

Freiwillige Sinnfrage

- Ist naturwissenschaftliches Wissen wertfrei?
- Welche moralische Verantwortung haben Physiker?

Zum Lesen:

- Bertolt Brecht, „Leben des Galilei“
- Friedrich Dürrenmatt, „Die Physiker“
- Michael Frayn, „Kopenhagen“
- Carl Fr. von Weizsäcker, „Die Verantwortung der Wissenschaft im Atomzeitalter“
- Heinar Kipphardt, „In der Sache J. Robert Oppenheimer“
- Jürgen Mittelstraß, „Leonardo-Welt“
- Grigori Medwedew , „Verbrannte Seelen“

„Der Inhalt der Physik geht die Physiker an, die Auswirkung alle Menschen.“ Friedrich Dürrenmatt

Kernphysik

1. Eigenschaften der Kerne:

Atomkerne bestehen aus **zwei Arten von Elementarteilchen (Nukleonen)**:

- einfach positiv geladenem **Proton** (Ladung: 1 e, Masse: $1836,152\,667\,5 \cdot m_e$, mag. Moment: $1,410\,606\,662 \cdot 10^{-26} \text{ JT}^{-1}$)
- nur 0,2% schwererem **Neutron**, das neutral geladen ist (Ladung: 0 e, Masse: $1838,683\,6550 \cdot m_e$, mag. Moment: $-0,966\,236\,41 \cdot 10^{-26} \text{ JT}^{-1}$)

Anzahl der Protonen im Kern Z heißt **Kernladungszahl oder Ordnungszahl**.

Massenzahl ist die Summe von Protonen und Neutronen: **$A = N + Z$**

Isotope: Atomkerne mit unterschiedlicher Anzahl von Neutronen aber gleich vielen Protonen

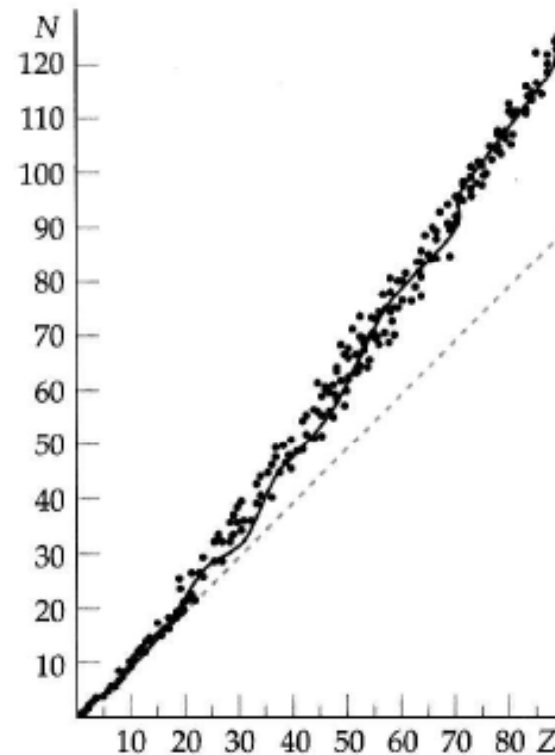
Isotopenuntersuchung

- Datierung von Mineralen: Apatit (Zahnschmelz), Monazit oder Zirkon
- Die Herkunft von Kleidung, Menschen, Tieren, Lebensmitteln kann im weltweiten Maßstab zwischen verschiedenen Kontinenten unterschieden werden. Bei vorgegebener regionaler Eingrenzung, zum Beispiel Butter aus Deutschland sind, durch die Analyse des Wassers im Lebensmittel, auch feinere Unterscheidungen möglich.
- Durch die Untersuchung von Th-U-Pb Isotopen kann man beispielsweise auch zwischen verschiedenen Typen von Kernreaktoren oder Kernwaffen unterscheiden.
- Isotope werden auch in der Aufklärung von Reaktionsmechanismen oder Metabolismen mit Hilfe der sogenannten Isotopenmarkierung verwendet.

Kernkraft oder hadronische Kraft

Innerhalb des Kerns wirkt eine stark anziehende Kraft zwischen den Nukleonen, die die Teilchen zusammenhält. Sie ist viel stärker als elektrostatische Abstoßung und Gravitationskraft (über 40 Größenordnungen). Die starke Kernkraft ist nur bei sehr kurzen Abständen von Bedeutung. Bereits bei einem Protonenabstand von einigen Femtometern kann sie vernachlässigt werden.

Kernstabilität: Die Zahl der Neutronen im Kern N ist für leichte Kerne ungefähr so groß wie Z , für schwere Kerne wesentlich größer.



Tröpfchenmodell

Die meisten Kerne sind annähernd kugelförmig und haben einen Radius $r_K = r_0 A^{1/3}$, wobei $r_0 \approx 1,2$ fm. Dadurch ergibt sich, dass das Kernvolumen proportional ist zu A . Da aber auch die Kernmasse proportional zu A ist, ergibt sich, dass alle Kerne ungefähr die gleiche Dichte haben (analog zu einer Flüssigkeit).

Masse und Bindungsenergie

Kernmasse setzt sich zusammen aus der Masse der Kernbausteine abzüglich der Bindungsenergie E_b der Nukleonen (c ist die Lichtgeschwindigkeit): $m_K = E_b/c$

Bindungsenergie des Kerns mit der atomaren Masse m_A , Z Protonen und N Neutronen:

$$E_b = (Z m_H + N m_n - m_A) c^2.$$

m_H die Masse des ^1H -Atoms und m_N die Neutronenmasse

Radioaktivität

Kerne können unter Aussendung von radioaktiver Strahlung zerfallen.

1. α -Zerfall: Aussendung eines α -Teilchens (${}^4\text{He}$ -Kerne).
2. β -Zerfall: Aussendung von Elektronen oder Positronen.
3. γ -Zerfall: Aussendung hoch-energetischer elektromagnetische γ -Strahlung.

Anzahl der zerfallenen Atome im Intervall dt :

$$dn = -\lambda n dt,$$

wobei λ die Zerfallskonstante ist und vom Material abhängt, n die Anzahl der Kerne

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

mittlere Lebensdauer: $\tau = 1/\lambda$

Halbwertszeit $t_{1/2}$: $n(t_{1/2}) = n_0/2$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0,693 \tau$$

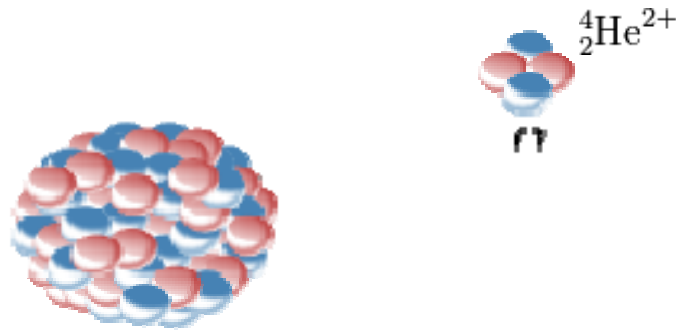
$$R = -\frac{dn}{dt} = \lambda n = \lambda n_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

