

eine kurze Geschichte über ...

Die Radioaktivität

**Maturaarbeit von Reto Stöckli
1993**

Kantonsschule Sursee

Betreuung durch Otto Steiger

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort

1. Entdeckung der Radioaktivität
2. Was ist Radioaktivität und wie entsteht sie ?
 - 2.1 Eine wissenschaftliche Erklärung - Die Struktur der Materie
 - 2.2 Strahlenarten
 - 2.3 Abschirmung der Strahlen
 - 2.4 Halbwertszeit
3. Natürliche und künstliche Radioaktivität
4. Messung der Radioaktivität
5. Kernspaltung, Kettenreaktion und ihre Anwendungen
6. Auswirkungen auf lebende Organismen
 - 6.1 Somatische Schäden
 - 6.2 Genetische Schäden
7. Strahlenschutzvorschriften
8. Der Petkau-Effekt

Literaturverzeichnis

1. Die Entdeckung der Radioaktivität

Im November 1895 hatte Conrad Wilhelm Röntgen (1845-1923) in Würzburg eine neue Strahlung entdeckt. Sie entstand bei der abrupten Abbremsung von schnellen Elektronen. Er nannte sie X-Strahlung, sie wurde aber bald überall als Röntgen-Strahlung nach ihrem Entdecker bezeichnet. Röntgen erhielt für seine Entdeckung 1901 bei der ersten Nobelpreis-Verleihung den Preis für Physik.

Der Physiker Henri Becquerel (1857-1908) und Professor in Paris gilt als der eigentliche Entdecker der Radioaktivität. Angeregt durch Röntgen, experimentierte er mit fluoreszierenden und phosphoreszierenden Stoffen. Er legte eine fluoreszierende Uranverbindung auf eine lichtdicht verpackte Photoplatte. Licht konnte also keinen Einfluss haben. Ausserdem legte er zwischen das Versuchsobjekt und die Photoplatte eine Aluminiumfolie. Die diffuse Abbildung seines Kristalls auf der Photoplatte war der Beweis einer neuen Strahlung - der Becquerel-Strahlung, wie sie genannt wurde.

Eine junge Polin, Marie Curie (1867-1934) absolvierte zu dieser Zeit ihre Doktorarbeit bei Henri Becquerel. Sie war die erste Frau, die in Paris promovierte und hatte darum mit vielen Vorurteilen zu kämpfen. Sie war verheiratet mit dem Physiker Pierre Curie, der ihr bei der Entdeckung neuer Radioaktiver Elemente zur Hilfe stand. Marie Curie mass die Radioaktivität quantitativ mit Hilfe der Ionisationskammer. Diese "Aktivität" verhielt sich proportional zum Gehalt an Uran in einem bestimmten Stoff.

Sie extrahierte ein Element aus Erzen, das eine 100-mal stärkere Aktivität als Uran aufwies. Marie Curie gab ihm den Namen Polonium zu Ehren ihres Heimatiandes. Mit Chemikern zusammen fand sie auch das Element Radium. Die gesicherte Existenz von Radium konnte allerdings nur schwer festgestellt werden, da aus einer Tonne Pechblende nur etwa 200 mg Radium gewonnen werden können. Die Curies und einige Kollegen extrahierten darum in mühsamer Kleinarbeit aus einigen Tonnen Abfall einer Urangewinnungsanlage nur einige Gramm Radium. Strahlenschutz war zu dieser Zeit selbstverständlich noch nicht bekannt und radioaktive Stoffe wurden mit blossen Händen gehandhabt.

Noch heute sind die Laborbücher der Curies relativ stark radioaktiv kontaminiert und werden von der Bibliotheque Nationale in Paris nur ausgeliehen, wenn man eine Versicherung unterschreibt, die die Bibliothek von jeder Verantwortung enthebt.

Der Nobelpreis ging 1903 zur Hälfte an Becquerel und zur andern Hälfte an das Ehepaar Curie für die Entdeckung der Spontanen Radioaktivität.

In der Folge begannen sich viele Wissenschaftler mit dem Phänomen Radioaktivität zu befassen. Ernest Rutherford (1871-1937) teilte die Strahlung in die drei Komponenten α und γ auf und beschrieb ihre Eigenschaften. Er erhielt 1908 den Nobelpreis. Otto Hahn (1879-1968) und Lise Meitner (1878-1968) beschäftigten sich mit der Entdeckung neuer radioaktiver Isotope. Irene Joliot-Curie, Tochter des Ehepaares Curie und ihr Mann Frederic Joliot entdeckten schlussendlich die künstliche Radioaktivität und erhielten dafür 1935 den Nobelpreis in Chemie.

Dies ist nur ein Bruchteil der Wissenschaftler, die in den Anfängen der Radioaktivitätsforschung mitgewirkt haben. Eine grosse Anzahl beschäftigte sich mit dem Thema und in den Jahren 1903 bis 1967 wurden nicht weniger als 33 Nobelpreise für die Erforschung der Radioaktivität und deren Anwendungen vergeben. Aus dieser grossen Zahl wird ersichtlich, wie bedeutsam die Entdeckung der Radioaktivität für die Naturwissenschaften gewesen ist. Diese Entdeckungen führten in der Folge zu phantastischen wie auch sehr tragischen Entwicklungen: Die Uranspaltung wurde zur Energiegewinnung weiterentwickelt. Es bildete sich eine günstige Energiequelle, die aber - wie man im Nachhinein erkennt - mit unberechenbaren Risiken verbunden ist. Die Sicherheit von Kernkraftwerken und deren Beherrschbarkeit in jeglichen Situationen ist sicher seit dem Tschernobyl-Desaster im Jahre

1986 in Frage gestellt. Es hat sich herausgestellt, dass die Radioaktivität für Lebewesen schädlich ist und bei den Mengen von strahlenden Stoffen, die heute in der Industrie und Wissenschaft verwendet werden, kann deren Strahlung den Tod von hunderttausenden bedeuten.

Nicht zuletzt interessierte sich das Militär schon bald für die Kernspaltung und entwickelte daraus die Atombombe mit den fatalen Auswirkungen, die jedermann bekannt sein sollten. Wissenschaftler sind heute in zwei Gruppen gespalten. Die eine befürwortet die Entwicklungen auf dem Gebiet Radioaktivität und Kernspaltung (Kernfusion). Sie sehen die Gefahren für die Menschheit als gering an und berufen sich auf den Nutzen, der das "Atomzeitalter" in den Bereichen Medizin und Energieversorgung gebracht hat. Die andere Gruppe - eine Minderheit - ist gegen diese Fortschritte und weist auf die vielen ungelösten Probleme bezüglich Sicherheit, Lagerung von Abfällen, Schwarzhandel mit Spaltmaterial, Bedrohung durch Atomkrieg, usw. hin. Sie stammen vielfach aus dem militärischen Sektor und haben sich abgesetzt, weil sie ihre Entwicklungen (Atombombe...) nicht mehr mit ethischen Grundsätzen verbinden konnten. Gefahren birgt die Entwicklung auf dem Gebiet der Radioaktivität noch und noch, das verschweigen auch die Atombefürworter nicht. Doch wie gut der Mensch mit ihnen umgehen kann, steht wohl noch in den Sternen.

2. Was ist Radioaktivität und wie entsteht sie?

2.1 Eine wissenschaftliche Erklärung - Die Struktur der Materie

Die Materie ist grundsätzlich aus kleinen Bausteinen zusammengesetzt. Es sind chemische Verbindungen, sogenannte Moleküle, die aus chemisch unzerlegbaren Elementen bestehen. es gibt etwas mehr als 100 Elemente, die zur besseren Übersicht in einem Periodensystem angeordnet werden. Das Periodensystem wurde vom Chemiker D. Mendelejew (1834-1907) aufgestellt. Elemente bestehen aus nur einem Atom und unterscheiden sich durch ihr Gewicht und ihre Grösse.

Nach dem Atommodell von Niels Bohr (1885-1962) von 1913 besteht jedes Atom aus einem positiv geladenen Kern, der auf kleinstem Volumen nahezu die gesamte Atommasse vereinigt. Dieser wird von negativ geladenen Elektronen auf festen Bahnen umkreist. Dieses Bild ist zwar anschaulich und wird noch häufig zur einfachen Illustrierung "missbraucht".

Die Quantenmechanik liefert hingegen die Aussage, dass solche Elektronenbahnen nicht existieren und dass sich nur die Wahrscheinlichkeit angeben lässt, ein Elektron an einem bestimmten Ort innerhalb des Atoms anzutreffen. Dies ergibt das Bild von Elektronenwolken, die den Kern umhüllen und fest an ihn gebunden sind. Die Elektronenwolken sind gegen aussen allerdings nicht begrenzt und Elektronen können sich (auch wenn mit abnehmender Wahrscheinlichkeit) noch ausserhalb des Atoms aufhalten. Diese Theorie wurde erst mit der Entwicklung der Quantenphysik anfangs dieses Jahrhunderts ermöglicht.

