

# 18. Anwendungen und Gefahren der Kernphysik

Rainer Hauser

November 2011

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufbau der Atome

Atome als Grundbausteine der Materie bestehen aus einer Atomhülle und einem Atomkern. Der Durchmesser des Atomkerns ist grössenordnungsmässig 10 000-mal kleiner als der Durchmesser des ganzen Atoms. Die Atomhülle besteht aus negativ geladenen Elektronen und der Atomkern aus positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen.

Die Protonen und Neutronen, die unter dem Begriff Nukleonen zusammengefasst sind, werden durch die Kernkraft zusammengehalten, die stärker ist als die gegenseitige Abstossung der positiv geladenen Protonen. Die Bindungsenergie pro Nukleon ist ein Mass für die Stabilität eines Atomkerns.

### 1.2 Radioaktivität

Atomkerne, die nicht stabil sind, können auf mehrere verschiedene Arten zerfallen. Beim  $\alpha$ -Zerfall schießt ein  ${}^4_2\text{He}$ -Kern und beim  $\beta$ -Zerfall ein Elektron mit hoher Energie aus dem zerfallenden Atomkern. Die  $\gamma$ -Strahlung ist eine sehr energiereiche elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn Atomkerne in einem angeregten Zustand in einen weniger angeregten Zustand zurückfallen und die Energie in Form eines Photons abgeben.

## 2 Altersbestimmung mit der C-14-Methode

### 2.1 Massenspektrometer

Isotope Nuklide mit der gleichen Protonenzahl, die also zu demselben chemischen Element gehören, lassen sich durch chemische Prozesse nicht unterscheiden. Weil ihre Kerne aber eine unterschiedliche Anzahl Neutronen enthalten, haben sie verschiedene Massen. Darauf basiert die Wirkung des am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts vom Engländer Francis William Aston entwickelten Massenspektrometers.

Will man die prozentuale Verteilung der isotopen Nuklide desselben chemischen Elementes bestimmen, verdampft und ionisiert man ein Stück der zu bestimmenden Materie. Weil die zu verschiedenen Isotopen gehörenden Ionen gemäss  $F = m \cdot a$  wegen ihrer unterschiedlichen Massen durch eine konstante Kraft verschieden abgelenkt werden, kann man den Ionenstrahl durch ein elektromagnetisches Kraftfeld auffächern. Aus der Schwärzung des Fotopapiers konnte man damals ablesen, wie häufig ein bestimmtes Isotop im untersuchten Gas vorkommt. Statt Fotopapier werden heute Detektoren eingesetzt.

### 2.2 Häufigkeit verschiedener Kohlenstoffnuklide

Die meisten Kohlenstoffatome auf der Erde sind stabile  ${}^{12}_6\text{C}$ -Atome. Es gibt daneben aber auch  ${}^{14}_6\text{C}$ -Atome mit einer Halbwertszeit von  $t_{1/2} = 5730$  Jahre. Diese instabilen Atome werden in der Erdatmosphäre

durch den Sonnenwind dauernd neu gebildet, sodass das Verhältnis der Anzahl  $N_{C14}$  der  $^{14}_6\text{C}$ -Atome zur Anzahl  $N_{C12}$  der  $^{12}_6\text{C}$ -Atome, wie man mit anderen archäologischen Zeitmessmethoden durch Vergleich der gefundenen Alter hat nachweisen können, über die Jahrtausende mehr oder weniger konstant

$$\frac{N_{C12}}{N_{C14}} = 7.7 \cdot 10^{11} = V_{12-14,0} \qquad \frac{N_{C14}}{N_{C12}} = 1.3 \cdot 10^{-12} = V_{14-12,0} \qquad (1)$$

war. Auf diese Weise kann man das Alter von organischen Materialien auf etwa 10% genau bestimmen.