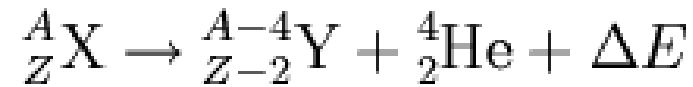
Becquerel (Bq): 1 Bq = 1 Zerfall/s

Element	Formelzeichen	Halbwertszeit
Tellur	^{128}Te	ca. $7 \cdot 10^{24}$ Jahre (7 Quadrillionen Jahre)
Selen	^{82}Se	ca. $1,08 \cdot 10^{20}$ Jahre (108 Trillionen Jahre)
Bismut	^{209}Bi	ca. $1,9 \cdot 10^{19}$ Jahre (19 Trillionen Jahre)
Thorium	^{232}Th	14,05 Mrd. Jahre
Uran	^{238}U	4,468 Mrd. Jahre
Uran	^{235}U	704 Mio. Jahre
Iod	^{129}I	15,7 Mio. Jahre
Neptunium	^{237}Np	2,144 Mio. Jahre
Technetium	^{99}Tc	211.100 Jahre
Plutonium	^{239}Pu	24.110 Jahre
Kohlenstoff	^{14}C	5.730 Jahre
Radium	^{226}Ra	1.602 Jahre
Americium	^{241}Am	432,2 Jahre
Plutonium	^{238}Pu	87,74 Jahre
Caesium	^{137}Cs	30,17 Jahre
Strontium	^{90}Sr	28,64 Jahre
Tritium	^3H	12,32 Jahre
Cobalt	^{60}Co	5,3 Jahre
Schwefel	^{35}S	87,5 Tage
Iod	^{131}I	8,02 Tage
Radon	^{222}Rn	3,8 Tage
Francium	^{223}Fr	22 Minuten
Thorium	^{223}Th	0,6 Sekunden
Polonium	^{212}Po	0,3 µs
Beryllium	^8Be	$6,7 \cdot 10^{-17}$ s (0,67 Trillionstelsekunden)

Alphastrahlung

Alphastrahlung oder **α -Strahlung** ist eine Art von ionisierender Strahlung, die bei einem radioaktiven Zerfall, dem **Alphazerfall**, auftritt. Ein radioaktives Nuklid, das diese Strahlung aussendet, wird als **Alphastrahler** bezeichnet. Es handelt sich um eine Teilchenstrahlung bestehend aus Helium-4-Atomkernen, **Alphateilchen** genannt, welche aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen.

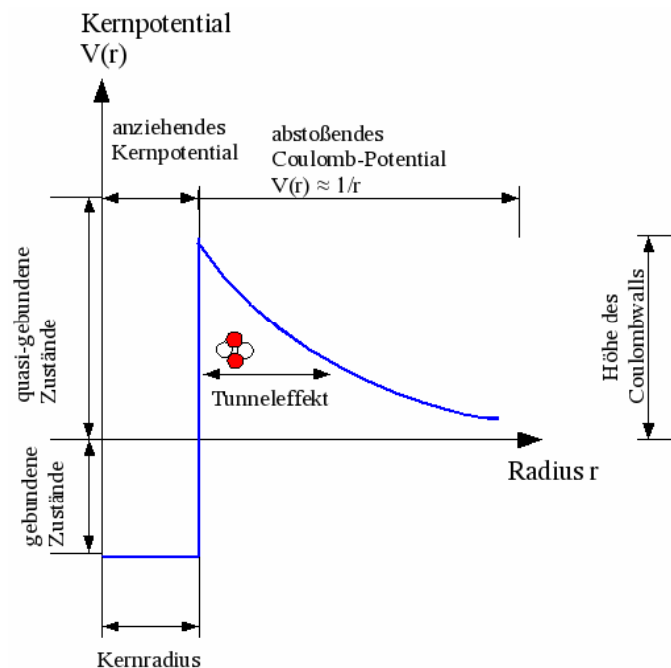




konkretes Beispiel: ${}^{146}_{62} \text{Sm} \rightarrow {}^{142}_{60} \text{Nd} + {}^4_2 \text{He} + 2,45 \text{ MeV}$

Nach dem Ausstoß verbleibt der Atomkern unter Umständen in einem angeregten Zustand. Die dafür benötigte Energie ist Teil von ΔE und steht daher nicht als kinetische Energie zur Verfügung. Der Übergang vom angeregten in den Grundzustand ist mit dem Aussenden von Gammastrahlung verbunden.

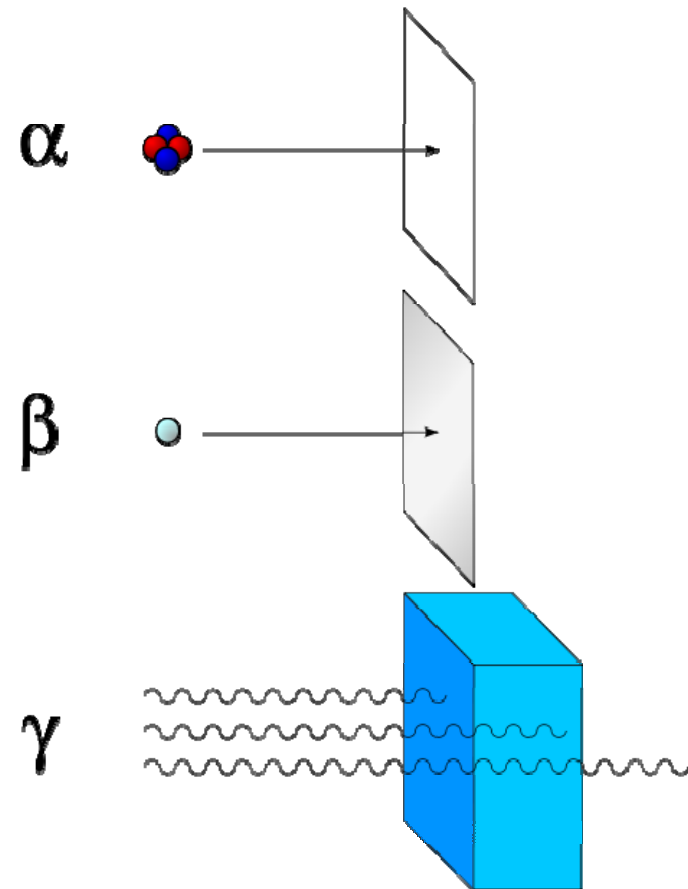
Der Alpha-Zerfall ergibt rechnerisch nach der empirischen Weizsäcker-Massenformel des Tröpfchenmodells für alle Kerne ab Massenzahl 165 eine positive Energiefreisetzung, denn die so berechnete Summe der Massen des Alphateilchens und des Tochterkerns ist kleiner als die Masse des Mutterkerns.



Aufgrund ihrer elektrischen Ladung und relativ großen Masse von $4u$ haben Alphateilchen nur eine **sehr geringe Eindringtiefe in Materie**.