Der Atomkern ist seinerseits aus kleinen Teilchen zusammengesetzt: den positiv geladenen Protonen und den ungeladenen Neutronen. Wenn die Anzahl der Protonen gleich der Anzahl Elektronen ist, ist das Atom elektrisch neutral, da beide Teilchenarten dieselbe Ladungseinheit besitzen - nur mit umgekehrten Vorzeichen. Ist dieser Ausgleich nicht gegeben, spricht man von positiven Ionen (zuwenig Elektronen) oder negativen Ionen (zuviele Elektronen).

Elektronen, Neutronen und Protonen sind Elementarteilchen. Es gibt noch weitere Elementarteilchen, die zum Teil erst mit modernen Teilchenbeschleunigern entdeckt wurden.

Es lassen sich folgende Gruppen von Radionuklide unterscheiden:

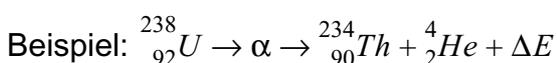
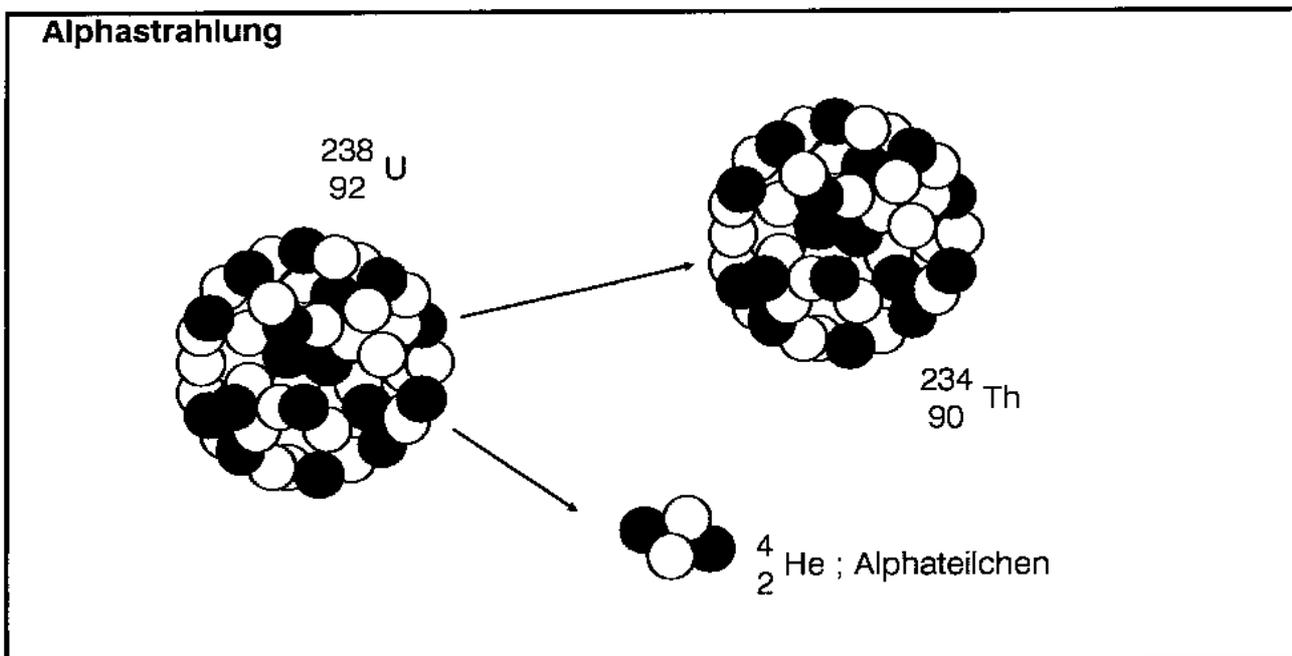
1. Nuklide, deren Entstehung in die Anfänge der Erdgeschichte zurückreicht, die aber noch vorhanden sind, weil sie eine Lebensdauer besitzen, die nicht viel kürzer als das Erdalter sind (Uran ${}_{92}^{238}\text{U}$, Thorium ${}_{90}^{232}\text{Th}$).
2. Nuklide, die durch natürliche und kosmische Strahlung immer wieder neu gebildet werden wie ${}^3_1\text{H}$ oder ${}^{14}_6\text{C}$.
3. Nuklide, die durch kerntechnische Aktivitäten von Menschenhand hergestellt werden.

Die Physikalische Wirkung der Strahlung hängt aber nicht von der Zugehörigkeit zu einer der drei Gruppen ab sondern nur von der Art und der Energie. Man unterscheidet weiter zwischen elektromagnetischer Strahlung (Röntgen, Gamma) und Teilchenstrahlung (Alpha, Beta, Neutronen). Mehr dazu im nächsten Kapitel.

2.2 Strahlenarten

Alphastrahlung

Alphaerfall tritt hauptsächlich bei den Elementen mit $Z > 82$ auf und trägt wesentlich zur natürlichen Radioaktivität bei. Die emittierten α -Teilchen sind ${}^4_2\text{He}$ -Kerne, bestehen also aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Demnach ändert sich bei einem α -Zerfall die Massenzahl um vier und die Ordnungszahl um zwei Einheiten.

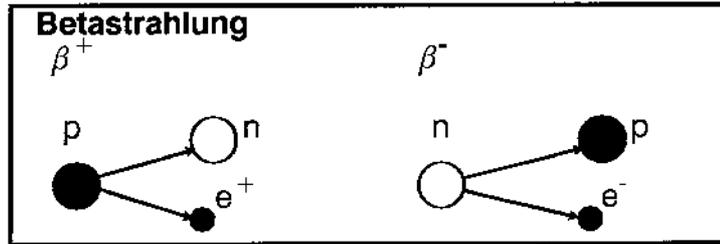


Die Zerfallsenergie ΔE entspricht der Differenz aus der Masse des ${}_{92}^{238}\text{U}$ -Kerns und der Summe der Massen von ${}_{90}^{234}\text{Th}$ und des ${}^4_2\text{He}$ -Kern. Das α -Teilchen erhält aus Impulserhaltungsgründen (Rückstoß) den Anteil $\Delta E \left[\frac{M_{\text{Th}}}{M_{\text{Th}} + M_{\alpha}} \right]$ als kinetische Energie.

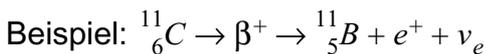
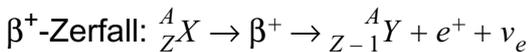
Betastrahlung

Man unterscheidet drei Arten: β^+ -Zerfall, β^- -Zerfall und Elektroneneinfang EC (engl.: Electron Capture). Die dabei entstehende Strahlung besteht aus Positronen (β^+) und Neutrinos oder Elektronen (β^-) und Antineutrinos. Betazerfälle kommen bei Isotopen nahezu aller Elemente von. Man kennt etwa 20 natürliche und weit über 1000 künstlich erzeugbare Betastrahler. β^- -Zerfälle spielen eine bedeutende Rolle beim Zerfall der Kernspaltungsprodukte.

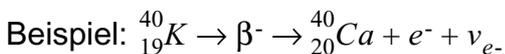
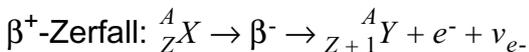
Neutrinos haben verschwindend kleine Massen und können Materie nahezu ungehindert durchdringen. Dies bedeutet, dass sie nicht abgeschirmt und nur mit riesigem experimentellem Aufwand nachgewiesen werden können. Deshalb blieb der Betazerfall anfänglich unverstanden. Erst im Jahr 1956 gelang die Beobachtung einer von Neutrinos ausgelösten Kernreaktion.



Beim β^+ -Zerfall wandelt sich im Kern ein Proton in ein Neutron unter Aussendung eines Positrons e^+ und ein Neutrino ν_e

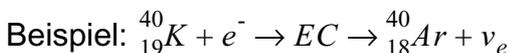
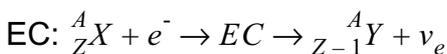


Umgekehrt geht beim β^- -Zerfall ein Neutron in ein Proton über und emittiert ein Elektron e^- und ein Antineutrino ν_{e^-} .

