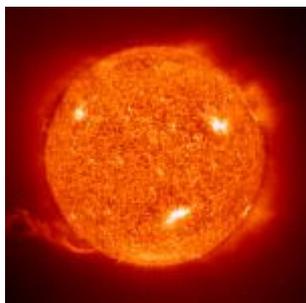




### 9.20.1 Kernsynthese leichter Elemente im Sterninneren

Die Entstehung der leichten Elemente aus Protonen (Wasserstoffatome) spielt sich im Inneren der Sterne ab. Durch Kernfusion werden die Protonen zu Helium verbrannt. Allgemein Kernfusion:

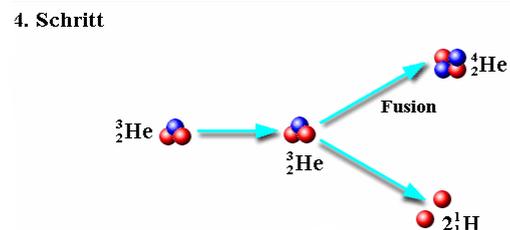
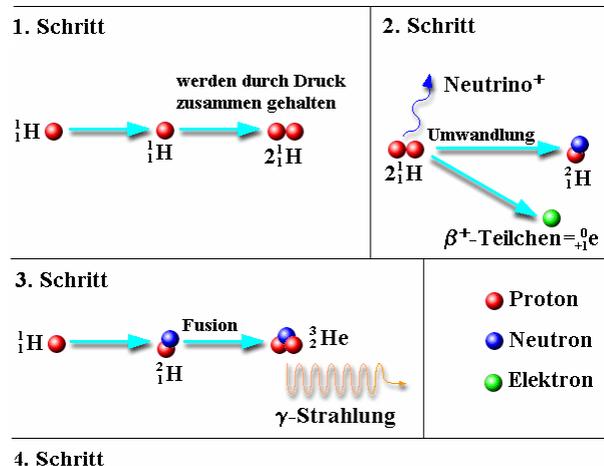
Im Zentrum eines Sterns ist die Temperatur derart hoch (meistens mehr als 10 Millionen Grad Celsius), dass die Kerne der vollionisierten Atome miteinander wechselwirken, wobei es zu Kernfusionen kommt. Im Zentrum der Sonne wird durch Fusion Wasserstoff (H) zu Helium (He), wobei die Masse des He-Atoms etwas geringer ist als die Masse der vier benötigten H-Atome. Der Massenunterschied führt wegen  $E=mc^2$  zu der Umwandlung von Masse in Energie. Die Fusion von H zu He läuft über verschiedene Prozesse ab. Der wichtigste ist die sogenannte Proton-Proton-Kette. Darin verschmelzen H-Atome über Zwischenschritte zu He.



Zwei Wasserstoffkerne (Protonen), von denen jeder nur aus einem (positiv geladenen) Proton besteht, stoßen zusammen und bilden unter Abgabe eines Positrons ( $e^+$ , das positiv geladene Antiteilchen des Elektrons), eines Neutrinos ( $\nu$ ) und von Energie (Massendefekt!) einen Deuteriumkern (1 Proton und 1 Neutron). Das Deuterium fusioniert in kurzer Zeit (binnen Sekunden) mit einem weiteren Proton unter Abgabe eines Gammaquants zu dem Heliumisotop  $^3\text{He}$ . Danach reagiert das  $^3\text{He}$ -Isotop mit einem weiteren  $^3\text{He}$ -Isotop zu Helium unter Energieabgabe. Dieser Prozess findet in unserer Sonne und in all den Sternen statt, die ungefähr eine Sonnenmasse haben.

Kurz:

Der Proton-Proton-Zyklus  
(in der Brennzzone der Sonne)



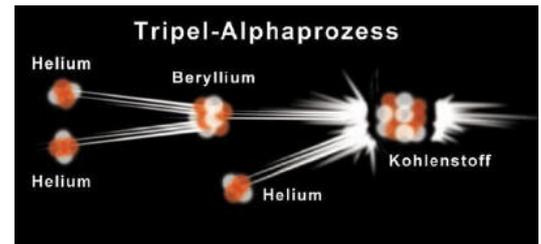


Pro Sekunde werden

in Energie umgewandelt. Diese Energie wird in Form von Gammastrahlen frei, welche aus Quanten bestehen. Die Quanten durchdringen die Hülle der Sonne und brauchen dazu ca. eine Million Jahre. Auf diesem Wege werden sie in energieärmere Lichtquanten umgewandelt. Der Brennstoff unserer Sonne reicht noch ca.

Wenn dieser Wasserstoffvorrat im Inneren eines Sternes irgendwann zu Ende ist, lässt der Gasdruck nach, eine Kontraktion des Sternkerns erfolgt, es kommt zu einer Erhöhung der Zentraltemperatur (etwa 100 Millionen Kelvin) und das sog. „Heliumbrennen“ setzt folglich ein.

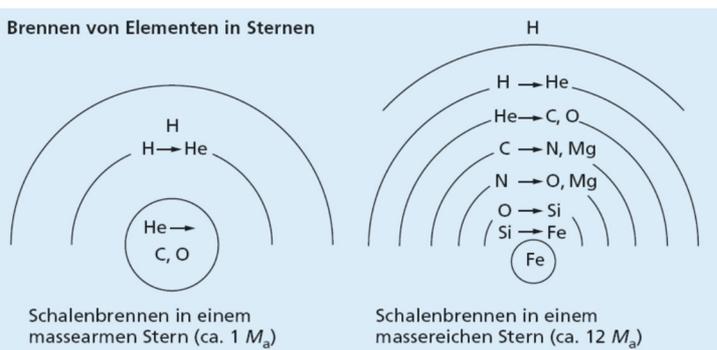
**Heliumbrennen** ist die Vereinigung von drei Heliumkernen zu einem Kohlenstoffkern unter Freisetzung von Energie.



Wenn sich drei Heliumkerne zu einem Kohlenstoffkern vereinigen, wird mehr Energie freigesetzt als beim Wasserstoffbrennen. Bei etwa 200 Mio. Grad kann dann bereits eine Fusion eines Heliumkerns mit einem Kohlenstoffkern erfolgen, wobei wiederum grosse Energiemengen freigesetzt werden.

In Sternen, die **etwa fünf Sonnenmassen** entsprechen, können Temperaturen im Bereich von 500 bis 1 000 Mio. Grad erreicht werden. Hier werden die nächstfolgenden Kernfusionen, das Kohlenstoffbrennen und das Sauerstoffbrennen ausgelöst:

In diesem Temperaturbereich können untergeordnet weitere, komplizierte Fusionsreaktionen - vor allem katalysiert durch Kohlenstoff - ablaufen. Unter den zuvor gebildeten Produkten ist  $^{28}\text{Si}$  ein besonders stabiler Kern, der deshalb angereichert wird. Aufgrund seiner Stabilität reagiert  $^{28}\text{Si}$  erst beim Erreichen von etwa 2 000 Mio. Grad mit Heliumkernen in einer komplizierten Reihe von Fusionsprozessen nach der allgemeinen Reaktionsgleichung:



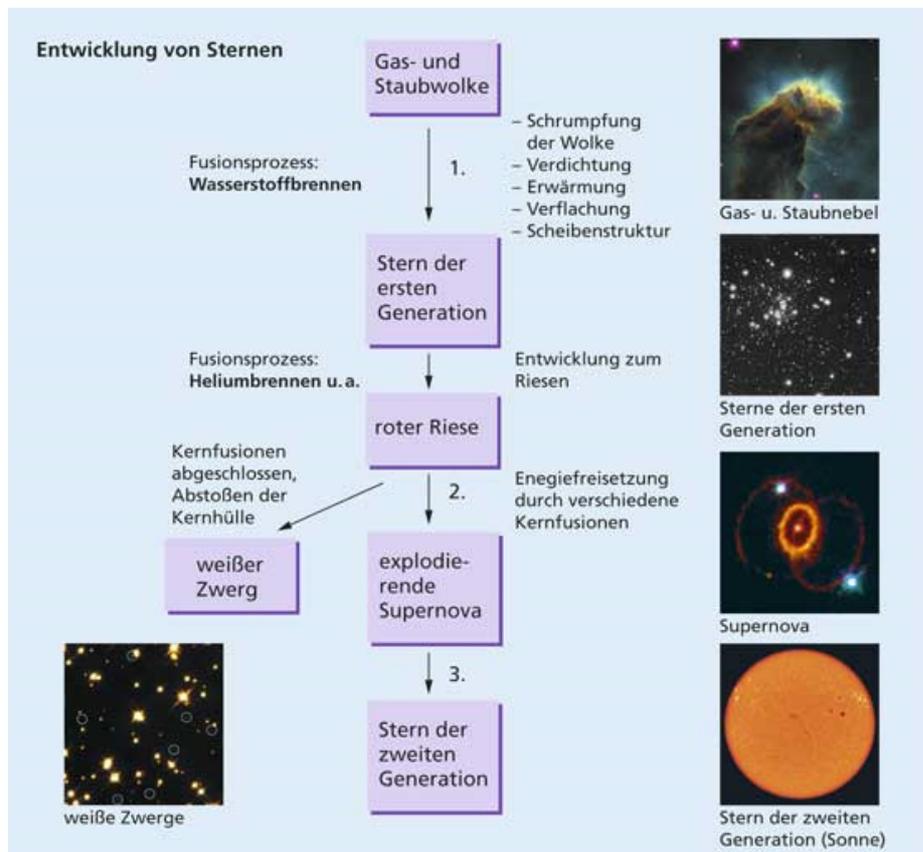
Im Zentrum des Sterns ist die Temperatur jeweils am höchsten. Deshalb startet jeder neue Fusionsprozess zunächst dort und breitet sich dann vom Zentrum nach aussen aus. Als Ergebnis steigt die Temperatur im Innern weiter, sodass der nächste Fusionsprozess starten kann.