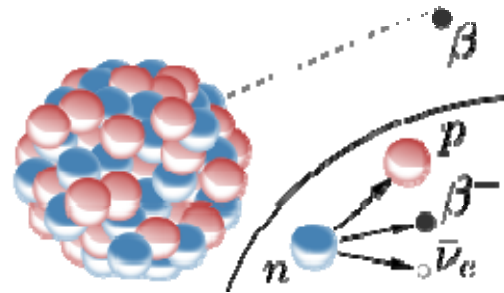
Die Reichweite der Alphateilchen ist abhängig von deren Energie und beträgt in Luft bei Normaldruck ungefähr 10 cm (bei 10 MeV). **In Wasser oder organischem Material beträgt die Eindringtiefe eines 5-MeV-Alphateilchens $40 \mu\text{m}$.** Ein etwas kräftigeres Blatt Papier oder einige Zentimeter Luft reichen somit im allgemeinen schon aus, um Alphateilchen vollständig abzuschirmen. Das kommt dadurch zustande, dass die Ionisationsdichte von Alphateilchen – d. h. die Anzahl Ionen, die das Teilchen pro Längeneinheit seiner Wegstrecke erzeugt – viel höher ist als etwa für Beta- oder Gammastrahlung. In einer Nebelkammer sehen deshalb die durch Alphastrahlung erzeugten Bahnsuren, verglichen mit denen von Betastrahlen ähnlicher Energie, kürzer und dicker aus.

Alphastrahlung, die von außen auf den menschlichen Körper wirkt, ist relativ ungefährlich, da die Alphateilchen auf Grund ihrer geringen Eindringtiefe überwiegend nur in die oberen, toten Hautschichten eindringen. Ein im Organismus durch Einatmen oder Aufnahme mit der Nahrung eingelagerter Alphastrahler ist dagegen sehr schädlich, da in diesem Fall nicht die toten Hautschichten, sondern lebende Zellen geschädigt werden. Insbesondere die Anreicherung eines mit Alphastrahlung zerfallenden Nuklids in einem Organ führt zu einer hohen Belastung dieses Organs, da dabei eine hohe Strahlendosis ihre schädigende Wirkung auf kleinem Raum und auf wichtige Körperzellen ausübt



Betastrahlung

Betastrahlung oder **β -Strahlung** ist eine ionisierende Strahlung, die bei einem radioaktiven Zerfall, dem **Betazerfall**, auftritt. Ein radioaktives Nuklid, das Betastrahlung aussendet, wird als **Betastrahler** bezeichnet. Diese Teilchenstrahlung besteht bei der häufigeren **β^- -Strahlung aus Elektronen**, bei der selteneren **β^+ -Strahlung** dagegen **aus Positronen**.



Nuklide mit einem Überschuss an Neutronen zerfallen über den β^- -Prozess. Ein Neutron des Kerns wandelt sich in ein Proton um und sendet dabei ein Elektron sowie ein Elektron-Antineutrino aus. Sowohl Elektron als auch Antineutrino verlassen den Atomkern, da beide Leptonen sind und nicht der starken Wechselwirkung unterliegen. Da sich nach dem Zerfallsprozess ein Neutron weniger, aber ein Proton mehr im Kern befindet, bleibt die Massenzahl A unverändert, während sich die Kernladungszahl Z um 1 erhöht. Das Element geht also in seinen Nachfolger im Periodensystem über. Experimentell beobachtet man bei β^- -Zerfällen von ganzen Atomkernen jedoch eine Energiedifferenz, die nicht durch die Bindungsenergie kompensiert werden kann. So hat sich herausgestellt, dass beim Zerfall noch ein Elektronen-Antineutrino emittiert wird.



Der β^+ -Zerfall tritt bei protonenreichen Nukliden auf. Hierbei wird ein Proton des Kerns in ein Neutron umgewandelt. Dabei entsteht zusammen mit einem Positron ein Elektron-Neutrino. Wie beim β^- -Zerfall bleibt die Massenzahl unverändert, jedoch verringert sich die Kernladungszahl um 1, das Element geht also in seinen Vorgänger im Periodensystem über. Ein Konkurrenzprozess zum β^+ -Zerfall ist der sogenannte *Elektroneneinfang*. Hierbei verwandelt sich ein Proton des Kerns durch Einfangen eines Elektrons aus einer kernnahen Schale der Atomhülle in ein Neutron und ein Neutrino. Dieser Prozess tritt insbesondere dann auf, wenn die freiwerdende Umwandlungsenergie klein ist.



Wenn Betateilchen in ein Material eindringen, finden der Energieübertrag auf das Material und die Ionisierung in einer oberflächennahen Schicht statt, die der Eindringtiefe der Teilchen entspricht.

Ist der menschliche Körper Betastrahlen ausgesetzt, werden nur Hautschichten geschädigt. Dort kann es aber zu intensiven Verbrennungen und daraus resultierenden Spätfolgen wie Hautkrebs kommen. Sind die Augen der Strahlung ausgesetzt, kann es zur Linsentrübung kommen.

Werden Betastrahler in den Körper aufgenommen (*inkorporiert*), sind hohe Strahlenbelastungen in der Umgebung des Strahlers die Folge. Gut dokumentiert ist Schilddrüsenkrebs als Folge von radioaktivem Iod-131 (^{131}I), das sich in der Schilddrüse sammelt. In der Literatur findet man auch Befürchtungen, dass Strontium-90 (^{90}Sr) zu Knochenkrebs und Leukämie führen kann, da sich Strontium wie Calcium in den Knochen anreichert.

Betastrahlen lassen sich mit einem einige Millimeter dicken Absorber (beispielsweise Aluminiumblech) gut abschirmen. Allerdings wird dabei ein Teil der Energie der Betateilchen in Röntgen-Bremstrahlung umgewandelt. Um diesen Prozess zu verringern, sollte das Abschirmmaterial möglichst leichte Atome aufweisen, also von geringer Ordnungszahl sein. Dahinter kann dann ein Schwermetall als zweiter Absorber dienen, der die Bremstrahlung abschirmt.

Für β -Strahler lässt sich eine materialabhängige *maximale Reichweite* definieren, denn β -Teilchen geben ihre Energie (so wie Alphateilchen) in vielen Einzelstößen an Atomelektronen ab; die Strahlung wird also nicht exponentiell abgeschwächt wie Gammastrahlung. Aus dieser Erkenntnis resultiert die Auswahl abschirmender Materialien. Für einige der in der Forschung verbreiteten β -Strahler sind in der nebenstehenden Tabelle die Reichweiten in Luft, Plexiglas und Glas berechnet. Mit einer Plexiglasabschirmung von 1 cm kann eine sichere Abschirmung erreicht werden.

Altersbestimmung

Je nach Art und Alter des Fundes finden verschiedene Methoden Anwendung:

Radiometrische Datierungen. Beispiele:

Radiokohlenstoffdatierung (auch ^{14}C -Datierung) bei bis zu 50 000 Jahre alten Funden, die organische Stoffe enthalten

Kalium-Argon-Datierung und Uran-Blei-Datierung in der Geochronologie zur Datierung sehr alter Proben.

Tritiummethode bei Weinen, Wasserproben oder wasserhaltigen Funden bei nicht zu hohem Alter

Stratigraphische Verfahren

Leitfossil-Chronologie, zeitliche Zuordnung von Gesteinsschichten durch Fossilien

Tephrochronologie, zeitliche Zuordnung von Gesteinsschichten durch die Identifikation pyroklastischer Sedimente.