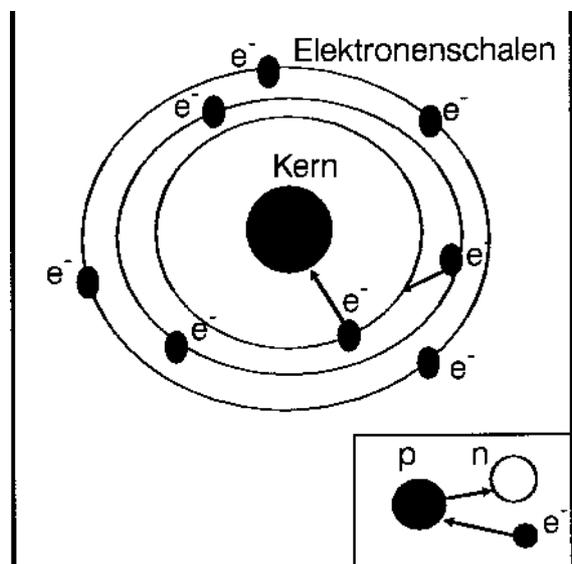


Diese Vorgänge können sich gegebenenfalls wiederholen, bis ein stabiler Kern entsteht.

Alternativ zum β^+ -Zerfall tritt der sogenannte Elektroneneinfang EC auf. Hierbei erfolgt die Umwandlung eines Protons in ein Neutron im Kern durch Einfangen eines Elektrons aus einer inneren Atomschale.

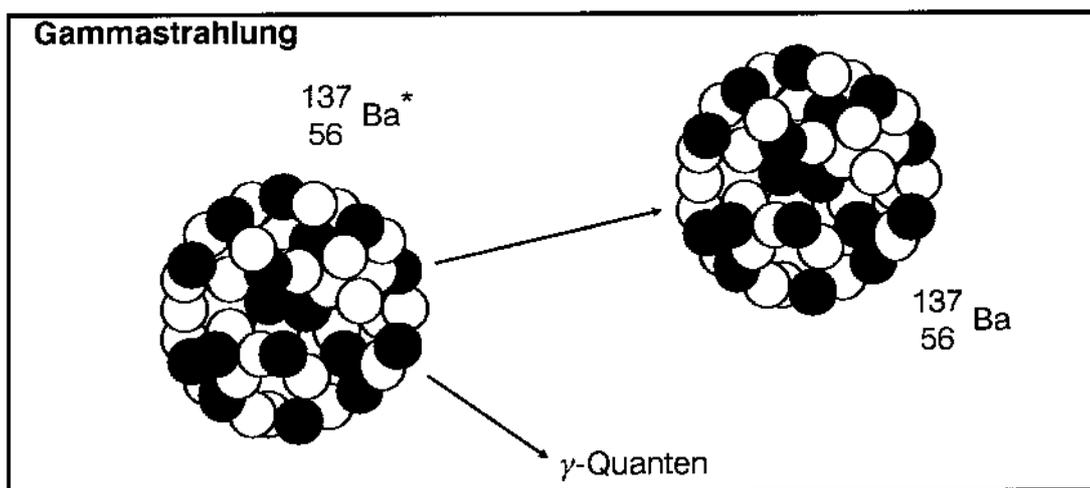
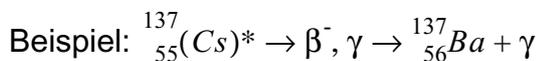
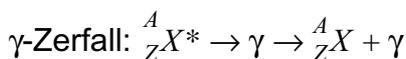


Bei diesem Zerfall wird nur ein Neutrino emittiert. Durch das Einfangen eines Elektrons wird dessen Platz frei. Er wird von einem Elektron einer äusseren Schale eingenommen. Beim Übergang wird Röntgenstrahlung emittiert. Röntgenstrahlung tritt stets als charakteristisches Merkmal des Elektroneneinfangs auf.



Gammastrahlung

Ein Gammazerfall findet statt, wenn ein Nuklid ${}^A_ZX^*$ in einem angeregten Zustand vorliegt (Der Stern symbolisiert die Anregung) und in einen festen Zustand unter Emission eines Photons übergeht. Dieser Effekt tritt häufig als Nachfolgereaktion bei α - oder β -Zerfällen auf, wenn bei diesen der Kern nicht im Grundzustand sondern in einem angeregten Zustand zurückbleibt:



Der Übergang erfolgt ohne Änderung von A und Z unter Aussendung eines oder mehrerer Photonen, deren Energie $E_\gamma = hf$ (fast) gleich der Differenz der Bindungsenergie des Nuklids im Ausgangs- und Endzustand ist (der Rückstoss ist hier sehr klein).

Ein Kern kann seine Anregungsenergie auch strahlungslos, dh. ohne γ -Emission, abgeben. Der angeregte Kern benutzt seine freiwerdende Energie, um ein Elektron aus der Hülle herauszulösen und so das Atom zu ionisieren. Dieser mit dem γ -Zerfall konkurrierende Zerfall wird "innere Konversion" IC (engl. Internal Conversion) genannt. Das dabei entstehende Loch in der entsprechenden Elektronenschale wird unmittelbar durch ein Elektron aus einer äusseren Schale wieder aufgefüllt. Dadurch wird ein Röntgenphoton ausgesandt (siehe auch EC).

Gamma- und Röntgenstrahlen zählen zur elektromagnetischen Strahlung. Sie haben eine bestimmte Frequenz f und bestehen aus Photonen mit der Energie $E = hf$ ($h = \text{Plancksches Wirkungsquantum} = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$). Röntgenstrahlen können ausser bei EC und IC auch im elektrischen Feld von Atomen entstehen. Die Anwendung dazu ist die Röntgenröhre, die in der Medizin benutzt wird.

Neutronenstrahlen

Bei sehr schweren Elementen, etwa oberhalb der Kernladungszahl 90, wird neben dem α -Zerfall in zunehmendem Masse "spontane Spaltung" als Zerfallsart beobachtet. Der Kern spaltet dabei ohne äussere Einwirkung in zwei, nicht gleich grosse Bruchstücke.

Beispiel: ${}^{254}_{96}\text{Cf}$ (Radioaktives Isotop des Californium)

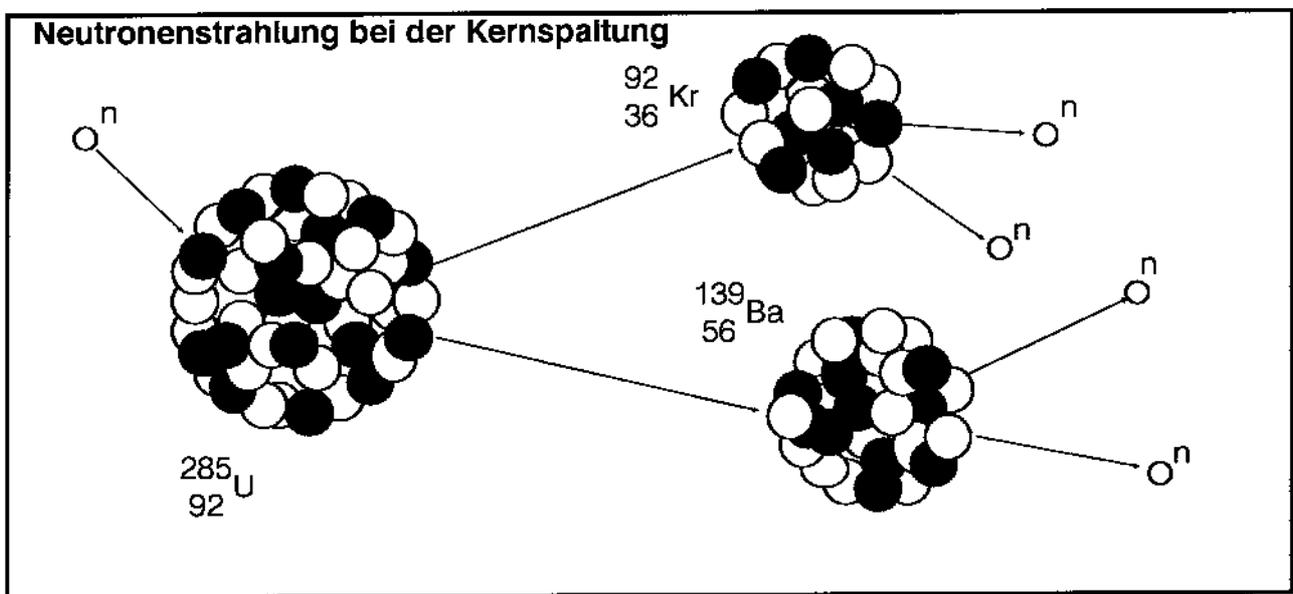
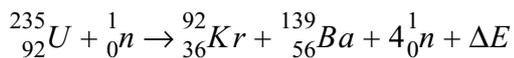
Bei der Kernspaltung werden neben den beiden primären Spaltprodukten auch einige schnelle Neutronen ausgesandt. Diese Neutronen sind ungeladen und zudem energiereich.

Sie sind zudem nur sehr schwer nachweisbar (konkret: nur durch eine weitere Kernreaktion).