Dabei werden bis zum stabilsten aller Kerne, dem Fe, verschiedene geradzahlige Kerne gebildet. Nur wenn ein Stern gross genug ist, um die dafür notwendigen Temperaturen zu speichern (etwa 30 Sonnenmassen), kann die gesamte Elementskala entstehen. Die grosse Häufigkeit des Eisens im Universum und auf der Erde ist dadurch begründet, dass es den stabilsten aller Atomkerne aufweist.

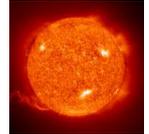
Vereinigen sich Eisenkerne mit leichteren Kernen zu noch schwereren, wird Energie nicht mehr freigesetzt sondern verbraucht. Dabei wird aber keine Fusionsenergie freigesetzt. Die Temperatur im Zentrum des Sterns sinkt sehr schnell. Die äusseren Teile können in dieser Zeit nicht zum Kern herschrumpfen. Sie werden vielmehr an den vom Kern ausgehenden Schockwellen reflektiert. Der Stern leuchtet im gigantischen Lichtschein einer **Supernova** auf.

Bei masseärmeren Sternen, etwa im Bereich einer Sonnenmasse, zündet ebenfalls nach dem Verlassen der Hauptreihe die Heliumfusion. Diese setzt schlagartig ein - man spricht von einem Heliumflash - und führt zu einem kurzzeitigen starken Anwachsens der Leuchtkraft. Nachdem sich in der Folge des Heliumbrennens Sauerstoff und Kohlenstoff im Zentrum des Sterns angereichert haben, geht die Energiefreisetzung ihrem endgültigen Ende entgegen. Zuvor hat sich, wie auch bei den massereichen Sternen, die Sternhülle aufgebläht und den Stern zu einem Riesen werden lassen. Das letzte Stadium der Entwicklung setzt ein, wenn die nur noch locker an den Stern gebundene Hülle in den Weltraum abgestossen wird.





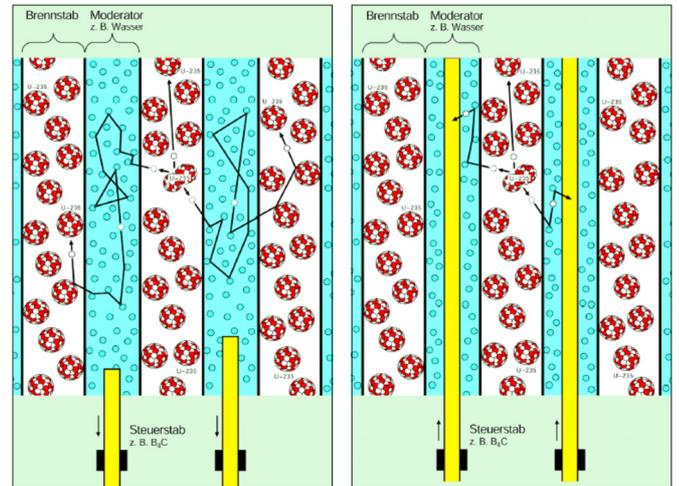
Notizen zu DVD: Die Schöpfung  
Vergangenheit und Zukunft des Universums





Der Zustand eines Reaktors kann durch den Multiplikationsfaktor  $k$  beschrieben werden. Er gibt das Verhältnis der Anzahl der Spaltungen einer Neutronengeneration zur Anzahl der Spaltungen der vorhergehenden Neutronengenerationen an:

Beim so genannten Anfahren eines Reaktors muss der Multiplikationsfaktor grösser als 1 sein ( $k > 1$ , überkritischer Reaktor), damit die Anzahl der Kettenreaktionen ansteigt. Ist ein bestimmtes Leistungsniveau erreicht, wird dafür gesorgt, dass  $k = 1$  gilt (kritischer Reaktor). Bei der Leistungsverringerung oder dem Abschalten eines Reaktors werden die Steuerstäbe zur Absorption der Neutronen zwischen die Brennstäbe eingefahren. Die Kettenreaktion nimmt ab bzw. hört ganz auf ( $k < 1$ , unterkritischer Reaktor). Bei starken Abweichungen vom normalen Reaktorbetrieb oder bei Störfällen kann der Reaktor durch schnelles Einfahren der Absorberstäbe innerhalb weniger Sekunden abgeschaltet werden. Dieser Schnellschuss wird automatisch ausgelöst, kann aber auch durch Betätigen eines Notschalters herbeigeführt werden.



Bei einer Kettenreaktion tritt die Neutronenvermehrung in Bruchteilen von Sekunden auf. Bei der Inbetriebnahme eines Reaktors oder der Steigerung seiner Leistung wäre eine Steuerung mit mechanischen Vorrichtungen nicht möglich, weil sie viel zu langsam wären. Der Ablauf des Spaltungsvorganges selbst kommt den Menschen aber zu Hilfe. Etwa 0,75 % der bei der Spaltung frei werdenden Neutronen werden erst mit einer Verzögerung von durchschnittlich 10 bis 20 s durch die Spaltprodukte abgegeben.

Stellt man bei einer Leistungserhöhung den Reaktor so ein, dass sich die Neutronen von Generation zu Generation nicht mehr als um 0,75 % vermehren, wird der Zuwachs nur durch diese verzögerten Neutronen bewirkt. Die Zeit von 20 s reicht aus, um neutronenabsorbierende Steuerstäbe zwischen die Uran-Brennstäbe zu schieben.



Gucke hier: <http://jupiter.as.arizona.edu/~burrows/movies.html>

Wunderbare Animationen!

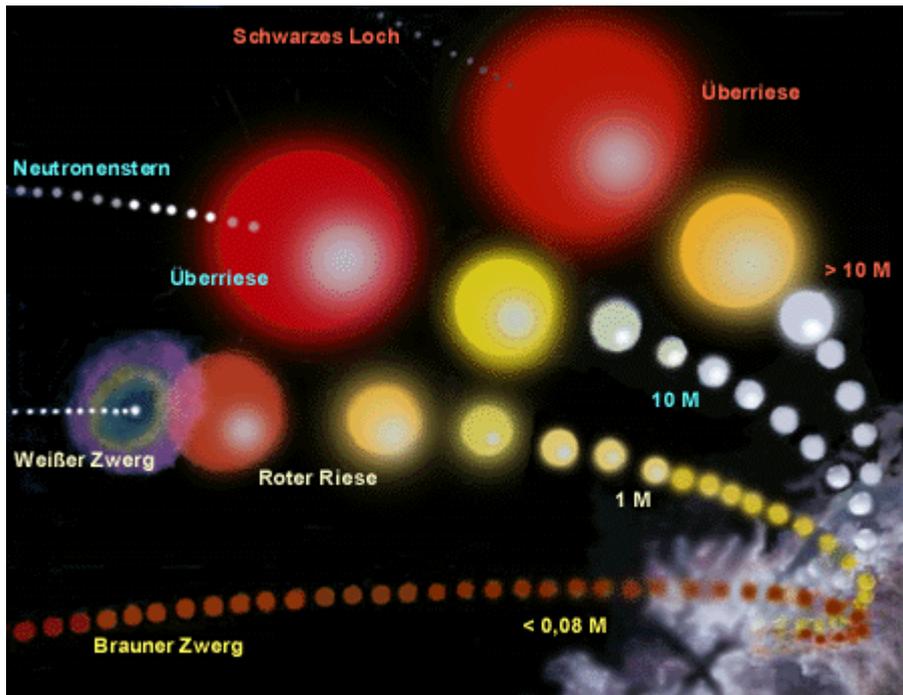
Hier: <http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pOid=10483&pNid=0>

Guter Text mit weiteren Diagrammen zu r, s, rp prozessen inklusive Filmen ... guuuuutttt!