Münzdatierung mit Münzen als Beifunden

Strukturanalyse

Röntgenanalysen an Material, Struktur und Schichtung

Thermolumineszenz bei Erdproben, Mineralen, Keramik, Artefakten

Paläomagnetische Untersuchungen an Gesteinen und Keramik

Plausibilitätsanalyse

Wasserzeichen, Schriftmerkmale, Tinte, Papierart werden zur Datierung von Urkunden herangezogen

Chemische-technische Zusammensetzung von Farbstoffen, Firnissen oder Malgründen in der Kunstgeschichte

Rehydroxylierung, eine neue Untersuchung in welchem Grade Sauerstoffbrücken in Keramik durch Eindringen von Wasser aufgebrochen sind. Auf diese Weise gelang es Moira Wilson von der University of Manchester und ihren Kollegen keramische Objekte im Alter bis zu 2000 Jahren recht genau zu bestimmen.

Daneben gibt es in der interdisziplinären Zusammenarbeit moderner Forschung eine Fülle weiterer Methoden, etwa die mit Klimaprofilen aus Sedimenten abgeglichenen Daten, Pollenanalyse über Ansätze der Verbreitung rezenter – erst kürzlich in einem Gebiet ausgestorbener (im erdgeschichtlichen Sinne) – Pflanzen, und anderes.

In der Kunstgeschichte werden überdies historische Quellen und stilkritische Methoden herangezogen

Radiokohlenstoffdatierung

Die **Radiokohlenstoffdatierung**, auch ^{14}C -Datierung, C14-Datierung, C14-Methode oder Radiocarbonmethode (engl. „carbon“: Kohlenstoff), ist ein Verfahren zur radiometrischen Datierung von kohlenstoffhaltigen, insbesondere organischen Materialien. Der **zeitliche Anwendungsbereich liegt zwischen 300 und etwa 50.000 Jahren**. Das Verfahren beruht auf dem radioaktiven Zerfall des Kohlenstoff-Isotops ^{14}C und wird in der archäologischen Altersbestimmung, Archäobotanik und Quartärforschung angewandt.

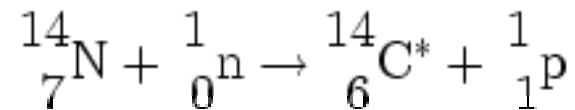
Entwickelt wurde die Radiokohlenstoffdatierung 1946 von Willard Frank Libby (1908–1980), der für diese Leistung 1960 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wurde.

Vorkommen von ^{14}C

Kohlenstoff kommt in der Natur in drei Isotopen vor: ^{12}C , ^{13}C und ^{14}C . In der Luft beträgt der Anteil am Gesamtkohlenstoffgehalt für ^{12}C etwa 98,89%, für ^{13}C etwa 1,11% und für ^{14}C 0,000'000'000'1% (=10⁻¹⁰%). Auf 10¹² (1 Billion) ^{12}C -Kerne kommt so statistisch nur ein einziger ^{14}C -Kern. Im Gegensatz zu ^{12}C und ^{13}C ist ^{14}C nicht stabil und wird deswegen auch Radiokohlenstoff genannt. Er wird allerdings ständig neu gebildet. In erster Näherung geht man davon aus, dass die **Neubildung und der Zerfall der ^{14}C -Kerne sich ausgleichen und damit auch der Anteil der ^{14}C -Kerne am Kohlenstoff in der Atmosphäre über die Zeit konstant ist.**

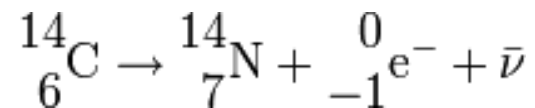
Entstehung von ^{14}C

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



Zerfall von ^{14}C

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



Kohlenstoffkreislauf

Der in der Atmosphäre erzeugte Radiokohlenstoff verbindet sich mit vorhandenem Sauerstoff zu Kohlendioxid. Durch die Photosynthese der Pflanzen gelangt ^{14}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 drei 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}C und ^{12}C , weil die zerfallenden ^{14}C -Kerne nicht durch neue ersetzt werden. Es gilt das Zerfallsgesetz:

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

Der hierfür entscheidende Zeitpunkt ist das Ende des Stoffaustauschs mit der Atmosphäre, also der Tod des Lebewesens. So ist das Verhältnis zwischen ^{14}C und ^{12}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-organischen Stoffen kann biogener Kohlenstoff und damit Radiokohlenstoff gelangen, beispielsweise in geschmolzene Metalle oder mit anderen thermischen Verfahren gewonnene Werkstoffe. Das ^{14}C -Alter zeigt dann den Zeitpunkt der Herstellung an, evtl. zuzüglich des Alters des verwendeten organischen Kohlenstoffs.

Die Radiokohlenstoffdatierung ist somit die Messung des Verhältnisses der Mengen der Kohlenstoff-Isotope ^{14}C zu ^{12}C einer Probe sowie eines Standards, der das Verhältnis zu Beginn des Alterungsprozesses repräsentiert. Der ^{14}C -Gehalt einer Probe kann entweder durch Zählung der zerfallenden ^{14}C -Kerne im Zählrohr, im Flüssigkeits-Szintillations-Spektrometer oder durch Zählung der noch vorhandenen ^{14}C -Kerne mit der Beschleuniger-Massenspektrometrie bestimmt werden. Letztere Methode benötigt weniger Material als die ersten beiden, ist dafür aber aufwändiger und teurer.

Zählrohrmethode nach Libby

Die klassische Methode für Radiokohlenstoffmessungen, wie sie schon von Libby benutzt wurde, ist der direkte Nachweis des radioaktiven Zerfalls in einem Zählrohr. Hierbei wird als Zählgas das aus der Probe durch Verbrennung gewonnene CO_2 verwendet. Aufgrund der langen Halbwertszeit und der geringen Häufigkeit von ^{14}C beträgt die Aktivität eines Mols modernen Kohlenstoffs nur etwa 3 Zerfälle pro Sekunde. Um eine Genauigkeit von 40 Jahren (1 Standardabweichung) zu erreichen, müssen aber insgesamt mehr als 40.000 Zerfälle gezählt werden (der relative Fehler der Messung beträgt $\frac{1}{n}$, wobei n hier die Anzahl der Zählungen bezeichnet). Um eine hohe Präzision der Messung zu erzielen, sind also, neben einer guten Abschirmung des Zählrohres gegen die natürliche Strahlung, relativ große Probenmengen (bis zu 1 kg des Ausgangsmaterials) und eine lange Messdauer erforderlich. Da bei sehr alten Proben nur noch sehr wenig ^{14}C enthalten ist, können diese mangels Zählrate nur mit entsprechend kleinerer Präzision (Fehler von maximal 5000 Jahren) gemessen werden. Bei einem Probenalter von mehr als etwa 50.000 Jahren ist nur noch so wenig ^{14}C in der Probe enthalten, dass die Nachweisgrenze erreicht ist.