Neben spontan ablaufenden Kernzerfällen können Kernumwandlungen auch durch Bestrahlung mit energiereichen Projektilen wie Elektronen, Protonen, Neutronen, Kernen oder Photonen eingeleitet werden. Man nennt dies künstliche Kernspaltung. Das allgemeine Schema einer solchen Kernreaktion ist:

Ausgangskern A + Projektil a -----> Endkern B + Reaktionsprodukte b + Energie der Reaktionsprodukte

Ein Beispiel für eine Kernspaltung ist die künstliche Spaltung des Uranisotops ${}^{235}_{92}\text{U}$. Es stellt nur eine der möglichen Spaltprodukte dar:



Wobei die Spaltprodukte selber radioaktiv sind und weiter (meistens §) zerfallen, bis sie sich zu stabilen Nukliden umgewandelt haben.

2.3 Abschirmung der Strahlen

Alphastrahlen

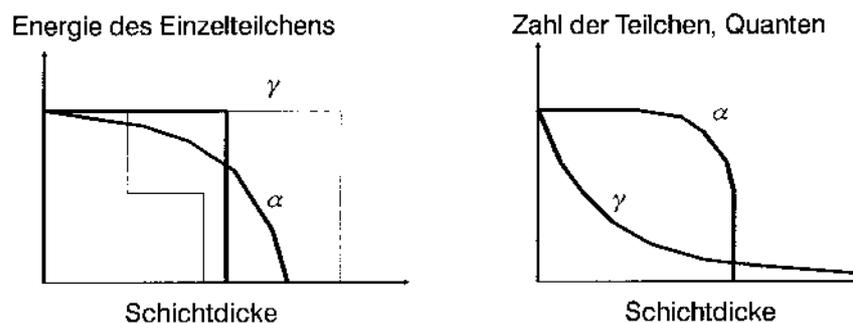
Alphateilchen sind relativ gross und schwer im Vergleich zu den anderen Strahlenarten. Sie haben eine grosse Ionisierungsdichte; vermögen also auf ihrem Weg viele andere Atome zu ionisieren. Dadurch, dass sie aus fremden Atomen Elektronen herauslösen, verlieren sie schnell Energie und haben darum eine geringe Reichweite. Sie beträgt in Luft nur einige Zentimeter. Ein Stück Papier oder die menschliche Haut können sie nicht durchdringen. α -Strahlen gefährden den Menschen nicht, wenn sie von aussen auf die Haut auftreffen. Hingegen sind inkorporierte, in den menschlichen Körper eingelagerte α -Strahler sehr gefährlich. Durch die grosse Ionisierungsdichte wird das umliegende Gewebe sehr stark geschädigt. Das eigentliche Strahlenschutzproblem beim Umgang mit α -Strahlern ist die Verhinderung der Inkorporation.

Betastrahlen

β -Teilchen (Elektronen und Positronen) haben eine viel geringere Masse (etwa 104-mal kleiner) als α -Teilchen, besitzen aber eine hohe Geschwindigkeit. Treffen β -Strahlen auf Materie, so entsteht Bremsstrahlung in Form von Röntgen- und Gammaquanten. Je grösser die Kernladungszahl Z des Bremsoder Abschirmmaterials ist, desto stärker ist die Bremsstrahlung. Deshalb benützt man zur Abschirmung von β -Strahlen leichtes Material wie Aluminium. Je energiereicher ein Teilchen ist, desto grösser ist sein Durchdringungsvermögen. Die Ionisierungsdichte von β -Teilchen ist um den Faktor 100-1000 kleiner als bei α -Teilchen, entsprechend grösser ist ihre Reichweite. Sie lassen sich aber mit einer dünnen Aluminiumplatte (einige mm) einfach abschirmen. β -Strahlen können die Haut durchdringen und die darunter liegende Keimschicht schädigen. Besonders gefährlich ist die Bestrahlung der Augenlinse.

Gammastrahlung

γ -Strahlung hat als elektromagnetische Welle von extrem kurzer Wellenlänge das höchste Durchdringungsvermögen. Im Gegensatz zu α -Teilchen, die kontinuierlich Energie verlieren, werden γ -Quanten entweder auf einmal ganz absorbiert oder mit Energieverlust gestreut. Die γ -Strahlung sinkt in Beziehung zur Weglänge exponentiell und ist theoretisch nie ganz null:



Bei einer Absorption eines γ -Quants wird seine gesamte Energie auf das Zielmaterial abgegeben. Zur Abschirmung werden Materialien benötigt, deren physikalische Dichte möglichst gross ist: Blei- oder Stahlplatten; meterdicker Beton.

Neutronenstrahlung

Neutronen als ungeladene Teilchen können nicht mit den elektrischen Ladungen der Elektronen und Kerne in Wechselwirkung treten. Sie "spüren" nur die Kernkräfte, die nur in unmittelbarer Nähe des Kerns wirken. Neutronen werden also nur wenn sie nahe an den Kern gelangen, eingefangen oder gestreut. Der Einfang in den Kern resultiert entweder in einer γ -Emission oder in einer Kernreaktion mit Aussendung von Strahlung. Neutronen werden ausserdem besser absorbiert, je langsamer sie sind, dh. je weniger Energie sie besitzen. Schnelle Neutronen werden deshalb zuerst gestreut und so gebremst. Eine solche Streuung resultiert häufig in einer γ -Emission des streuenden Kerns, der Bremsenergie des Neutrons aufnimmt. Die bei der Streuung und der Absorption von Neutronen entstehende γ -Strahlung kann ein zusätzliches Problem bei der Abschirmung bedeuten. Zur Abbremsung von Neutronen wird meistens Wasser verwendet (zB. Abklingbecken von neutronenstrahlendem abgebranntem Kernbrennstoff). Zur Absorption eignen sich borhaltige Verbindungen. Um die Strahlung vollständig abzuschirmen, sind dicke Beton- und Wasserschichten erforderlich.

2.4 Halbwertszeit

Jedes radioaktive Element benötigt für seinen Zerfall eine ganz bestimmte Zeit. Das Mass für diese Zerfallsgeschwindigkeit ist die sogenannte Halbwertszeit, die angibt, wann die Hälfte der Kerne eines ganz bestimmte Radionuklids zerfallen ist. Sie schwankt von Sekundenbruchteilen bis zu Milliarden von Jahren.

Bei Tritium (Radioaktiver Wasserstoff 3_1H) mit einer Halbwertszeit von 12.3 Jahren ist zum Beispiel von 1 kg Tritium nach 12.3 Jahren immer noch die Hälfte vorhanden. Der Rest hat sich zu inaktivem Helium umgewandelt.

Beim Plutonium ${}^{239}_{94}Pu$ - welches ausschliesslich bei der Atomspaltung produziert wird - beträgt die Halbwertszeit 24'390 Jahre. Dieses vom Menschen künstlich produzierte Element behält seine Aktivität sehr lange bei. Daneben gibt es auch Stoffe mit einer extrem kurzen (Xenon-144: eine Sekunde) oder sehr langen Halbwertszeit (Jod-129 16 Mio Jahre).

3. Natürliche und künstliche Strahlung

Die Radioaktivität in der Natur wird einerseits durch strahlungsaktive Atomkernarten verursacht, die in der Erdkruste vorhanden sind und aus der Entstehungszeit der Erde stammen. Ausserdem kommen jene Stoffe hinzu, die sich beim radioaktiven Zerfall der Isotope ständig neu bilden. Die Strahlung, die auf diese Weise entsteht, wird als terrestrische Strahlung bezeichnet (13.8%); Sämtliche Zahlen stammen von der Nagra und sind schweizerische Durchschnittswerte. Die zweite Ursache der natürlichen Radioaktivität liegt in der kosmischen Strahlung (10%). Von unserer Sonne aus prallen ständig Protonen auf die Atome unserer Atmosphäre. Es laufen auf diese Weise vielfältige Umwandlungsprozesse ab. Davon entstehen vor allem die radioaktiven Isotope Kohlenstoff-14 und Tritium. Die in der Umwelt vorhandene natürliche Radioaktivität führt dazu, dass sich auch in allen lebenden Organismen strahlungsaktive Atome befinden - die körperinterne Strahlung (9.5%).

Die künstliche Radioaktivität hat vor allem folgende Ursachen:

In der Medizin, zum Beispiel in der Strahlenbehandlung und der Diagnostik (Röntgengeräte, Tomographie, Krebsbehandlung), wird radioaktive Strahlung freigesetzt. Wobei man physikalisch zwischen der Röntgenstrahlung (20%) und der radioaktiven Strahlung (2.5%) unterscheiden muss. Die medizinischen Dosen sind verständlicherweise individuell sehr verschieden.