Auch gut:

<http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/elemententstehung/elemententstehung.htm>

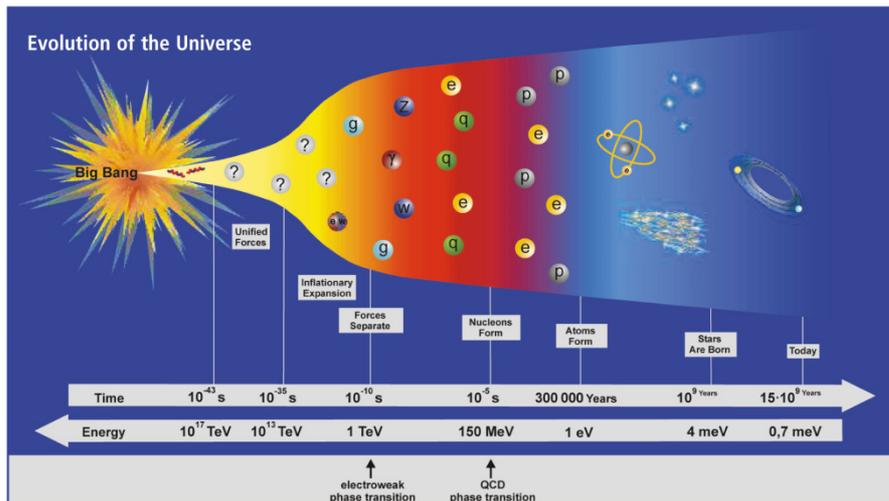
genesis ... : <http://www.genesisnet.info/index.php?Artikel=42484&Sprache=de&l=1>



From: <http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pOid=10473&pNid=0>

Pdf-file mit brauchbaren Bildern:  
<http://www.ieap.uni-kiel.de/et/lehre/skripte/et/ET050610.pdf>

hübsche Bilder:  
<http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node24.html>



From:  
<http://www.fz-juelich.de/nic/Publicationen/Broschuere/Elementarteilchenphysik/universum-e.jpg>



Woher kommt der überschüssige Energiebetrag? Einstein sagte uns dass  $E=mc^2$  gilt. Diese Gleichung besagt, dass jeder Massenverlust ( $m$ ) zu einem Auftauchen von Energie ( $E$ ) führt.  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit. Sie beträgt 300000 km/Sekunde. Ein Heliumkern ist nur 99,3% so schwer wie vier Protonen. Die fehlende Masse wird in Energie umgewandelt. Dies ist die Energie, die einen Stern scheitern lässt und die verhindert, dass er unter seiner eigenen Schwerkraft zusammenbricht.

Erzeugt die Umwandlung so einer kleinen Masse wirklich genug Energie, um die Sonne leuchten zu lassen? Immerhin hat die Sonne eine Leuchtkraft von 390 000 000 000 000 000 000 000 Watt. Die Antwort: Es reicht aus - Du kannst es ja [nachrechnen!](#)

Die Masse eines Protons beträgt  $1,67 \times 10^{-27}$  kg. Beim Proton-Proton-Zyklus werden vier Protonen als Ausgangsmaterial gebraucht. Dabei entsteht ein Heliumkern und zwei Positronen (Die Neutrinos, die ebenfalls beim Proton-Proton-Zyklus entstehen, haben wahrscheinlich keine Masse). Ein Heliumkern hat eine Masse von  $6,6326 \times 10^{-27}$  kg und jedes der zwei Positronen hat eine Masse von je  $9,1139 \times 10^{-31}$  kg. Somit haben die Endprodukte dieser Reaktion eine Masse von "nur"  $6,6344 \times 10^{-27}$  kg. Es fehlt eine Masse von  $4,7227 \times 10^{-29}$  kg. Die berühmteste Gleichung ( $E=mc^2$ ) der Welt gibt uns die Antwort! Wie viel Energie liefern  $4,7227 \times 10^{-29}$  kg? ( $m$  ist die Masse in kg,  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit in m/s und  $E$  die freiwerdende Energie in Joule) Jetzt überlege mal folgendes:

Wir können den Energieausstoß (d.h. die Leuchtkraft) der Sonne messen. Er beträgt  $L=3,9 \times 10^{26}$  J/s. Wenn jede Reaktion im der Proton-Proton-Zyklus  $4,3 \times 10^{-12}$  liefert, wieviel Reaktionen müssen dann pro Sekunde stattfinden, um die Leuchtkraft der Sonne zu erklären?

$$\text{Anzahl der Reaktionen} = 3,9 \times 10^{26} / 4,3 \times 10^{-12} = 9 \times 10^{37}$$

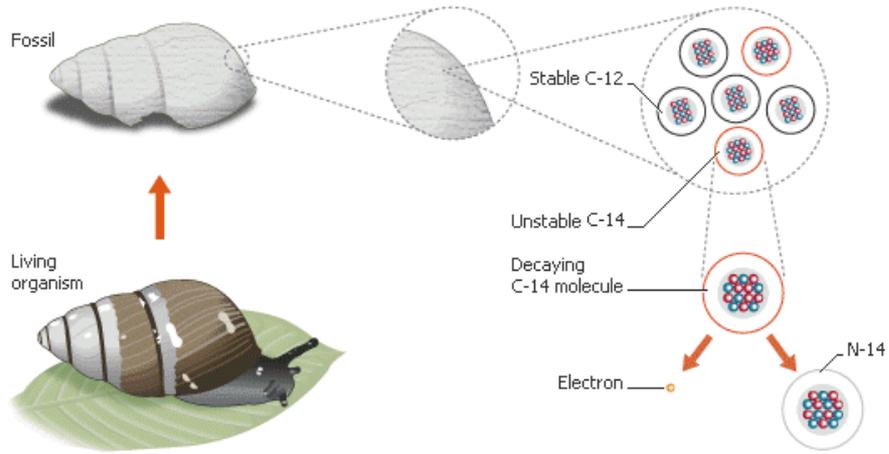
Wie Du dich erinnerst, brauchen wir vier Protonen in jeder Reaktion. Daher brauchen wir pro Sekunde  $3,6 \times 10^{38}$  Protonen! Wieviele Protonen gibt es in der Sonne? Wir können das ganz einfach ausrechnen:

$$\text{Anzahl Protonen in der Sonne} = (\text{Masse der Sonne}) / (\text{Masse eines Protons})$$

$$= 2,0 \times 10^{30} \text{ kg} / 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 1,0 \times 10^{57}$$

Wenn wir  $10^{57}$  Protonen haben und wir pro Sekunde  $10^{38}$  Protonen brauchen, so Reicht unser Protonenvorrat für  $10^{19}$  Sekunden - das sind mehr als 100 000 000 000 Jahre! Aber während ihrer Lebenszeit verbraucht die Sonne nur 10% ihres Vorrats an Protonen





Die zehn häufigsten Elemente der Erde haben bereits einen Anteil von 99,9% an der gesamten Masse der Erdkruste. Viele Metalle können nur deshalb gewonnen werden, weil sie sich als schwerlösliche Verbindungen in Erzlagerstätten angereichert haben. Das gilt auch für die kulturhistorisch wichtigen **Metalle Kupfer, Zinn, Blei und Silber**. Jahrhundertlang sind Lagerstätten bedenkenlos ausgebeutet worden. Erst in jüngerer Zeit werden die noch vorhandenen Vorräte systematisch erfasst. Ausgehend vom gegenwärtigen Verbrauch versucht man abzuschätzen, wie lange die Rohstoffvorräte noch reichen. Danach würden in 60 Jahren die abbauwürdigen Erzlager an Kupfer erschöpft sein, in 75 Jahren die an Blei. Diese Berechnungen berücksichtigen allerdings nur die heutigen Rohstoffpreise. Bei höheren Preisen würde sich auch der Abbau ärmerer Erzlager lohnen.

Begrenzte Reserven haben zu einer verstärkten Entwicklung von Recycling-Verfahren geführt. Mit steigender Tendenz werden bereits gegenwärtig zwischen 35% und 50% der Metalle Kupfer, Aluminium, Eisen, Nickel und Zink aus Metallschrott hergestellt. Noch höher liegt der Recycling-Anteil bei Blei, Silber und Zinn.