Flüssigszintillationsspektrometrie

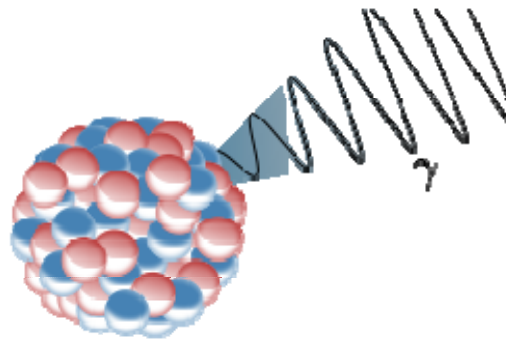
Eine sehr verbreitete Methode der Messung des radioaktiven Zerfalls von ^{14}C ist die Flüssigszintillationsspektrometrie. Der zu datierende Kohlenstoff wird dazu in einer Vakuumlinie über mehrere Zwischenstufen in Benzol umgewandelt. Diesem wird anschließend ein organischer Szintillator beigemischt. Der Szintillator wandelt die Energie der beim Zerfall von ^{14}C entstehenden Elektronen in Lichtpulse um. Diese werden dann im Spektrometer von hochempfindlichen Photomultipliern verstärkt und gezählt. Dieses Verfahren besitzt gegenüber der Zählrohrmethode den Vorteil, dass mehr Kohlenstoff in der Messkammer untergebracht werden kann. Dadurch sind bei gleicher Genauigkeit kürzere Messzeiten möglich. Außerdem sind für die Radiokohlenstoffdatierung optimierte Spektrometer kommerziell erhältlich, während die Zählrohre Eigenentwicklungen der jeweiligen Labore sind.

Beschleunigermassenspektrometrischer Nachweis

Durch die Entwicklung der Beschleuniger-Massenspektrometrie, welche die Methoden der Massenspektrometrie und kernphysikalische Untersuchungsmethoden miteinander vereinigt und so die Messung kleinster Isotopenverhältnisse bis zu 10^{-15} ermöglicht, wurde Ende der 1970er Jahre der direkte Nachweis von ^{14}C -Atomen möglich, ohne erst deren Zerfall abwarten zu müssen. Deshalb können mithilfe dieser Methode auch weitaus kleinere Probenmengen als bei Messungen mit der Zählrohrmethode verwendet werden, was der Radiokohlenstoffmethode ganz neue Anwendungsgebiete erschloss. Die typische Größe einer Probe für die Beschleuniger-Massenspektrometrie beträgt etwa 1 mg; mit dieser Probenmenge können innerhalb einer Messzeit von etwa einer Stunde 40.000 ^{14}C -Atome einer modernen Probe nachgewiesen werden bzw. eine Genauigkeit von 0,5% erreicht werden, was einem Fehler von 40 Jahren entspricht. Im Gegensatz zur Zählrohrmethode ist hierzu allerdings eine weitaus aufwändigere und teurere Technik erforderlich.

Gammastrahlung

Gammastrahlung – auch **γ -Strahlung** geschrieben – im *engeren* Sinne ist eine besonders durchdringende elektromagnetische Strahlung, die beim Zerfall der Atomkerne vieler natürlich vorkommender oder künstlich erzeugter radioaktiver Nuklide entsteht. Der Name stammt von der Einteilung der ionisierenden Strahlen aus radioaktivem Zerfall in Alphastrahlung, Betastrahlung und Gammastrahlung mit deren steigender Fähigkeit, Materie zu durchdringen. Alpha- und Betastrahlung bestehen aus geladenen Teilchen und sind, obwohl weniger stark durchdringend, dennoch oft energiereicher als die ungeladenen Photonen oder Quanten der Gammastrahlung. Im *weiteren* Sinne wird mit **Gammastrahlung** jede elektromagnetische Strahlung mit Quantenenergien über etwa 200 keV bezeichnet, unabhängig von der Art ihrer Entstehung.



Gammastrahlung im engeren Sinne entsteht als Folge eines vorhergehenden radioaktiven Zerfalls (z.B. α - oder β -Zerfall) eines Atomkerns. Der nach dem Zerfall zurückbleibende Kern, der Tochterkern, befindet sich in der Regel in einem angeregten Zustand; anschaulich gesagt schwingt oder rotiert er beispielsweise. Diese Anregungsenergie kann in Form von Gammastrahlung abgegeben werden. Beim Übergang in einen weniger angeregten Zustand oder den Grundzustand wird γ -Strahlung ausgesandt, siehe Zerfallsschema. Aufgrund der quantenmechanischen Eigenschaften des Atomkerns kann dabei nur Strahlung ganz bestimmter Energien (nämlich der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen) abgegeben werden. Gammastrahlung ist also durch ein diskretes Energiespektrum gekennzeichnet.

Zur Abschirmung der – im Vergleich zu geladenen Teilchen besonders durchdringenden – Gammastrahlung werden **deutlich dickere Materieschichten** benötigt als für Alpha- oder Betastrahlung. Je größer die Ordnungszahl eines Materials ist, desto größer ist seine Abschirmwirkung. Deshalb verwendet man beispielsweise Bleiplatten. Die Abschirmwirkung von Materialien wird quantitativ durch die Halbwertsschicht beschrieben.

Wird Gammastrahlung in menschlichem, tierischem oder pflanzlichem Gewebe absorbiert, wird ihre Energie in Ionisations- und anderen Vorgängen wirksam. Dabei treten im Gewebe *Sekundärstrahlungen* wie freigesetzte Elektronen und Röntgenstrahlung auf. Insgesamt ergeben sich – **für den Organismus meist schädliche – Wirkungen durch das Aufbrechen chemischer Bindungen.** Das Ausmaß der Gesamtwirkung wird durch die Äquivalentdosis beschrieben. Die Folgen können am bestrahlten Organismus selbst (*somatische* Schäden) oder, durch **Schädigung des Erbguts**, an seinen Nachkommen als *genetische* Schäden auftreten.

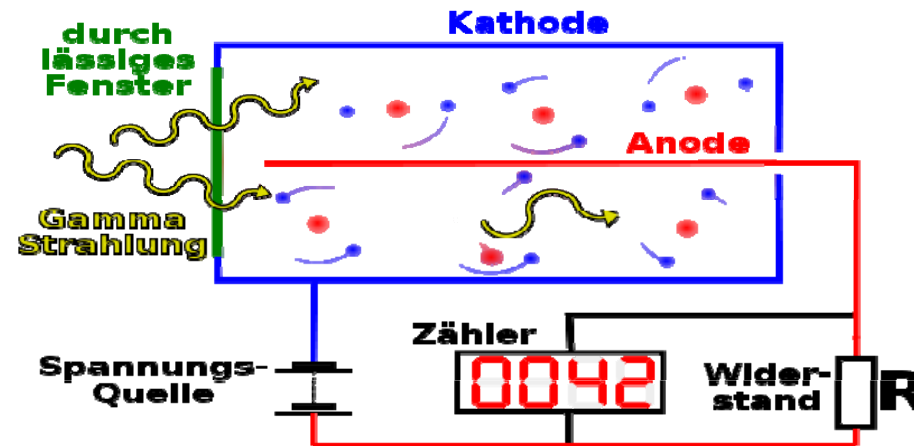
Die Funktionsfähigkeit der Zellen bleibt auch bei hohen Strahlendosen zunächst meist erhalten. Sobald aber die Zelle sich teilt oder aus einem anderen Grund eine große Zahl an Proteinen neu produzieren muss, führen die Strahlenschäden im Erbgut zu Problemen. Die Strahlenkrankheit wirkt deswegen erst nach einiger Zeit tödlich, wenn bestimmte, lebenswichtige Zelltypen, die auch beim gesunden Menschen regelmäßig absterben und neu gebildet werden, insbesondere Blutzellen, nicht mehr in ausreichender Zahl vorhanden sind. Alternativ kann es dazu kommen, dass durch die Strahlung nur gering geschädigte Zellen ihre Teilungsfähigkeit behalten, sich aber künftig unkontrolliert teilen und zu bösartigen Tumoren wachsen.