In der Forschung, der Technik und auch im Haushalt sind radioaktive Komponenten vorhanden (Leuchtzifferblätter, Fernseher, Zigaretten: 2.5%).

Kernanlagen (0.25%) tragen nur wenig zur künstlichen Radioaktivität bei, wobei hier ein schweizerischer Durchschnittswert angegeben ist. In der Nähe von Kernkraftwerken steigt die Radioaktivität um das x-fache.

Nachdem nun seit über 40 Jahren verschiedene Länder (USA, F, GB, Japan,) meist überirdische Atomwaffenversuche durchgeführt haben, beträgt der Fallout dieser Tests bereits 2.5% der gesamten Strahlenbelastung.

Eine weitere Strahlenbelastung besteht in Wohnräumen, wo der Stoff Radon, der auch natürlich vorkommt, künstlich angereichert ist. Radon und seine Zerfallsprodukte machen fast 40% der Strahlenbelastung aus. Es gilt: je besser isoliert das Haus ist, desto grösser ist i.a. die Radon-Konzentration darin. Dieses Phänomen steht im Gegensatz zu den Energiespar-Kampagnen. Kurzes und intensives Lüften von Wohnräumen ist darum der beste

Kompromiss - und vor allem im Winter ratsam. Der Aufenthalt an der frischen Luft ist noch besser, da man aus Untersuchungen weiss, dass etwa 10% der Lungenkrebsfälle durch das Radon in Wohnräumen verursacht werden.

4. Messung von Radioaktivität

Durch die Sinnesorgane ist der Mensch befähigt, viele Erscheinungen in seiner Umwelt wahrzunehmen. Die Radioaktivität, die sowohl naturbedingt wie auch durch Medizin, Kerntechnik, Atomwaffenversuche ein Bestandteil unserer Umwelt ist, lässt sich jedoch nicht mit den Sinnesorganen aufnehmen. Sie wird mit Hilfe des Geiger-Müller-Zählrohres gemessen, mit dem sich die Anzahl Strahlungsimpulse in einer bestimmten Zeit registrieren lassen.

Als Aktivität bezeichnet man die Anzahl der Kernumwandlungen, die in einer radioaktiven Substanz innerhalb eines bestimmten Zeitraums stattfinden. Die moderne Einheit der Aktivität ist das Becquerel (Bq). Ein Becquerel bedeutet einen Zerfall pro Sekunde. Früher wurde die Aktivität in Curie (Ci) gemessen. Ein Curie entspricht 37 Milliarden Becquerel. Die Einheit Curie kommt daher, dass bei einem Gramm Radium pro Sekunde 37 Mia. Kernumwandlungen hat. Die Einheit Curie ist aber für natürliche Vorgänge viel zu gross. Die Aktivität ist leicht missverständlich und verharmlosend. Die Gefährlichkeit eines radioaktiven Stoffes hängt nämlich wesentlich von der Art und der Energie seiner Strahlung ab, von seiner Halbwertszeit und seinem ökologischen und biologischen Verhalten.

Die Energiedosis, die von einem bestrahlten Stoff aufgenommen wird, misst man in Gray (Gy). Ein Gray bezeichnet eine reine Strahlendosis von einem Joule, die pro Kilogramm absorbiert wurde. Früher wurde die Energiedosis in Rad (radiation absorbed dosis) gemessen. 100 Rad entsprechen 1 Gray.

Im weiteren ist die unterschiedliche biologische Wirkung der Strahlung auf belebtes Körpergewebe zu beachten: Alphastrahlen wirken stark auf kurze Entfernungen. Beta- und Gammastrahlen dringen tiefer ein. Die reine physikalische Wirkung ist also nicht unbedingt mit der biologischen gleichzusetzen. Deshalb hat man eine weitere Doseinheit eingeführt: Sievert (Sv). Sie ergibt sich aus der Multiplikation der Energiedosis mit einem Faktor. Der Faktor hängt von der Art der Strahlung ab:

$$Sv = \text{Faktor} * Gy$$

Alphastrahlen:	Faktor = 20
Betastrahlen:	Faktor = 1
Gammastrahlen:	Faktor = 1
Neutronen:	Faktor = 10

Die alte Bezeichnung für Sievert lautet Rem.
100 Rem entsprechen 1 Sievert.

Die Einheit Sievert ist aber stark umstritten. Es wird mit ihr eine Genauigkeit vorgetäuscht, die gar nicht vorhanden ist. Es ist unmöglich, die Strahlenart und -energie, aber auch die chemischen und biologischen Bedingungen und Auswirkungen in denselben Begriff zu verpacken. Ausserdem kann man eine Dosis von im Körpergewebe eingebauten radioaktiven Stoffen gar nicht direkt messen. Dazu kommt, dass die absorbierte Dosis nicht einheitlich ist und darum komplizierte Berechnungen nötig sind, was zu theoretischen Rechenwerten führt, die nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

5. Kernspaltung, Kettenreaktion und ihre Anwendungen

Bei der Kernspaltung, die ihrerseits durch Neutronen eingeleitet werden kann, entstehen neben den Spaltprodukten weitere Neutronen. Diese können ihrerseits wieder andere, noch nicht gesplante Radionuklide spalten. Dies führt zu einer sich verzweigenden Kettenreaktion. So können innert Sekundenbruchteilen immense Mengen von zum Beispiel Uran gespalten werden. Dabei wird ebenfalls eine riesige Menge Energie frei. Bei der Spaltung eines ${}^{235}_{92}\text{U}$ -Kerns werden 200 MeV Energie freigesetzt.

Berechnung: Wieviele Spaltvorgänge in ${}^{235}_{92}\text{U}$ sind pro Sekunde nötig, um ein Megawatt thermische Leistung zu erzeugen?

Eine Spaltung pro Sekunde ergibt eine Leistung: $P = 2 \cdot 10^8 \text{ eV/s}$

$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ W}$

$P = 3.2 \cdot 10^{-11} \text{ W}$ pro Spaltung

Für 10^6 W sind dann: $\frac{10^6 \text{ W}}{3.2 \cdot 10^{-11} \text{ W}} = 3 \cdot 10^{16}$ Spaltungen pro Sekunde nötig.

Da aus jeder Spaltung im Durchschnitt etwa 2,9 Neutronen entstehen, steigt die Anzahl der Reaktionen exponentiell. Da aber nicht alle der freigesetzten Neutronen genau wieder auf einen Kern treffen, ist eine gewisse Minimalgrösse, die sogenannte "kritische Masse", zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion erforderlich. Ist die Masse zu klein (unterkritisch), so bricht die Kettenreaktion ab, da zu viele Neutronen das spaltbare Material verlassen. Ist sie zu gross, nimmt die Anzahl der gespaltenen Kerne exponentiell zu - was mit einer Explosion endet. Aus dieser Erkenntnis wurde die Atombombe entwickelt!

Hier eine Berechnung im Zusammenhang mit der Atombombe und ihrer Funktion:

Gegeben: 20-Kilotonnen- ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ -Atombombe (TNT Äquivalent)

Gesucht: Wie lange geht es, bis die Sprengleistung von 20 Kt erreicht ist?

$1 \text{ Kt TNT} = 2,6 \cdot 10^{25} \text{ MeV}$

$20 \text{ Kt TNT} = 52 \cdot 10^{25} \text{ MeV}$

Bei der Spaltung eines ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ -Kerns entsteht etwa 200 MeV an Energie.

Dies ergibt $\frac{52 \cdot 10^{25} \text{ MeV}}{200 \text{ MeV}} = 2.6 \cdot 10^{24}$ Plutonium-Atome, die gespalten werden müssen, da

mit die Sprengleistung erreicht wird. Dies entspricht etwa 1,2 Kg Plutonium, was nur ein Bruchteil der kritischen Masse von 10 Kg darstellt. (Es ist so, dass nicht das gesamte spaltbare Material gebraucht wird, da nach einer gewissen Zeit die Bombe auseinanderfliegt und die Kettenreaktion abbricht.)