Nach einer A-Bomben Explosion

Die Wirkungen einer explodierenden A-Bombe bestehen in einer Druck- und Hitzewelle, in dem Umherfliegen der verschiedensten Gegenstände sowie in der Strahlenbelastung von Menschen. Die Zerstörungskraft einer A-Bombe lässt sich in fünf Zonen unterteilen, die in der folgenden Tabelle dargestellt sind. Die Ausdehnung der Zonen ist dabei stark von der Explosionsstärke der Bombe abhängig.

Zerstörungszonen	Allgemeines	Wirkungen auf den Menschen
<b>Zone 1</b>	Extreme Hitze bis hin zur Verdampfung von Metallen; Überdruck: 1,7 bar; Windgeschwindigkeit: 500 km/h	Nahezu 100 % Todesfälle
<b>Zone 2</b>	Schwerste Zerstörungen; sehr starke Hitze; Überdruck: 1,1 bar; Windgeschwindigkeit: 450 km/h	Weit über 90 % Todesfälle; Der Rest schwerste Verletzungen und Verbrennungen
<b>Zone 3</b>	Schwere Beschädigungen; Starke Hitzewelle; Überdruck: 0,6 bar; Windgeschwindigkeit: 400 km/h	Weit über 60 % Todesfälle; ca. 40 % schwerste Verletzungen einschließlich Verbrennungen
<b>Zone 4</b>	Starke Hitzewelle; Großbrände; Überdruck: 0,4 bar; Windgeschwindigkeit: 220 km/h	Todesfälle 50 %, über 45 % Schwerstverletzte
<b>Zone 5</b>	Starke Beschädigungen durch Hitze und Druck; Überdruck: 0,2 bar; Windgeschwindigkeit: 160 km/h	15 % Todesfälle; über 50 % teilweise Schwerstverletzte, viele durch Verbrennungen

In der folgenden Tabelle sind die Ausdehnungen der Zerstörungszonen in Abhängigkeit von der Sprengkraft dargestellt. Der Vollständigkeit halber sind auch die Zonen für die Explosion von Wasserstoffbomben mit dargestellt.

Explosionskraft	10 Kilotonnen (kt) TNT	1 Megatonne (Mt) TNT	20 Megatonnen (Mt) TNT
<b>mittlere Explosionshöhe</b>	<b>600 m</b>	<b>2 500 m</b>	<b>5 500 m</b>
<b>Zone 1</b> Radius um den Explosionsort	0,8 km	4 km	14 km
<b>Zone 2</b> Radius um den Explosionsort	1,6 km	6 km	22,5 km
<b>Zone 3</b> Radius um den Explosionsort	2,8 km	10,5 km	43,5
<b>Zone 4</b> Radius um den Explosionsort	4 km	12,5 km	50 km
<b>Zone 5</b> Radius um den Explosionsort	4,8 km	16 km	55 km

Man erkennt in den beiden Tabellen, dass es bei der Explosion einer H-Bombe mit einer Sprengkraft von 20 Mt TNT in einem Radius von 14 km praktisch keine Überlebende und in einem Radius von 22 km nur sehr wenige Überlebende geben würde. Selbst in über 50 km Entfernung sind die Auswirkungen noch extrem. Aber selbst bei einer "kleinen" Kernwaffe von 10 kt Sprengkraft ist in einem Radius von rund 5 km mit schwersten Zerstörungen und vielen Toten und Verletzten zu rechnen.

Zeitgeschehen II: Atombombe auf Hiroshima. Was wäre, wenn.... von Niklaus Kreuzsch

6. August 1945. Auf dem US-Flugplatz auf der Pazifikinsel Tinian sitzt Major Paul W. Tibbets jr. an Bord seines B-29 Bombers, der Enola Gay, und geht ein letztes Mal seine Checkliste durch.

Er ist ein erfahrener Bomberpilot mit einigen Einsätzen über dem japanischen Inseln, heute ist sein Ziel die Industriestadt Hiroshima. Aber der Flug, auf den er sich in den frühen Morgenstunden an diesem Tag vorbereitet, ist kein gewöhnlicher Flug.



Er wird in die Geschichte eingehen und die Welt auf ewig verändern. An Bord des grossen Flugzeugs befindet sich "Little Boy" ("Kleiner Junge"). Hinter diesem harmlos klingenden Namen verbirgt sich die tödlichste Waffe, die je von Menschenhand erschaffen wurde. Little Boy ist eine der zwei ersten Atombomben, die für den Einsatz im Krieg gegen Japan gebaut wurden. Wenige Stunden später, um 8:19 explodiert Little Boy über der japanischen Stadt. Amerikanische Begleitflugzeuge schossen Bilder der Explosion, und ein neues Wahrzeichen für den Wahnsinn



des  
pilz. Die  
schrei-  
sofort,  
Nach-  
dies  
Tokio  
gewöhn-  
Zahl  
wurde  
nem  
Führung  
nicht an  
9. Au-  
US-  
der Ha-  
monstra-

Krieges war geboren. Der Atom-Zerstörung der Stadt war unbeblich. 80.000 Menschen starben und viele andere sollten an den wirkungen sterben. Zwar waren weniger als bei den Angriffen auf starben, doch Tokio wurde mit lichen Bomben und einer grossen Flugzeuge angegriffen. Hiroshima mit einer einzigen Bombe von ei-Flugzeug zerstört. Die japanische war geschockt, dachte jedoch noch Kapitulation. Drei Tage später, am gust, warf ein anderer Bomber der Luftwaffe eine zweite Bombe über fenstadt Nagasaki ab. Diese De-tion von Macht und Zerstörungskraft zwang den japanischen Kaiser in die Knie und er stimmte der Kapitula-tion zu. Der zweite Weltkrieg, der in Europa begonnen hatte, ging im Pazifik zu Ende. Die Entscheidung, diese Waffe gegen Japan einzusetzen, kann keine einfache für die US Regierung gewesen sein. Sie müssen sich im Klaren darüber gewesen sein, dass ein solcher Angriff viele Zivilisten, Frauen und Kindern das Leben kosten würde. Das Ziel der USA war klar: Sie wollten den Krieg, der in Europa schon im April zu Ende ging, nun auch endlich im Pazifik siegreich beenden. Die Ergebenheit der Japaner gegenüber ihrem Kaiser, den sie wie einen Gott verehrten, machte die eigenständige Kapitulation der Bevölkerung oder Teile der Armee wie im Fall von Deutschland eher unwahrscheinlich. Dies würde noch einige Monate harten und blutigen Kampf bedeuten. Die Atombombe war als Waffe furchtbar, doch noch furchtbarer war die psychologische Wirk-ung dieser Waffe. Die USA schienen mit diesen Waffen die Möglichkeit zu haben, jede japanische Stadt nach Belieben zu zerstören. Was wäre geschehen, wenn sich die US-Regierung gegen den Einsatz dieser Waffe entschieden hätte? Natürlich kann man hier nur spekulieren, da geschichtliche Tatsachen nun mal Fakt sind. Fangen wir mal bei dem Ziel an, das die USA mit dem Abwurf der Bombe verfolgt hat: Sie wollten den Krieg möglichst schnell zu ihren Gunsten beenden. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die USA ohne den Einsatz von Little Boy den Krieg verloren hätten. -Im August 1945 war Japan als letzte der drei Achsen-mächte übrig. Italien und Deutschland waren geschlagen. -Die Versorgung der japanischen Inseln wurde durch Blockaden der US Marine empfindlich gestört. Neue Schiffe und Flugzeuge konnten nicht mehr von den Japanern produziert werden. -Sie waren militärisch sowie wirtschaftlich am Ende, und es war nur noch eine Frage der Zeit, bis die japanische Verteidigung ganz zusammenbrechen würde. Die Bombe beschleunig-te also nur das, was sowieso passieren wäre. Jedoch muss gesagt werden, dass der Krieg wahrscheinlich sehr viel länger gedauert hätte. Die stolze japanische Bevölkerung hätte sich ohne die Erlaubnis ihres Kai-sers nie ergeben. Die USA hätten eine japanische Insel nach der anderen erobern müssen. Dies hätte eine grosse Zahl von Toten und unglaubliche Zerstörung bedeutet. Die Zivilbevölkerung in ganz Japan hätte ihre Heimat verbissen verteidigt, und die US Armee hätte hart und lange kämpfen müssen, um die Oberhand zu gewinnen. Wie viele US Soldaten und Japaner bei solchen Kämpfen gestorben wären, kann man nur schätzen. Ob es weniger oder mehr Tote gegeben hätte, als durch die Bombe möchte ich nicht einschätzen müssen, aber die US Armee war davon überzeugt. Hätte der Krieg länger gedauert, wäre auch noch ein anderer Faktor zum Tragen gekommen. Die Sowjetunion, die in den letzten Monaten des Krieges Japan auch den Krieg erklärt hatte, bereitete eine grosse Invasion Japans vom Westen her vor. Hätte der Krieg nur ein paar Wochen länger gedauert, wäre die Sowjet-Armee in Japan gelandet und hätte das Land wie schon Deutschland in Zonen unterteilt. Wie hoch die Wahrscheinlichkeit einer Art Berliner Mauer in Tokio wäre, ist schwer zu sagen. Sicher ist jedoch, dass die Sowjetunion in dem von ihnen besetzen Teil Japans in den kommenden Jahren eine ähnliche Politik verfolgt hätte wie im Osten Deutschlands. Dies hätte das Bild der Welt, wie wir sie heute kennen, grundlegend verändert. Auch der kalte Krieg hätte anders verlaufen können. Hiroshima und Nagasaki waren die Beweise, wie zerstörerisch zwei recht primitive Atombomben sein kön-nen. Im kalten Krieg zwischen den USA und der Sowjetunion verfügten beide Seiten über Tausende moder-ner Waffen mit einer viel grösseren Zerstörungskraft, als sie Little Boy hatte. Hiroshima erfüllte jedoch