Sterilisation, Keimverminderung, strahlenchemische Vernetzung

Zur Strahlensterilisation kommen *Gammabestrahlungsanlagen* für technische und medizinische Produkte sowie für Lebensmittel zum Einsatz. In diesen Anlagen wird fast ausschließlich das oben erwähnte Cobalt-60 (^{60}Co) verwendet. Der Gammastrahler Caesium-137, der durch Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus Kernreaktoren gewonnen wird, steht nicht in ausreichenden Mengen für eine kommerzielle Anwendung zur Verfügung. Dagegen wird radioaktives Cobalt-60 aus nicht-radioaktivem Cobalt-59 in speziellen Kernreaktoren in großen Mengen erbrütet.

Geigerzähler

Der **Geigerzähler** (auch *Geiger-Müller-Indikator* oder *Geiger-Müller-Zählrohr*) zeigt eine mögliche ionisierende Strahlung an. Er wurde von dem Physiker Hans Geiger erfunden, von seinem Assistenten Walther Müller wesentlich verbessert und darum nach beiden benannt.



Tritt eine ionisierende Strahlung ein, so trennt diese auf ihrer Flugbahn Hüllenelektronen des Edelgases von ihren Atomkernen. Die Elektronen werden aufgrund der elektrischen Feldkraft in Richtung Anode beschleunigt und kollidieren dabei mit weiteren Gasatomen, die so ebenfalls ionisiert werden. (Stoßionisation, Gasentladung). Die so lawinenartig freigesetzten Elektronen ermöglichen nun einen Stromfluss zwischen Anode und Kathode, der mittels eines in den Stromkreis eingeschalteten Widerstandes in ein Spannungssignal umgewandelt wird. Dieses Signal wird dann elektronisch verstärkt und entweder als akustisches (Knacken, Piepston) oder optisches Signal (Blinken eines Lämpchens) angezeigt. Um die Aktivität bzw. die Dosisleistung eines Präparates abschätzen zu können, werden diese Impulse außerdem von einer Zählerschaltung erfasst.

Szintillator

Ein **Szintillator** ist ein Körper, der beim Durchgang von energiereichen geladenen Teilchen oder Photonen angeregt wird und die Anregungsenergie in Form von Licht (meist im UV- oder sichtbaren Bereich) wieder abgibt. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Szintillation** (von lateinisch scintillare: „funkeln, flackern“). Der Effekt wird vor allem in Szintillationszählern zur Messung der Energie und Intensität ionisierender Strahlung genutzt. Die im Szintillator deponierte Energie jedes einzelnen Stoßvorgangs ergibt sich durch Messung der Lichtmenge (z. B. mit einem Photomultiplier oder einer Photodiode), die Intensität (der Fluss der Teilchen oder Quanten) aus der Anzahl der Szintillationen pro Zeiteinheit.

Anorganische Szintillatoren sind Kristalle, die mit Aktivator-Zentren (Farbzentren) dotiert sind. Ionisierende Teilchen erzeugen in diesem Festkörper freie Elektronen, freie Löcher oder Elektron-Loch-Paare (Exzitonen). Im Kristallgitter wandern solche Anregungszustände, bis sie auf ein Aktivatorzentrum treffen. Das Aktivatorzentrum ist nun angeregt und zerfällt unter Emission von sichtbarem Licht (Photon) wieder in den Grundzustand. Der Ionisationsverlust der Teilchen bestimmt, wie viele Photonen im Kristall erzeugt werden. Damit der Szintillator für sein eigenes Licht genügend durchlässig ist, muss er i. A. ein Einkristall sein. Beispiele: Bismutgermanat, Lutetiumoxyorthosilicat, Natriumiodid, Zinksulfid

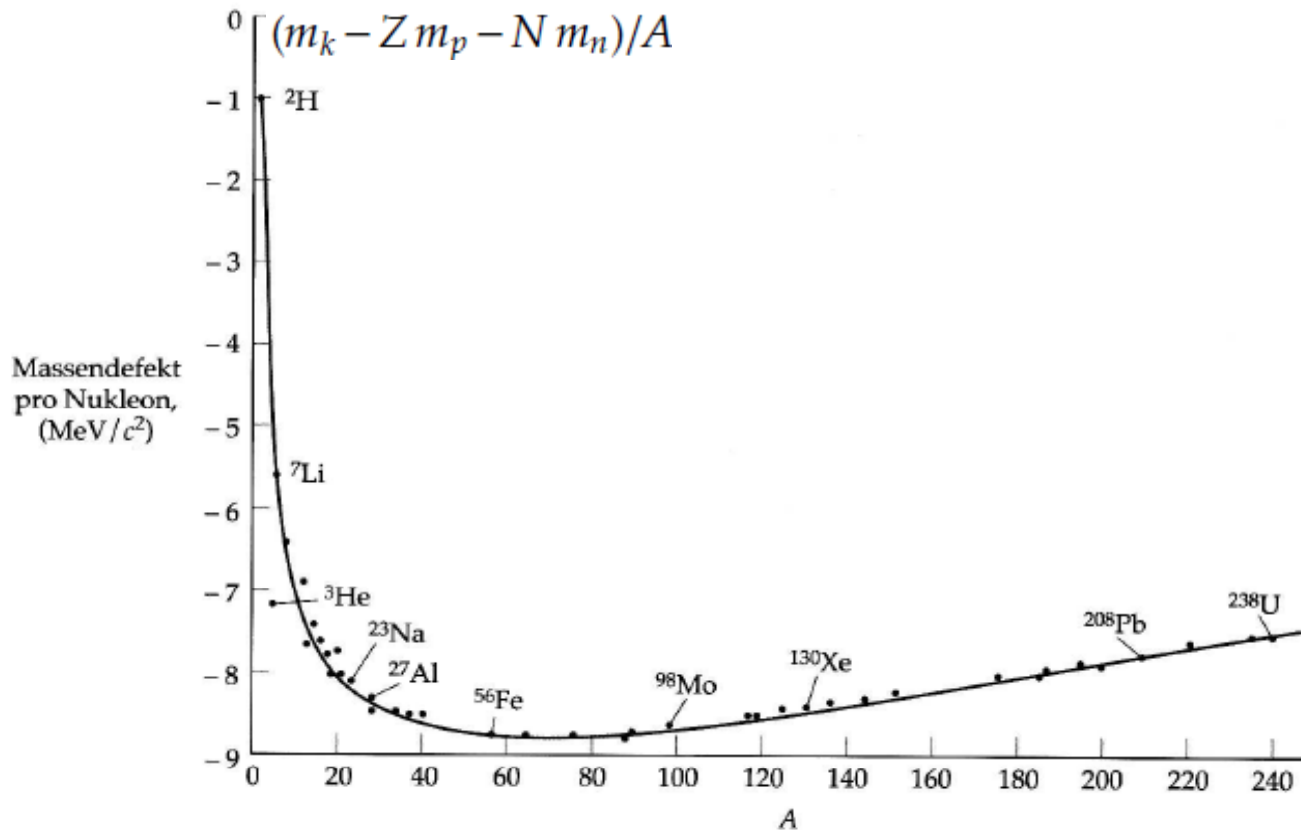
Organische Szintillatoren können Kristalle, Flüssigkeiten oder polymere Festkörper sein. Der Mechanismus der Szintillation beruht auf der Anregung von Molekülzuständen in einem primären Fluoreszenzstoff, die beim Zerfall UV-Strahlung emittieren. Ein zweites fluoreszierendes Material, z. B. der „Wellenlängenschieber“ POPOP, muss dem Szintillator hinzugefügt werden, da UV-Strahlung in den meisten durchsichtigen Materialien eine nur sehr geringe Reichweite besitzt.