Man nimmt an, dass am Anfang $N_0 = 1$ Neutronen zur Verfügung stehen, und dass nur ein Bruchteil $\xi = 0.5$ von ihnen eine weitere Spaltung auslöst (der Anteil $1 - \xi$ verlässt das System). Bei jeder Spaltung entstehen $\eta = 2,9$ neue Neutronen. In der 1. Generation werden $N_0 \cdot \xi$ Atome gespalten, in der 2. sind es dann $N_0 \cdot \xi \cdot (\xi \eta)$. Dies ergibt summiert gegen n eine geometrische Reihe. Nach n Generationen sind Y Atome gespalten worden:

$$Y = N_0 \xi [1 + \xi \eta + (\xi \eta)^2 + \dots + (\xi \eta)^{n-1}] = N_0 \xi (1 - (\xi \eta)^n) \frac{1}{1 - \xi \eta}$$

Eine Generation dauert etwa $t = 0.01 \mu\text{s}$

Um nun $Y = 2,6 \cdot 10^{24}$ Plutonium-Atome zu spalten, sind nun n Generationen erforderlich, die in der Zeit $T = n \cdot t$ ablaufen.

$$Y = N_0 \xi (1 - \xi \eta)^n \frac{1}{1 - \xi \eta}$$

$$Y \frac{1 - \xi \eta}{N_0 \xi} = 1 - (\xi \eta)^n$$

$$(\xi \eta)^n = 1 - Y \frac{1 - \xi \eta}{N_0 \xi}$$

$$n = \frac{\log \left[1 - Y \frac{1 - \xi \eta}{N_0 \xi} \right]}{\log [\xi \eta]} = \frac{\log \left[1 - 2,6 \cdot 10^{24} \frac{1 - 0,5 \cdot 2,9}{1 \cdot 0,5} \right]}{\log [0,5 \cdot 2,9]} = 150$$

Diese 150 Generationen laufen in $T = 1,50 \mu\text{s}$ ab, danach expandiert das Material stark und die Reaktion bricht ab. In dieser Zeit von $1,50 \mu\text{s}$ wird eine thermische Energie von $2,26 \cdot 10^7$ kWh produziert.

Die mit einer Kettenreaktion bei der Atomspaltung produzierte Energie kann auch zu friedlichen Zwecken gewonnen werden: in Kernreaktoren. Es ist dort wichtig, dass die Kettenreaktion kontrolliert werden kann. Somit muss für den Multiplikationsfaktor der Neutronen gelten:

$$k = \eta \cdot \xi = 1$$

Ist $k < 1$, so ist der Reaktor unterkritisch, dh. die Kettenreaktion bricht langsam ab. Ist $k > 1$, ist der Reaktor überkritisch, was unbedingt vermieden werden muss (Hitzeentwicklung).

Der Faktor k wird im Kernreaktor mithilfe von Absorber-Stäben geregelt, die Neutronen einfangen. Sie werden in den Reaktor eingefahren, wenn k zu gross ist.

6. Auswirkung der Strahlung auf lebende Organismen

Für einen Organismus ist es lebenswichtig, dass seine Zellen richtig funktionieren. Radioaktive Strahlung kann die Verbindungen zwischen den Atomen der Moleküle zerstören, aus denen die Zellen bestehen, und sie kann den Aufbau der Atome selbst verändern. Zur Hauptsache ist es die Ionisation, die den Organismus gefährdet. Denn Ionen haben beim Stoffwechsel und Zellaufbau ganz bestimmte Aufgaben wahrzunehmen. Werden sie nun durch äussere Einflüsse zusätzlich wahilos erzeugt, geraten die Zellen aus dem Gleichgewicht. Solche Schäden können die Zellen beeinträchtigen oder sogar zerstören. Innerhalb gewisser Grenzen können Zellen die durch Strahlen verursachten Schäden selbst beheben. Ist der Schaden jedoch zu gross oder tritt er in einem besonders empfindlichen Teil des Organismus auf, ist er nicht reparierbar. Strahlenschäden lassen sich in zwei Kategorien aufteilen:

- somatische Schäden
- genetische Schäden

6.1 Somatische Schäden

Die somatischen Schäden treten beim Bestrahlten selbst auf, im Gegensatz zu Erbschäden, welche erst die Nachkommenschaft treffen. Man unterscheidet die Wirkung hoher und mittlerer Dosen (akute, kurz nach der Bestrahlung auftretende Schäden) und niedriger Dosen (Spätschäden). Spätschäden treten aber auch nach überstandener akuter Strahlenkrankheit auf.

Wirkung hoher und mittlerer Strahlendosen:

Dazu zählt der akute Strahlentod, wie er bei Katastrophen von Atomanlagen (Tschernobyl 1986) oder bei einer Atombombenexplosion (Nagasaki 1945) vieltausendfach vorkommen kann. Neben den Verbrennungen und Verletzungen treten bei den Opfern, je nach ihrem Standort und ihrer Strahlenempfindlichkeit, verschiedene Erscheinungen des "akuten Strahlensyndroms" auf. Die Betroffenen leiden an Schwindel, Erbrechen, Fieber, Durchfall, werden apathisch und sterben oft nach wenigen Tagen. Aber auch scheinbar Unverletzte erkranken plötzlich nach ein bis zwei Wochen: Bluterbrechen, Flecken am ganzen Körper, etwas später Haarausfall und Blutstuhl; fiebrige Infektionen infolge Mangels an weissen Blutkörperchen treten ein. Überlebenden steht meist ein lebenslanges Siechtum bevor. (Sorry, das ist nicht unbedingt "reine Physik", aber es gehört leider auch zum Thema Radioaktivität. Vielen Dank für's Verständnis.)

Hier folgt eine Auflistung der zu erwartenden Wirkungen bei hoher Strahlendosen:

0,0 - 0,5 Sv	geringe Blutbildveränderungen
0,8 - 1,2 Sv	bei 5-10% der Exponierten ein Tag lang Erbrechen und Müdigkeit
1,3 - 1,7 Sv	bei 25% der Exponierten etwa ein Tag lang Erbrechen, gefolgt von Strahlenkrankheit
1,8 - 2,6 Sv	bei 25% der Bestrahlten etwa ein Tag lang Erbrechen, gefolgt von Strahlenkrankheit, einzelne Todesfälle
2,7 - 3,3 Sv	bei fast allen Bestrahlten Erbrechen, etwa 20% Todesfälle innerhalb 2-6 Wochen, 3 Monate Rekonvaleszenz der Überlebenden
4,0 - 5,0 Sv	bei allen Bestrahlten Erbrechen, 50% Todesfälle innerhalb eines Monats, 6 Monate Rekonvaleszenz der Überlebenden
5,5 - 7,7 Sv	bei allen Bestrahlten Erbrechen innerhalb 4 Stunden, bis zu 100% Todesfälle, über 6 Monate Rekonvaleszenz
10 Sv	bei allen Bestrahlten Erbrechen innerhalb 1-2 Stunden, wahrscheinlich keine Überlebende
50 Sv	augenblicklich schwerste Krankheit. Tod aller bestrahlter innerhalb einer Woche

Wirkung niedriger Strahlendosen:

Die Röntgenpioniere legten noch unwissend ihre Hände in den Strahlenkegel, um dessen Intensität zu bestimmen. Aber bald zeigten sich die ersten Strahlenschäden auf ihrer Haut, und 1902 wurde der erste Hautkrebs nach Röntgenbestrahlung beschrieben. Die durch Strahlung verursachten Krankheiten können Jahre und Jahrzehnte nach überwundener akuter Strahlenkrankheit auftreten. Das gleiche gilt auch nach kürzerer oder langfristig wirksamer kleiner Strahlenbelastung. Aber niedrige Strahlung verursacht keine spezifische

Strahlenkrankheit, sondern eine Vielfalt von auch sonst bekannten Krankheiten tritt im statistischen Mittel vermehrt auf. Es erkranken also nicht alle Bestrahlten.

Hier folgen einige Beispiele von mögliche Krankheiten:

- Leukämie
- Krebs aller Arten
- verminderte Fruchtbarkeit
- Veränderung des Blutes
- geistige und körperliche Schäden am Ungeborenen
- Erbschäden

Das Krebs- und Leukämierisiko ist heute von oben erwähnten Krankheiten am besten erforscht. Aber auch bei diesen Schäden ist man noch weit davon entfernt, seriöse Theorien deren Entstehung zu veröffentlichen. Der genaue Mechanismus ist heute noch unbekannt. Es ist auch anzunehmen, dass es keine unschädliche Strahlendosis gibt (Petkau-Effekt, Kapitel 8), dass also auch ein Teil der Krebs- und Leukämiefälle auf die natürliche Strahlenbelastung zurückzuführen ist, die von Gebiet zu Gebiet enorm schwanken kann. Das heisst aber auch, dass jede zusätzliche Strahlenbelastung durch Atomenergie und Medizin die Krankheitsrate erhöht. Dass solche niedrige Strahlendosen Krebs erzeugen, wurde 1970 am sehr strahlenempfindlichen noch ungeborenen Leben genauer nachgewiesen. Wurden zum Beispiel Kinder im Mutterleib geröntgt, so stehen sie bis zu ihrem zehnten Lebensjahr unter einem erhöhten Krebsrisiko. (Stewart & Neale, 1970) 1983 wurde eine Langzeitstudie bekannt, die nachweist, dass im Mutterleib bestrahlte Mädchen einem 5,5fach grösseren Brustkrebsrisiko ausgesetzt sind, wenn sie das Alter von 30 Jahren erreicht haben. (Hampelmann L.H.: "Lancet", 1983)

6.2 Erbschäden (genetische Schäden)

Genetische Schäden kommen durch Veränderungen der in den Zellkernen enthaltenen Chromosomen zustande, wenn sie Bestandteil einer Keimzelle sind. Strukturveränderungen an einer Keimzelle führen zu einer veränderten Erbinformation an die Nachkommen, d.h. zu einer genetischen Mutation. Wird dagegen eine normale Körperzelle verändert, so werden die Nachkommen nicht geschädigt, sondern nur der Betroffene selbst. Allerdings können Strahlenschäden auch in einer Keimzelle repariert werden. Dadurch wird die Erbinformation der Lebewesen vor der natürlichen Strahlung geschützt. Es gibt nun zwei grundsätzlich verschiedene Vererbungsweisen: (Mendel, 1865)

Eine dominante Mutation bewirkt, dass bei allen Trägern eines solchen veränderten Gens (schon die ersten Nachkommen des Bestrahlten) das betreffende Merkmal in Erscheinung tritt.