eine abschreckende Funktion. Die beiden Staaten wussten, dass ein Atomkrieg das Ende der Menschheit mit sich führen würde. Die nukleare Abschreckung funktionierte in beide Richtungen, und zum Glück haben weder die USA noch die Sowjetunion jemals wieder Atombomben im Krieg benutzt. Wäre die Zerstörung der beiden japanischen Städte nicht so komplett gewesen, oder wären die Bomben nicht zum Einsatz gekommen, wäre diese Abschreckung vielleicht nicht so stark gewesen.

Alpha-centauri: was ist ein Atomkern

<http://www.br-online.de/cgi-bin/ravi?v=alpha/centauri/v/&f=010318.rm&g2=1>



Wie viel Energie aus einer bestimmten Masse entsteht, kann nach dem von Einstein formulierten Gesetz berechnet werden:

So ergibt 1 kg Masse, die völlig in Energie umgewandelt wird, eine Energie von  $E = 9 \cdot 10^{16}$  J. Stünde dieser Betrag als elektrische Energie zur Verfügung, könnte damit die Stadt Schaffhausen ca. 100 Jahre lang mit elektrischer Energie versorgt werden.

Je grösser bei einer Kernentstehung der Massenverlust und damit die Energieabgabe ist, desto fester sind die Kernteilchen aneinander gebunden. Man nennt diese Energie deshalb auch Bindungsenergie.

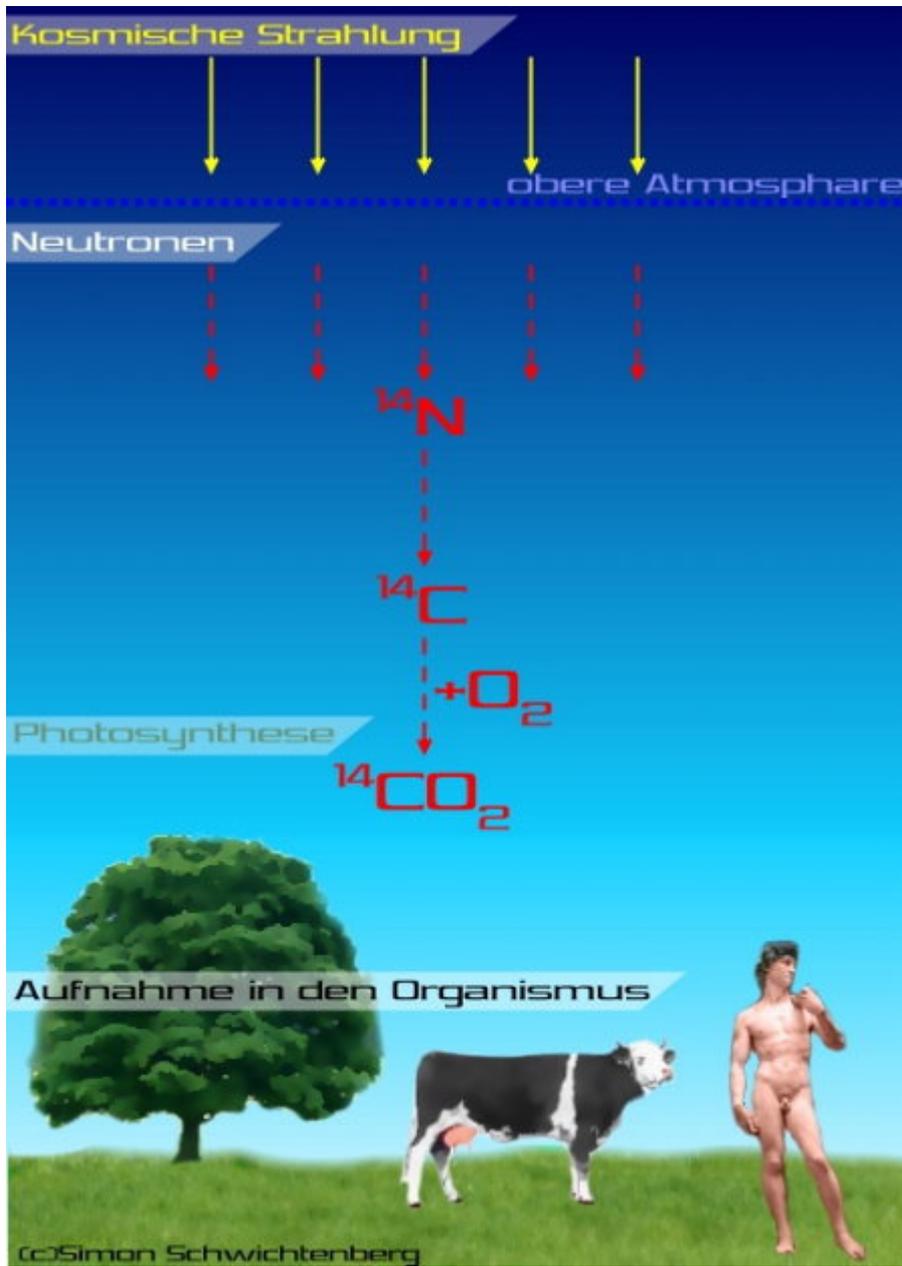
Für die Nutzung der Kernbindungsenergie stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- **Es werden sehr leichte Kerne miteinander verschmolzen.** Daraus entstehen dann schwerere Kerne, deren Kernteilchen stärker aneinander gebunden sind. Das ist mit einem Massenverlust und somit einer Energieabgabe verbunden. Nach diesem Prinzip arbeitet die Energiefreisetzung im Innern der Sonne und der Fusionsreaktor:



- **Schwere Kerne werden in mittelschwere gespalten.** Da die Bindungsenergie je Nukleon bei mittelschweren Kernen grösser ist als bei schweren Kernen, tritt auch dabei Massenverlust und damit Energiefreisetzung auf. Auf diesem Prinzip beruht die Energiegewinnung in Kernkraftwerken







Dinge welche nicht im Skript vorgesehen sind ....

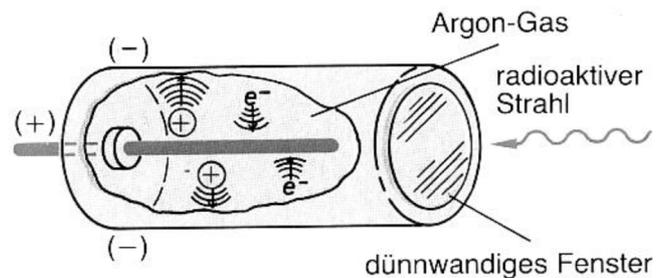
#### Messung der Radioaktivität

Die Emissionen von radioaktiven Substanzen können durch verschiedene Methoden untersucht werden. Photographische Filme werden belichtet. Mit photographischen Verfahren kann die Strahlung qualitativ und quantitativ registriert werden. Diese Methode ist relativ ungenau und für schnell durchzuführende Untersuchungen ungeeignet. Beispiel:

Sie wird zum Beispiel zur Strahlenschutz-Überwachung von Personen verwendet, welche Filmplaketten tragen, die in regelmäßigen Abständen ausgetauscht und entwickelt werden (Dosimeter).