Kernreaktionen

Genau wie Elektronen können auch Kerne mit anderen Teilchen stoßen, wobei man elastische und inelastische Streuung unterscheidet. Außerdem ist es möglich, dass das einfallende Teilchen vom Kern absorbiert wird, wobei ein oder mehrere Teilchen emittiert werden können. Die Energiemenge, die bei solch einer Reaktion freigesetzt oder absorbiert wird, heißt **Q-Wert der Reaktion (=Ruhemassendifferenz multipliziert mit c^2)**.

$$Q = -(\Delta m)c^2$$

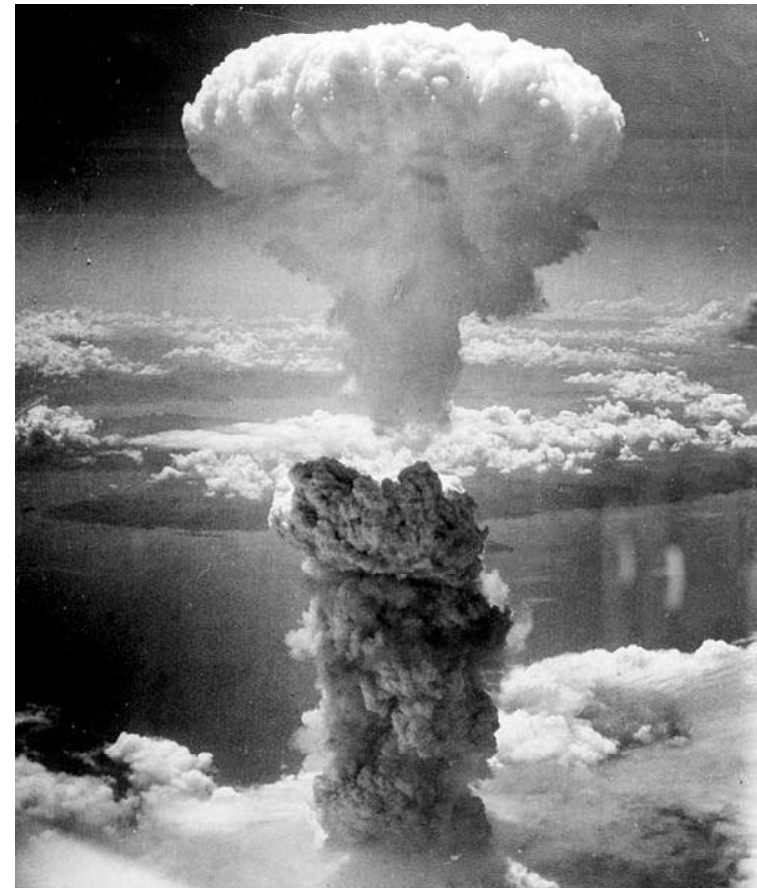
Kernspaltung und Kernfusion



In Abbildung ist der sogenannte Kernmassendefekt pro Nukleon, gegen die Massenzahl A aufgetragen. Der Kernmassendefekt entspricht genau dem Negativen der Bindungsenergie. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die (effektive) Masse pro Nukleon für sehr schwere ($A > 200$) und sehr leichte ($A < 20$) Nuklide größer ist als für mittelschwere Nuklide. **Daher wird Energie frei, wenn ein sehr schwerer Kern in zwei leichtere Kerne zerfällt (Kernspaltung). Gleiches gilt für die Fusion zweier leichter Kerne zu einem schweren (Kernfusion).**

Kernwaffe

Kernwaffen – auch **Nuklearwaffen** oder **Atomwaffen** genannt – sind Waffen, deren Wirkung auf kernphysikalischen Prozessen beruht, insbesondere der Kernspaltung und Kernfusion. Konventionelle Waffen beziehen dagegen ihre Explosionsenergie aus chemischen Reaktionen, bei denen die Atomkerne unverändert bleiben. Zusammen mit biologischen und chemischen Waffen gehören Kernwaffen zu den so genannten *ABC-Waffen*.



Die technische Entwicklung der Kernwaffen seit den 1940er Jahren hat eine große Vielfalt unterschiedlicher Varianten hervorgebracht. Unterschieden werden grundsätzlich **Atombomben nach dem *Kernspaltungs-* oder *Fissionsprinzip* („klassische“ Atombombe) und nach dem *Kernfusionsprinzip* (Wasserstoff- oder H-Bombe).**

Bei einer **Kernspaltungsbombe** wird eine **überkritische Masse auf engem Raum** zusammengebracht. Wie hoch diese Masse ist, hängt von Material, Geometrie und Konstruktion ab. Die kleinste kritische Masse lässt sich mit einer Kugelform des spaltbaren Materials erreichen, am häufigsten werden **Uran 235 oder Plutonium 239** verwendet. Ab einem bestimmten Verhältnis von Masse zur Oberfläche des Spaltmaterials können Neutronen, die beim spontanen Zerfall einzelner Kerne entstehen, weitere Kerne im Material spalten, wobei diese wiederum einige Neutronen liefern. Es kommt zur **nuklearen Kettenreaktion**, in deren Verlauf immer weitere Kerne gespalten werden.

Bei der **Fusionsbombe** wird zunächst eine **Kernspaltungsbombe gezündet**. Die dadurch im Inneren der Bombe erzeugten **Drücke und Temperaturen reichen** aus, um in dem in ihr enthaltenen schweren Wasserstoff (Deuterium und Tritium) die **Fusionsreaktion** zu zünden.

Kritische Masse bezeichnet in der Kernphysik und Kerntechnik diejenige **Mindestmasse** eines aus einem spaltbaren Nuklid bestehenden Objektes, **ab der die effektive Neutronenproduktion eine Kettenreaktion der Kernspaltung aufrechterhalten** kann.