Eine rezessive Mutation ist heimtückischer. Sie kann unbemerkt weitervererbt werden, bis einmal eine Eizelle und ein Spermium mit der gleichen rezessiven Mutation zusammentreffen, was viele Generationen dauern kann. Eine Bevölkerung kann mit rezessiven Erbschäden stark durchsetzt sein, ohne dass dies festgestellt wird. So kann ein durchaus normales Bild vorgetäuscht werden. Beim Erreichen einer kritischen Verbreitung können dann die Schäden sichtbar werden (sog. Erbkatastrophe).

Hier eine Auswahl von Krankheiten, die über genetische Mutationen entstehen können: Allergien, Epilepsie, Arthritis, Nierensteine, Leberschäden, Schwachsinn, Augenkrankheiten, Muskelschwäche, Hirndegeneration, Arteriosklerose, Herzkrankheiten usw.

7. Strahlenschutzvorschriften

Die gesundheitsschädliche Wirkung von Strahlung ist bekannt, seit 1896 der erste Bericht über Schäden durch Röntgenstrahlen veröffentlicht wurde. 1928 wurde das International XRay Radium Protection Committee (IXRPC) zum Schutz beruflich strahlenexponierter Personen gegründet. Diese erste Strahlenschutzkommission wurde 1950 reformiert und in International Commission for Radiological Protection (ICRP) umbenannt.

Das National Academy of Sciences Committee on the Effects of Atomising Radiation der Vereinigten Nationen (UNESCAR) stellt Berechnungen über die Wirkung von Strahlendosen an. Die Amerikanische Akademie der Wissenschaften gibt ebenfalls massgebende Berichte heraus, die sogenannten BEIR Berichte (Biological Effects of Ionizing Radiation). Ein berühmter Bericht war derjenige von 1972 (BEIR-I-Bericht), der in leichtverständlicher Weise eine gute, objektive Übersicht über die Wirkung von radioaktiver Strahlung und den Schutz dagegen vermittelte. Er war sogar bahnbrechend, zum Beispiel beinhaltete er neuartigen Risikokalkulationen, die die Gefahr der Radioaktivität etwa 100-mal stärker schätzten als frühere Berichte. 1979 wurde der BEIR-III-Bericht veröffentlicht. Erstaunlicherweise war auch er recht offen. Zu offen, wie es sich zeigen sollte; denn er wurde nach kurzer Zeit zurückgezogen. Dafür erschien 1980 ein revidierter BEIR-III-Bericht mit verharmlosenden Daten. Dies ist ein Musterbeispiel von Manipulierung wichtigster wissenschaftlicher Informationen, was in der Geschichte der Atomspaltung bisher nicht selten geschah. Aus der neuesten Studie (BEIR V, 1990) wird ersichtlich, dass die international als krebsauslösend akzeptierte Strahlendosis sieben- bis zehnmals niedriger angesetzt werden muss. Umfassende Informationen über die Langzeitwirkung von Strahlen wurden an den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki gewonnen. Die Interpretation dieses Materials bildet bis heute die Grundlage der internationalen Strahlenschutzvorschriften. Wobei viele der damals vorgenommenen Schätzungen ungenau sind und wissenschaftlich nur mit Vorsicht gebraucht werden können. Neuere Studien berechnen das generelle Strahlenrisiko unter Verwendung dieser und auch anderer Daten (Atomwaffentests). Sie alle kommen zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit von Gesundheitsrisiken bei ionisierender Strahlung dreibis fünfzehnmals höher liegen als die heutigen Strahlenschutzvorschriften lauten. Die Sicherheitsstandards der meisten Länder richten sich nach den Empfehlungen der ICRP. Die personelle Zusammensetzung der ICRP allerdings gibt Anlass zu Kritik: Ihre Mitglieder stammen hauptsächlich aus der Atomindustrie und den dort beschäftigten Radiologen. Die ICRP hat seit den siebziger Jahren ihre Grenzwerte nicht mehr korrigiert mit der Begründung, es gebe keine schlüssigen Beweise für eine generelle Verschärfung des Strahlenrisikos.

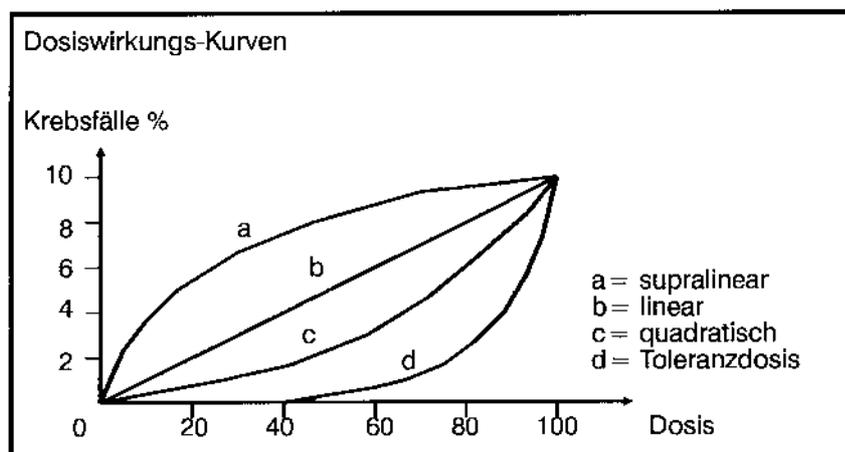
Im Jahr 1900 lag der empfohlene Dosisgrenzwert bei umgerechnet 100 mSv pro Tag. 1925 lag er bei 10 mSv pro Woche. Seit 1977 liegt der von der ICRP für Arbeiter mit beruflichem Strahlenrisiko empfohlene Grenzwert unverändert bei 50 mSv pro Jahr, also weniger als einem mSv pro Woche.

Seit 1978 wird in Fachkreisen eine Reduktion der Dosis für beruflich strahlenbelastetes Personal um den Faktor 2 bis 20 gefordert - ohne Erfolg. Bei einer Reduktion um mehr als den Faktor 2 käme nämlich die Atomindustrie in grösste Schwierigkeiten, weil Reparaturarbeiten an Atom- und Wiederaufbereitungsanlagen nicht nur verteuert, sondern verunmöglich werden könnten.

Selbst die ICRP stellt fest, dass eine Strahlenbelastung über längere Zeit bei einem jährlichen Durchschnitt von mehr als 5 mSv eine Gefahr bedeutet, die höher ist, als sie für eine sichere Beschäftigung annehmbar ist. Die heute immer noch erlaubten 50 mSv sind zehnmal höher.

Im Jahr 1952 wurde erstmals ein Dosisgrenzwert von 15 mSv pro Jahr für die Normalbevölkerung eingeführt. Er wurde 1959 auf 5 mSv pro Jahr herabgesetzt. Dieser Wert gilt bis heute. Eine Reihe nationaler Behörden haben inzwischen strengere Grenzwerte festgelegt. Man sieht, dass die Festlegung von Strahlengrenzwerten eine schwierige Angelegenheit ist und die Objektivität von veröffentlichten Studien zu wünschen übrig lässt. Grenzwerte wurden immer wieder gesenkt und es wird gar über eine Null-Sievert-Grenze diskutiert (Petkau-Effekt, Kapitel 8). Die Unsicherheit in diesem Gebiet ist vor allem auf das fehlende Datenmaterial zurückzuführen. Das grösste "Experiment" mit radioaktiver Bestrahlung läuft zur Zeit in der Ukraine und Weissrussland, wo ein grosser Teil der 1986 in Tschernobyl freigesetzten 50 Mio Curies sich auswirkt (Zum Vergleich: In Hiroshima und Nagasaki setzten die Bomben etwa 1 Mio Curie frei). Zur Hinterlassenschaft von Tschernobyl könnten Hunderttausende zusätzliche Todesfälle durch Krebs gehören, doch unternahm die damalige Sowjetregierung keinen systematischen Versuch, die Bestrahlung der Bürger zu verfolgen oder gesundheitliche Auswirkungen aufzuzeichnen. Den Ärzten wurde untersagt, Krankheiten als durch Radioaktivität verursacht zu diagnostizieren. Heutige Schätzungen sagen zwischen 14000 und 475000 Krebstodesfälle durch Tschernobyl voraus. Niemand wird es je wissen und niemand wird genauere Untersuchungen in diesem Gebiet durchführen, die auch der restlichen Welt eine Hilfe wären.