Manche Substanzen, zum Beispiel Zinksulfid, absorbieren die Energie von auftreffender radioaktiver Strahlung und wandeln sie in Licht um. Zinksulfid fluoresziert; bei jedem Auftreffen eines Teilchens aus der radioaktiven Quelle wird ein kleiner Lichtblitz erzeugt. Ein Szintillationszähler ist ein Gerät, bei dem dieser Effekt zur Strahlungsmessung genutzt wird. Das Eintrittsfenster eines photoelektrischen Messinstrumentes wird mit ZnS beschichtet. Jedes Mal, wenn ein radioaktives Emissionsprodukt auf das Zinksulfid trifft, blitzt das ZnS auf und löst einen elektrischen Impuls im Messinstrument aus. Diese Signale werden verstärkt und können mit elektronischen Hilfsmitteln gezählt werden.

Geiger-Müller-Zählrohr: Die Strahlung tritt durch ein dünnwandiges Fenster in das Zählrohr ein, welches Argon-Gas enthält. Während ein Teilchen oder ein  $\gamma$ -Strahl das Rohr durchquert, werden Elektronen aus den Argon-Atomen herausgeschlagen und  $Ar^{+}$ -Ionen gebildet. In der Mitte des Rohres befindet sich ein Draht; zwischen diesem und der Rohrwand wird eine Spannung von 1000 bis 1200 Volt angelegt. Die Rohrwand übernimmt die Funktion einer negativen Elektrode und zieht die  $Ar^{+}$ -Ionen an; der Draht wirkt als positive Elektrode und zieht die Elektronen an. Die Elektronen, die von der elektrischen Spannung beschleunigt werden, treffen weitere Argon-Atome und ionisieren sie. So entsteht eine Kaskade von Ionen, die einen kurzzeitigen Stromfluss zwischen Rohr und Draht bewirkt. Der Stromstoß wird verstärkt und mit einer Zählvorrichtung registriert oder mit einem Lautsprecher hörbar gemacht. Vereinfacht dargestellt:



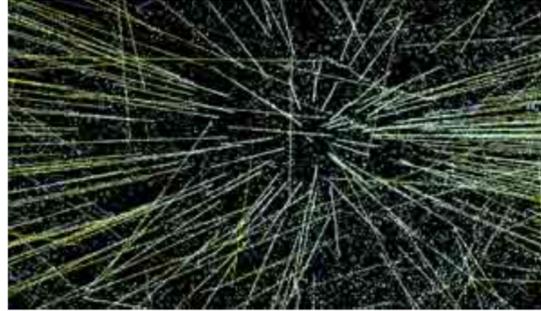
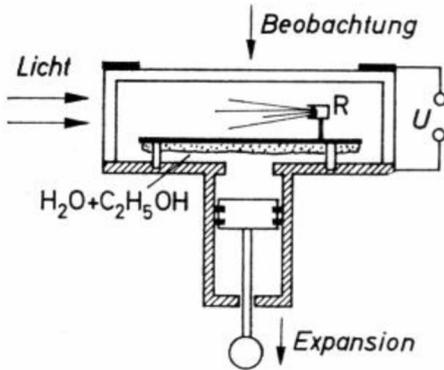
- 1)  $A \rightarrow A^{+} + e^{-}$ , 2) Minuspol (minus, weils dort elektronen hat):  $A^{+} + e^{-} \rightarrow A$
- 3) Pluspol (positiv, weil Mangel an  $e^{-}$ ) elektronen gehen hin ...



Mit der Wilsonschen Nebelkammer können die Wege, die Teilchen aus dem radioaktiven Zerfall zurücklegen, sichtbar gemacht werden. Die Strahlung wirkt ionisierend auf Luft. Was heisst das?

sie erzeugt Ionen entlang ihres Weges

Die Nebelkammer enthält Luft und ist mit den Dämpfen einer Flüssigkeit wie Wasser oder Alkohol gesättigt. Durch Bewegung eines Kolbens wird die Luft in der Kammer plötzlich expandiert und abgekühlt. Dadurch wird die Luft mit dem Dampf übersättigt. Flüssigkeitstropfen kondensieren sich an den Ionen, die von den radioaktiven Strahlen erzeugt werden, und machen die Wege der Teilchen sichtbar. Die Tröpfchen-Spuren können fotografiert und dann ausgewertet werden. Auf den Photographien sind Weglängen und Kollisionen der Teilchen sichtbar; der Einfluss von äusseren Magnetfeldern oder elektrischen



schon  
Feldern  
kann stu-  
diert wer-  
den und  
daraus  
können  
Schlüsse  
über die  
Ladung,

Masse und Geschwindigkeit der Teilchen gezogen werden.

#### Messgenauigkeit

Die Messung von radioaktiver Strahlung ist mit ausserordentlich hoher Empfindlichkeit möglich. Nukleare Zerfallsprozesse können einzeln registriert werden. Weitere Eigenschaften:

emittierte Strahlung für jedes Nuclid charakteristisch ->  
bei Messung des Spektrums der Strahlung die strahlenden Nuclide auch identifiziert werden.

Die Anwesenheit und die Konzentration einer radioaktiven Substanz lässt sich um viele Grössenordnungen genauer und zuverlässiger ermitteln als bei nicht strahlenden Substanzen. Radioaktive Abfallstoffe können mit wesentlich einfacheren, schnelleren und zuverlässigeren Mitteln überwacht werden als jeder andere Abfallstoff. So konnte zum Beispiel nach dem Kernreaktor-Unfall in Tschernobyl (Ukraine) im Jahre 1986 genau verfolgt werden, wo und welche radioaktive Substanzen (hauptsächlich  $^{131}\text{I}$  und  $^{137}\text{Cs}$ ) durch den Wind hingetragen wurden, obwohl die Gesamtmenge  $^{131}\text{I}$ , die auf die ganze Fläche der Bundesrepublik Deutschland niederging, weniger als ein Gramm betrug.



### Aktivität

Sie wissen, dass Radionuklide spontan zerfallen und dabei Teilchen aussenden. Wenn Sie zum Beispiel eine Salatprobe vor sich haben, möchten Sie aber auch sagen können, wie oft in dieser Probe ein Zerfall stattfindet. Man braucht also ein Mass, das beschreibt, wie intensiv Ihre Probe strahlt. Zu diesem Zweck definieren wir die Aktivität folgendermassen:

Aktivität = Anzahl Kernzerfälle

Zeiteinheit

Die **Einheit** der Aktivität ist **1 Becquerel** = 1 Zerfall/Sekunde:  $[A] = 1 \text{ Bq}$

Der radioaktive Zerfall hat rein statistischen Charakter. Wir können nur für eine sehr, sehr grosse Zahl von radioaktiven Nukliden, aber nicht für ein einzelnes Nuklid, voraussagen, wann der Zerfall eintritt.

### Biologische Effekte der radioaktiven Strahlung

(aus: Warum krümeln Kekse, Joe Schwarcz, Seite 257)

Radium war eine Neuheit. Leuchtgirlanden, die im Dunkeln glühten, eroberten die Geschäfte. Doch was die Öffentlichkeit wirklich begeisterte, waren Uhren mit Leuchtziffern. ...

In den zwanziger Jahren hatte sich die Radium Dial Company in Ottawa, Illinois, niedergelassen. Die meisten Arbeiterinnen waren junge Frauen, die von der relativ guten Bezahlung —18 Dollar die Woche— angelockt worden waren. Die «Radium-Girls», wie sie bald genannt wurden, waren überall in der Stadt leicht zu erkennen; sie kleideten sich gut und fuhren schicke Autos. Sie machten auch gerne Spässe. Einige bemalten sich verschiedene Körperteile mit der Leuchtfarbe, um ihre Freunde im Dunkeln damit zu überraschen. Aber ihnen selbst stand eine Überraschung bevor.