Isotop	Kritische Masse			Link
	unreflektiert	reflektiert (20cm H ₂ O)	reflektiert (30cm Stahl)	
Thorium-229		2839 kg	2262 kg	994 kg
Protactinium-231		580–930 kg ?	?	?
Uran-233		16,5 kg	7,3 kg	6,1 kg [1]
Uran-234		145 kg	134 kg	83 kg
Uran-235		49,0 kg	22,8 kg	17,2 kg [2]
Neptunium-235		66,2 kg	60 kg	38,8 kg
Neptunium-236		6,79 kg	3,21 kg	3,3 kg
Neptunium-237		63,6-68,6 kg	57,5-64,6 kg	38,6 kg [3]
Plutonium-236		ca. 8,04-8,42 kg	5,0 kg	3,74-4,01 kg
Plutonium-237		ca. 3,1 kg	1,71 kg	1,62 kg
Plutonium-238		ca. 9,04 -10,31 kg	7,35 kg	4,7 kg [4]
Plutonium-239		10,0 kg	5,42 - 5,45 kg	4,49 kg [5]
Plutonium-240		35,7-39,03 kg	32,1-34,95 kg	18,3-22,6 kg
Plutonium-241		12,27 - 13,04 kg	5,87-6,68 kg	5,05-5,49 kg
Plutonium-242		85,6 kg	78,2 kg	36,2-48,1 kg
Americium-241		57,6-75,6kg	52,5-67,6 kg	33,8-44,0 kg
Americium-242m		9–18 kg	3,2-6,4 kg	3-4,6 kg [6]
Americium-243		50-209 kg	195 kg	88-138 kg [7]
Curium-242		24,8-371 kg	17-260 kg	7-231 kg
Curium-243		7,4-8,4 kg	2,8 kg	2,8-3,1 kg
Curium-244		23,2-33,1 kg	22,0-27,1 kg	13,2-16,81
Curium-245		6,7-12 kg	2,6-3,1 kg	2,7-3,5 kg [8]
Curium-246		38,9-70 kg	33,6 kg	22-23,2 kg [9]
Curium-247		7 kg	3,5 kg	2,8-3,0 kg [10]
Curium-248		40,4 kg	34,7 kg	21,5 kg
Curium-250		23,5 kg	21,4 kg	14,7 kg
Berkelium-247		75,7 kg	41,2 kg	35,2 kg
Berkelium-249		192 kg	179 kg	131 kg
Californium-249		5,91 kg	2,28 kg	2,39 kg
Californium-250		6,55 kg	5,61 kg	3,13 kg
Californium-251		5,46-9 kg	2,45 kg	2,27 kg [11]
Californium-252		5,87 kg	2,91 kg	3,32 kg
Californium-254		4,27 kg	2,86 kg	2,25 kg
Einsteinium-254		9,89 kg	2,26 kg	2,9 kg

Allgemein bekannt für ihre Arbeit bei der Entwicklung von Kernwaffen sind **Robert Oppenheimer und Edward Teller**. Jedoch der wohl erste Wissenschaftler, der ernsthaft über den tatsächlichen Bau einer Kernwaffe nachdachte, war der ungarische Physiker Leó Szilárd. Bereits im September 1933 dachte er an die Möglichkeit, mittels Beschuss durch Neutronen Atomkerne zu einer Kettenreaktion anzuregen. Diese Idee war zu jener Zeit noch sehr umstritten und mehr spekulativ, später auf diesem Gebiet sehr erfolgreiche Forscher wie Ernest Rutherford, Enrico Fermi und Otto Hahn glaubten damals noch nicht daran, dass Kerne sich überhaupt spalten lassen.

Nach der erfolgreichen Urankernspaltung 1938 durch Otto Hahn und Fritz Straßmann und deren korrekter theoretischer Deutung durch Lise Meitner und deren Neffen Otto Frisch war es im Frühsommer 1939 soweit, dass die notwendigen theoretischen Grundlagen und experimentellen Befunde veröffentlicht waren, um bei ausreichender Verfügbarkeit von spaltbarem Uran eine Kernwaffe zu bauen. Diese Möglichkeit erkannten zuerst die beiden an der Universität Birmingham arbeitenden deutsch-österreichischen Emigranten Rudolf Peierls und Otto Frisch. In einem geheimen Memorandum aus dem März 1940 beschrieben sie theoretische Berechnungen zum Bau einer Uran-Bombe und warnten eindringlich vor der Möglichkeit des Baus einer Atombombe durch Deutschland. Infolgedessen wurde die ebenfalls geheim gehaltene britische MAUD-Kommission ins Leben gerufen, die Forschungen zum Bau einer Atombombe empfahl.

Schon vor dem Beginn des Zweiten Weltkrieges am 1. September 1939 richteten die drei aus Deutschland in die Vereinigten Staaten emigrierten Physiker Leó Szilárd, Albert Einstein und Eugene Wigner im August 1939 einen Brief an den damaligen US-Präsidenten Franklin D. Roosevelt, um ihn vor der Möglichkeit der Entwicklung einer Atombombe in Deutschland zu warnen und ihn im Gegenzug zu der Entwicklung einer eigenen Atombombe anzuregen. Doch es sollte noch bis zum Herbst 1940 dauern, bis Enrico Fermi und Leó Szilárd genügend finanzielle Mittel erhielten, um mit der Entwicklung eines Kernreaktors zu beginnen.

Im nationalsozialistischen Deutschland sollen während des Zweiten Weltkrieges Wissenschaftler wie Werner Heisenberg, Carl Friedrich von Weizsäcker, Walther Gerlach, Kurt Diebner und Otto Hahn unter anderem im Rahmen des deutschen Uranprojektes an der militärischen Nutzbarmachung der Kernspaltung zur Erreichung deutscher Kriegsziele gearbeitet haben. Nach dem Krieg wurde jedoch festgestellt, dass im Uranprojekt keine Kernwaffen entwickelt wurden.

Schmutzige Bombe

Bei einer sogenannten „Schmutzigen Bombe“ wird die vernichtende Wirkung der Explosion mit der großflächigen und jahrelangen Verstrahlung durch radioaktiven Fallout weiter gesteigert. Dieses wird durch den Aufbau der Waffe oder durch eine Kernexplosion auf dem Erdboden erreicht (für letzteres siehe Kernwaffenexplosion). Insbesondere wurde die Kobaltbombe als schmutzige Bombe bezeichnet. In dieser Bauform wird um den eigentlichen Sprengsatz ein Kobaltmantel angebracht. Dieses Metall wird durch die Explosion in ^{60}Co umgewandelt, ein stark strahlendes Isotop mit relativ langer Halbwertszeit, das als Staub herabregnen und das betreffende Gebiet für lange Zeit kontaminieren sollte.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde der Begriff Schmutzige Bombe umgeprägt. Man bezeichnet damit nun einen Sprengsatz aus konventionellem Sprengstoff, dem radioaktives Material beigemischt wurde, das durch die Explosion möglichst weit verteilt werden soll. Eine Kernspaltung und somit Nuklearexplosion findet dabei nicht statt. Es wird vermutet, dass Terroristen derartige USBV einsetzen könnten, um Schrecken zu verbreiten.

Auch die Internationale Atomenergieorganisation warnt davor, dass Terroristen radioaktives Material, z. B. aus Ländern der ehemaligen Sowjetunion, erwerben könnten. Dort, ebenso wie in den USA, kommen immer wieder Substanzen aus Industrie, Forschungseinrichtungen oder Krankenhäusern abhanden. Da das Material für eine schmutzige Bombe aus der zivilen Kerntechnik gewinnbar ist, wird auch die gesamte Kerntechnik zu den Dual Use Produkten gezählt.

Als Beispiel für die Folgen einer schmutzigen Bombe wird teils der Goiânia-Unfall in Brasilien 1987 herangezogen, bei dem Diebe in ein leerstehendes Krankenhaus einbrachen und einen Behälter mit radioaktivem $^{137}\text{Caesiumchlorid}$ stahlen und nach Hause nahmen. Aus Neugier und Unwissenheit hantierten viele Menschen in ihrer Umgebung mit dem bläulich fluoreszierenden Material und trugen Teile der Substanz mit sich herum. Mehrere Wohnbezirke waren betroffen, und schließlich starben vier Menschen an der Strahlenkrankheit, zehn weitere brauchten intensive medizinische Behandlung, 85 Gebäude mussten abgerissen oder dekontaminiert werden.