8. Der Petkau-Effekt



Solche Kurven ergeben sich aus komplizierten mathematischen Berechnungen, die aus gesammelten Daten gemacht wurden. Auf der senkrechten Achse sind die zusätzlichen Strahlenkrebsfälle angegeben (0 bis 10 in %), welche die auf der waagrechten Achse angegebene Strahlendosis auslöst. Diese Kurven sind rein schematisch und es wird angenommen, dass man aus einer Untersuchung weiss, dass bei der hohen Dosis 100 zehn Prozent mehr Krebsfälle entstehen (Schnittpunkt aller Kurven rechts oben). Möchte man nun wissen, wie es sich bei kleineren Dosen verhält, bei denen Versuche möglicherweise keine statistisch gesicherten Ergebnisse liefern, so kann man mit diversen Kurven gegen den Nullpunkt verlängern. Jede der vier abgebildeten Kurven liefert andere Ergebnisse:

b) Die lineare Kurve b wird seit jeher für die Berechnung der Erbschäden benutzt. Diese Kurve wurde später (BEIR-I, 1972) auch für das Krebsrisiko übernommen. Sie entspricht einer konstanten Dosiswirkung von hohen Dosen bis zur Dosis null.

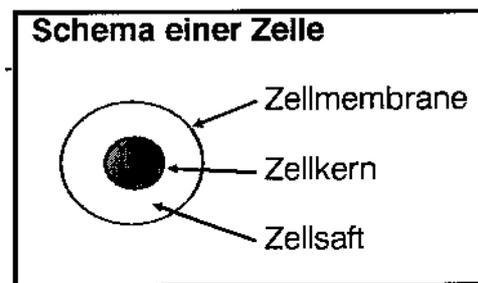
c) Diese sogenannte quadratische Kurve c entspricht der alten Hypothese, die eine Toleranzdosis bzw. einen vernachlässigbaren Effekt bei sehr kleinen Dosen voraussagt.

d) entspricht einer Kurve mit wirklicher Toleranzdosis, wie man sie zum Beispiel für den sofortigen Tod bei Ganzkörperdosen beobachtet hat.

a) Der Petkau-Effekt: Diese Kurve veranschaulicht die Behauptung, dass auch bei kleinen Dosen die Wirkung, zB. das Krebsrisiko, gross ist. Höhere Dosen haben wieder eine lineare Zunahme.

Der kanadische Wissenschaftler A. Petkau hat im Jahre 1972 eine bahnbrechende Entdeckung gemacht. Er bestrahlte dazu Zellmembrane unter Wasser.

Dabei stellte er folgendes fest: Wenn die Bestrahlung über längeren Zeitraum erfolgte, so brachen die Membranen bei einer viel niedrigeren total absorbierten Strahlendosis, als wenn diese totale Dosis als Kurzzeitbestrahlung abgegeben wurde. Zellmembranen sind für eine Zelle Lebensnotwendig. Sie dienen dazu, den Zellsaft zusammenzuhalten und haben noch viele biologische Funktionen.



Konkret: Bei kurzzeitiger Bestrahlung mit 0.26 Gy pro Minute war die totale Dosis von 35 Gy nötig, um die Zellmembranen zu zerstören. Bei gedehnter Bestrahlung mit nur 0.00001 Gy pro Minute war jedoch nur die totale Dosis von 0.007 Gy zur Zerstörung erforderlich. Bei gedehnter Bestrahlung war also eine 5000mal kleinere Dosis zur Zerstörung notwendig.

Damit war gezeigt, dass kleine chronische Strahlendosen viel gefährlicher sein können als kurzzeitige hohe Dosen. Diese Erkenntnis steht im Gegensatz zur erbschädigenden Wirkung im Zellkern. Dort besteht in der Wirkung kaum ein Unterschied, ob die gleiche totale Strahlendosis innert kurzer Zeit erfolgt oder gedehnt über längere Zeit.

So ergibt sich paradoxerweise, dass dicht ionisierende Strahlung, wie sie Alphastrahlung darstellt oder der kurze, intensive Strahlenstoss einer medizinischen Röntgenapparatur, die Zellmembrane weniger schädigt als die chronische niedere natürliche Strahlung, der Fallout oder die Emission aus Atomanlagen. So können kleine, gedehnte Strahlendosen 100 bis 1000mal gefährlicher sein, als man aus medizinischen Erfahrungen, den Studien über die Atombombenopfer in Japan und auch aus Zehntausenden von Tierversuchen hätte erwarten können.

Ursprünglich hatte man sich in der Forschung nur auf den Zellkern fixiert, weil sich die Erbmaterie darin befindet. Aus den Tierversuchen musste man folgen, dass man bei einer linearen Beziehung zwischen Risiko und Dosis auf der sicheren Seite war. Man hatte sogar die quadratische Kurve c) nachgewiesen, denn der Zellkern besitzt einen Reparaturmechanismus, der bei kleinen Dosen genügend wirksam wird.

Dazu kommt noch, dass in ganz falschen Bereichen der Dosisleistungen geforscht wurde, nämlich zwischen 0.01 und 10 Gy pro Minute. So werden die natürliche Strahlung, der Fallout von Atombombentests und die Emissionen von Kernanlagen vernachlässigt, denn diese Dosisleistungen liegen nämlich im Bereich von 10^{-14} bis 10^{-6} Gy pro Minute.

Die Tabelle gibt etwa einen Überblick von den Dosisleistungen in Gy pro Minute:

	Atombombenblitz und Direktstrahlung
	Medizin (Diagnostik und Therapie)
	Medizin (Nuklear)
	Fallout und Natürliche Strahlung

Dass der Zellkern viel stärkere Reparaturmechanismen besitzt als die Zellmembranen, ist mit der Evolution zu erklären. In erster Linie müssen nämlich die Gene im Zellkern geschützt werden. Nur so kann die Erbmasse gegen die natürliche Strahlung geschützt und über Millionen von Jahren weitergegeben werden. Im Gegensatz dazu sind einzelne Individuen selbst für die Evolution nicht so wichtig. Die Reparaturmechanismen in den Zellmembranen dürfen deshalb nicht so wirksam sein und verursachen dadurch Krankheiten, aber nicht Erbschäden. Wenn aber der Mensch ein langes, gesundes Leben genießen möchte, so darf er keinesfalls die natürliche Strahlenbelastung in seiner Umgebung erhöhen.

Es stimmt zwar, dass die natürliche Radioaktivität von Gebiet zu Gebiet (auch hier in der Schweiz!) enorm schwanken kann. Die bis um den Faktor zehn verschiedene Strahlung verursacht selbstverständlich auch Schäden. Es ist aber nun unverantwortlich, zu diesem sonst schon bestehenden Risiko noch künstliche Emissionen (Kernanlagen, Fallout, Medizin) hinzuzufügen. Denn diese verursachen wiederum eine Vielzahl von Krankheiten und Todesfälle.

Literaturverzeichnis

Prof. Dr. Haro von Buttiar, Dr. Manfred Roth. Radioaktivität- Fakten, Ursachen, Wirkungen; Springer-Verlag 1990

Ralph Graeub, Ing. Chem. ETH. Der Petkau Effekt - Katastrophale Folgen niedriger Radioaktivität; Zytglogge 1990

Dr. Dieter Nachtigall. Physikalische Grundlagen für Dosimetrie und Strahlenschutz; Thiemig-Verlag 1971

Karl-Erik Zimen. Strahlende Materie - Radioaktivität, ein Stück Zeitgeschichte; Bechtle-Verlag 1987

Jürgen Seidel. Kernenergie - Fragen und Antworten; Econ-Verlag 1990

Nagra Schweiz. Radioaktive Abfälle unter Kontrolle; Infel-Verlag Zürich

John May. Das Greenpeace Handbuch des Atomzeitalters; Knauer-Verlag 1989

Union of Concerned Scientists. Die Risiken der Atomkraftwerke; Bonz-Verlag 1977

Lester R. Brown, Worldwatch Institute Report. Zur Lage der Welt 1992; Fischer-Verlag 1992

Frederic Vester. Unsere Welt - Ein vernetztes System; Klett-Verlag 1978