Einige Mädchen begannen, über Kieferschmerzen zu klagen, doch niemand nahm diese Klagen ernst, bis eine 25-jährige Arbeiterin starb. Die Behörden wurden misstrauisch, und sie konzentrierten sich bald auf die «Lippenspitzen-technik», die die Mädchen entwickelt hatten, um die kleinen Zahlen auf den Ziffernblättern zu malen. Nach fast jedem Pinselstrich leckte ein Mädchen seinen Pinsel ab, um dem Haarbündel wieder eine feine Spitze zu geben. Dabei schluckte es stets ein wenig Radium. Radium ist insofern heimtückisch, als es sich wie Kalzium in die Knochen einlagert. Dort setzt es Alpha-Teilchen frei, die nicht nur den Knochen, sondern auch die Blutzellen im Knochenmark zerstören. Die Mädchen entwickelten eine Anämie (Blutarmut), und ihre Kieferknochen wurden so weich, dass sie brachen, wenn ein Zahn gezogen werden musste. Bis 1929 war deutlich geworden, welche schlimmen Folgen ein sorgloser Umgang mit Radium haben konnte, doch zu diesem Zeitpunkt waren dreiunddreissig Arbeiterinnen gestorben. Die Behörden setzten Reformen durch; es wurde sichergestellt, dass jede von ihnen Handschuhe trug, dass die Farben unter einem Abzug gemischt wurden und dass Radium in Bleibehältern aufbewahrt wurde. Doch sie konnten nicht jedes Risiko bei der Herstellung ausschliessen, denn es liess sich nicht verhindern, dass Radiumteilchen in die Luft gelangten. Die letzte Uhr mit radiumgemalten Zifferblättern wurde 1968 hergestellt; kurze Zeit später wurde die Fabrik der Radium Dial Company abgerissen.

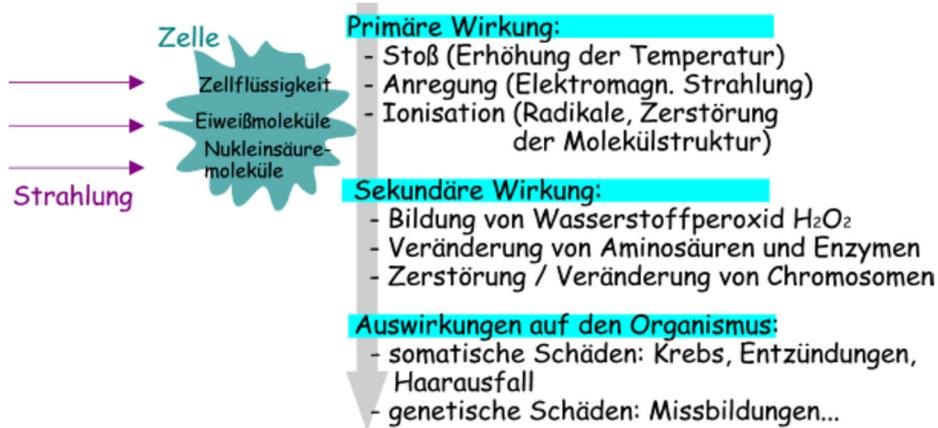
Zu unterscheiden sind folgende Begriffe:

Die (Radio-)Aktivität ist mit der Anzahl der Zerfälle pro Sekunde definiert (siehe auch Halbwertszeit). Wird jedoch die biologische Aktivität betrachtet, so ist die Energiedosis  $D$  wichtig, welche von den Lebewesen absorbiert wird. Diese ist definiert als Quotient aus der absorbierten Strahlungsenergie und der Masse; sie wird angegeben in Gray (Gy) (J/kg). Man erhält sie rechnerisch durch Multiplikation der Aktivität\*Energie/Zerfall, wobei Energie/Zerfall aus Tabellenwerken entnommen werden kann.

Die Äquivalenzdosis  $H$  schliesslich ist ein Mass für die biologische Wirksamkeit der vom Menschen absorbierten Strahlung. Die Strahlungsschädigung wird durch den Qualitätsfaktor  $Q$  angegeben:  $\alpha$  und  $\beta$ -Strahlung:  $Q=1$ ,  $\gamma$ :  $Q=1$ . Oft wird noch ein Wichtungsfaktor  $N$  für bestimmte Organe eingeführt.  $H$  wird dann zu  $Q*N*D$ . Um die Äquivalenzdosis von der Energiedosis zu unterscheiden, wird  $H$  mit der Einheit Sievert (Sv)=(1J/kg) angegeben



Ursache	Folge	Wirkung
<b>Radioaktivität</b>	<b>Strahlung</b>	<b>Dosis</b>
Zahl der pro Sekunde zerfallenden Atomkerne		Wirkung der aufgenommenen Strahlung („das, was hängen bleibt“)
Maßeinheit: Becquerel (Bq)		Energiedosis Maßeinheit: Gray (Gy)
		Äquivalentdosis Maßeinheit: Sievert (Sv)





### Strahlensyndrome in Abhängigkeit der Strahlendosis

Abkömmlinge des Knochenmarks sind die Erythrozyten, die Granulozyten (G), die Monozyten (teilweise) und die Thrombozyten (T)(Blutplättchen). Die Blutplättchen sind wichtig für die Blutgerinnung und Blutstillung. Granulozyten, Lymphozyten (L.) und Monozyten werden als Leukozyten (weisse Blutkörperchen) zusammengefasst.

Akutes Strahlensyndrom beim Versuchstier und Menschen in Abhängigkeit von der Strahlendosis <sup>1</sup>			
Dosisbereich	Initiale Symptome	Definitive Symptome	Prognose
Unter 1 Gy	Symptomlos	Keine signifikanten Blutbildveränderungen	Unbeeinträchtigt
1-2 Gy	Symptomlos oder geringe Übelkeit oder Erbrechen. L. oberhalb von 1500/mm <sup>2</sup>	In der 4.-5. Woche vorübergehendes Absinken der G. und T.	Gesunde Menschen haben praktisch 100% Überlebenschance
2-4.5 Gy	Während der ersten 2-4 Tage Schwindel, Übelkeit, Erbrechen. L. oberhalb 500/mm <sup>2</sup>	In der 3.-5. Woche meist Fieber und hämorrhagische Diathese <sup>2</sup> . Ab 5. Tag Granulozytenabfall, später Thrombopenie <sup>3</sup>	Bei unbehandelten Personen bis auf 100% zunehmende Mortalität, bei behandelten Personen erheblich bessere Überlebenschance
4.5-9 Gy	Unstillbares Erbrechen, Schwindel, eventuell Schock, Fieber. L. sinken rasch unter 500/mm <sup>2</sup> . Granulozytose <sup>4</sup>	Schwere Durchfälle, Infektion, Blutungen, Epilation <sup>5</sup> ; ab 5. Tag schwere Granulozytopenie, Thrombopenie	Hohe Mortalität bis zu 100% auch bei adäquater Therapie
9-16 Gy	Unstillbares Erbrechen, Benommenheit, Schock, Fieber, Unruhe. L. sinken rasch praktisch auf 0 ab	Schwere Durchfälle, Schleimhautulceration <sup>6</sup> . Ab 5. Tag schwere Granulozytopenie, und Thrombopenie	Wahrscheinlich 100% Mortalität in den ersten 10 Tagen, Therapie bisher ohne wesentlichen Einfluss auf Prognose
über 16 Gy	Schwerer Kreislaufkollaps, unstillbares Erbrechen, Durchfälle	Symptome der Zentralnervensystem-Schädigung bis zum Koma, rasche Entwicklung der gastro-intestinalen Symptomatik <sup>7</sup>	100% Mortalität schon in den ersten Tagen

<sup>1</sup> Tabelle ist dem Buch Lehrbuch der Toxikologie, Wissenschaftsverlag Mannheim entnommen

<sup>2</sup>Hämorrhagie: Blutung, Diathese: Neigung -> Blutungsneigung

<sup>3</sup>verminderte Zahl der Thrombozyten

<sup>4</sup>Vermehrung der Granulzyten

<sup>5</sup>Haarausfall

<sup>6</sup>Geschwürbildung auf der Schleimhaut

<sup>7</sup>Magen- und Darmblutungen

### Therapeutische Massnahmen bei Strahlenunfällen

- Eine erste Möglichkeit besteht darin, radioaktive Nuklide äusserlich zu beseitigen (**Dekontaminierung**) oder aus dem Körper zu eliminieren (**Dekorporierung**): Duschen, Haarwäsche, Magenspülung



- Die Aufnahme der Radionuklide aus dem Magen-Darm-Trakt sowie durch Wunden in den Körper kann durch eine Verabreichung des entsprechenden inaktiven Nuklids (Iod, Kalium) reduziert werden. **Iodtablette:** Wird rechtzeitig und im Überschuss «stabiles» Iod verabreicht, so kann damit die Aufnahme und die Speicherung von unfallmässig freigesetztem radioaktivem «instabilem» Iod verhindert oder stark reduziert werden
- Das akute Strahlensyndrom kann nur durch eine Knochenmarktransplantation behandelt werden.
- Zur symptomatischen Therapie gehört eine intensive Gabe von Antibiotika und die Unterbringung in Sterilpflegeeinheiten.
- Zur Behandlung der Blutungsgefahr sind Blutplättchentransfusionen angezeigt

Diese Massnahmen können derzeit nur als vorläufig betrachtet werden, da noch keine ausreichenden Erfahrungen beim Menschen vorliegen.

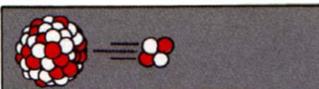
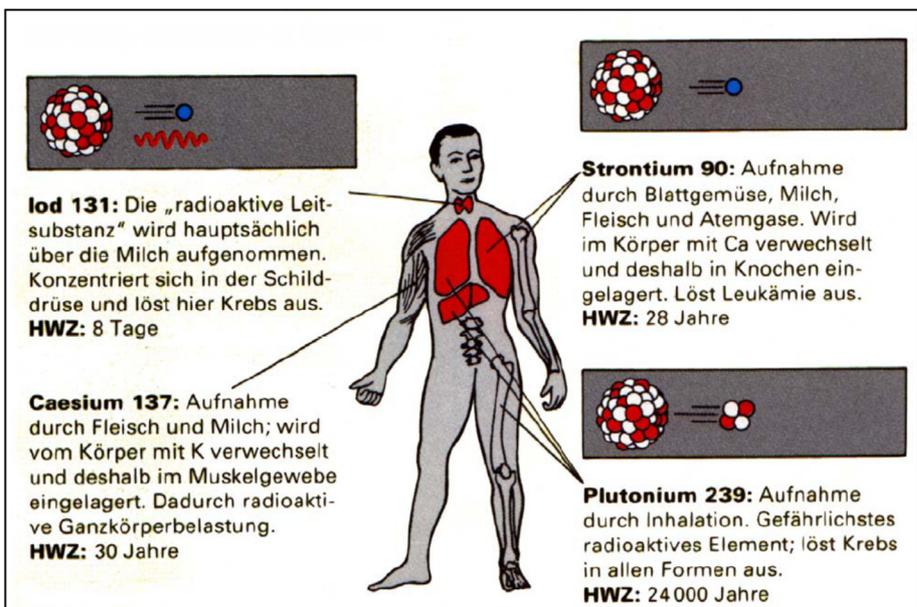
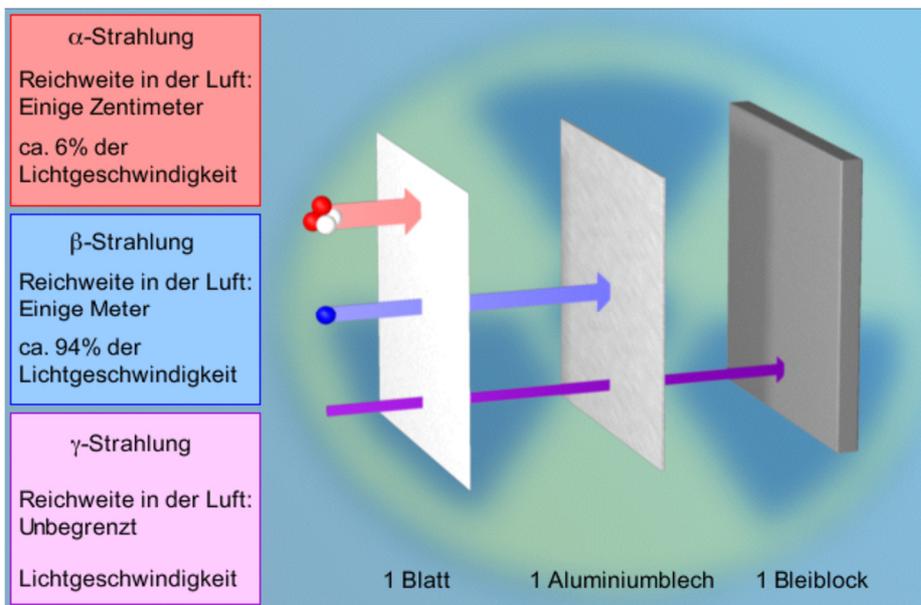
## Strahlenschutz: die drei grossen 'A'

Zum Schutz vor radioaktiver Strahlung, sollte man mit dieser nicht in Berührung kommen. Auch wenn dies im wirklichen Leben kaum einzuhalten ist, sollte man auf die drei grossen "A" des Strahlenschutzes achten:

Abschirmung: Blei, Beton .

Abstand: die Dosis fällt mit dem Quadrat des Abstandes

Aufenthaltsdauer: eine kurzzeitige intensive Bestrahlung kann zu ausgeprägteren Wirkungen führen kann als langfristig geringe Bestrahlung

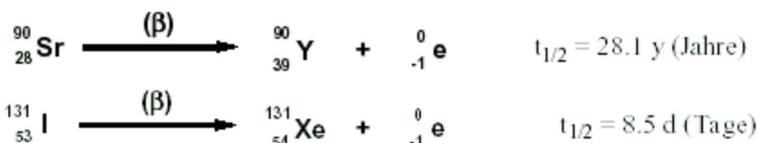
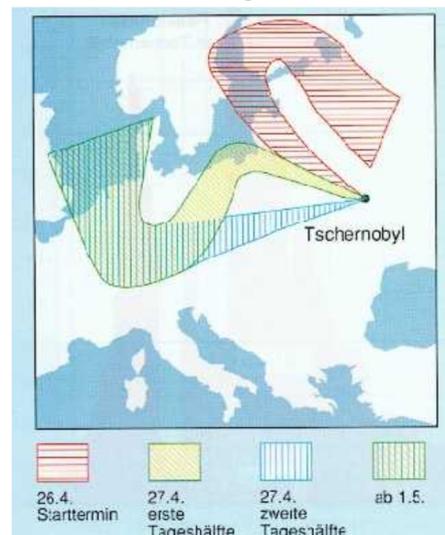




### Weiträumige Kontamination und Strahlenexposition

Aus dem beschädigten Reaktor wurden in den ersten zehn Tagen nach dem Unfall grosse Mengen an radioaktiven Stoffen freigesetzt. Durch den Auftrieb gelangten sie in Höhen über 1.500 m und wurden grossflächig verteilt. Aufgrund der damals bestehenden Wetterverhältnisse nahm die radioaktive Wolke verschiedene Richtungen. Besonders betroffen waren die Ukraine, Weissrussland und Russland. Ausserhalb der damaligen UdSSR wurden insbesondere Gebiete in Skandinavien, Deutschland und Teilen des Balkans belastet. Die grössten Strahlenbelastungen erlitten in den ersten Wochen nach dem Unfall Feuerwehrleute, Betriebsmannschaften und sog. Liquidatoren, von denen über 600.000 eingesetzt wurden. Die besonders stark belastete Region um Tschernobyl wurde im Umkreis von 30 km in drei behördlich kontrollierte Zonen aufgeteilt. Für die Gebiete, die zwischen 30 und 500 km von Tschernobyl entfernt liegen, entwickelten die örtlichen Behörden ein Schutzkonzept für die betroffene Bevölkerung.

Aufgrund der meteorologischen Bedingungen wurde die von dem explodierten Reaktor emittierte radioaktive Wolke nach Westen getrieben, wo sie radioaktive Niederschläge in Mitteleuropa verursachte. Diese radioaktive Verseuchung führte zu einer Reihe von Gesundheitsproblemen, weil der niedergeschlagene radioaktive Staub von den Pflanzen absorbiert und somit in die Nahrungskette gelangen konnte.



Bei den beiden hauptsächlichen Radionukleiden des radioaktiven Niederschlags über Mitteleuropa handelte es sich um **Strontium-90** (Radiostrontium) und **Iod-131** (Radioiod). Das von Radioiod verursachte Gesundheitsrisiko ist mittlerweile ganz verschwunden, weil dieses Nukleid eine kurze Halbwertszeit aufweist. Dennoch hat dieses Nukleid **grosse wirtschaftliche Schäden** angerichtet, weil viele Agrarerzeugnisse (Gemüsekulturen, Molkereiprodukte) 1986 in verschiedenen europäischen Ländern wegen der radioaktiven Belastung vernichtet werden mussten.

Die schwächere, von Strontium-90 ausgehende Radioaktivität ist aber noch vorhanden, da dieses Nukleid eine Halbwertszeit von 28.1 Tagen aufweist. So wird die von diesem Nukleid verursachte zusätzliche Radioaktivität erst 2014 auf die Hälfte abgesunken sein, und 2042 auf ein Viertel. Als Erdalkalimetall ähnelt Strontium dem Calcium, weshalb  $\text{Sr}^{2+}$  das Kation  $\text{Ca}^{2+}$  in der Knochenstruktur ersetzen kann. Strontium reichert sich auch in calciumreichen Pflanzen wie den wilden Pilzen an