## 2.3 Prinzip der C-14-Methode

Weil lebende Organismen durch Stoffwechsel Kohlenstoffatome beider Isotope im Verhältnis (1) aufnehmen, haben sie im Körper ebenfalls die beiden Isotope in diesem Verhältnis. Mit dem Tod hört aber der Stoffwechsel auf und keine neuen  $^{14}_6\text{C}$ -Atome kommen hinzu, während die bereits im Körper gelagerten  $^{14}_6\text{C}$ -Atome gemäss  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  radioaktiv zerfallen. Aus dem jetzigen Verhältnis der beiden Isotope kann man berechnen, wann der Organismus gestorben ist. Die Methode liefert Resultate bis etwa zu einem Alter von 50 000 Jahren. (Verwendet man Nuklide mit längeren Halbwertszeiten konnte man Werte in anderen Zeiträumen wie zum Beispiel das Alter der Erde bestimmen.)

Für das Verhältnis  $V_{12-14}$  der Anzahl  $^{12}_6\text{C}$ -Atome zur Anzahl  $^{14}_6\text{C}$ -Atome  $t$  Jahre nach dem Absterben des Organismus gilt  $\frac{1}{V_{12-14}} = V_{14-12,0} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ , wobei  $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$  ist. Durch Umformung erhält man daraus  $V_{12-14} \cdot V_{14-12,0} = e^{\lambda \cdot t}$  und weiter durch Logarithmieren  $\ln(V_{12-14} \cdot V_{14-12,0}) = \lambda \cdot t$ , woraus

$$t = t_{1/2} \cdot \frac{\ln(V_{12-14} \cdot V_{14-12,0})}{\ln(2)} \qquad (2)$$

für den Zeitpunkt des Todes folgt.

Beispiel:

Hat man bei einem organischen Material das Verhältnis  $2.1 \cdot 10^{13}$  von  $^{12}_6\text{C}$ -Atomen zu  $^{14}_6\text{C}$ -Atomen gemessen, so ist nach (2) das Alter somit  $t = 5730 \text{ a} \cdot \frac{\ln(2.1 \cdot 10^{13} \cdot 1.3 \cdot 10^{-12})}{\ln(2)} \approx 27\,000 \text{ a}$ .

## 3 Biologische Aspekte und Einsatz in der Medizin

### 3.1 Wirkung auf lebende Organismen

Die von Radioaktivität verursachte Strahlung besitzt sehr viel Energie, kann damit Elektronen aus der Hülle von Atomen herausschlagen und hat also ionisierende Wirkung. Diese Energie wird, wenn die radioaktive Strahlung auf einen Körper trifft, wenigstens teilweise auf diesen Körper übertragen, was als *Energiedosis* bezeichnet wird. Die Energiedosis, die in der Einheit *Gray* definiert durch  $1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  gemessen wird, ist die Energie, die durch die radioaktive Strahlung auf ein Kilogramm Materie übertragen wird. Die Energiedosis  $D$  ist gleich der Energie der Strahlung vor dem bestrahlten Körper minus die Energie der Strahlung nach dem bestrahlten Körper dividiert durch die Masse des Körpers.

Trifft radioaktive Strahlung auf einen lebenden Körper, werden Atome und Moleküle in einer Zelle ionisiert. Die Zelle hat zwar die Fähigkeit, schädliche Substanzen zu eliminieren, sind aber zu viele Moleküle betroffen, stirbt die Zelle. Weil immer wieder neue Zellen entstehen und alte Zellen auch aus anderen Gründen absterben, ist das nicht schlimm, wenn nicht gleichzeitig sehr viele Zellen absterben und deshalb ganze Organe ausfallen.

Radioaktive Strahlung tötet nicht nur Zellen ab, sondern kann auch die Erbinformation verändern. Entstehen so Genschäden, die durch die Zelle nicht mehr repariert werden können, wird die geschädigte Erbinformation bei der Zellteilung an die Tochterzelle weitergegeben. So können einerseits Tumore entstehen, wenn gewöhnliche Zellen betroffen sind, kann es aber auch zu Missbildungen beim Nachwuchs kommen, wenn die Genschäden in Keimzellen entstanden sind.

Die Energiedosis  $D$  ist eine physikalische Grösse. Soll auch die biologische Wirkung der radioaktiven Strahlung gemessen werden, so muss zudem berücksichtigt werden, dass die Schäden durch die verschiedenen

Strahlentypen unterschiedlich sind. Im Vergleich zur  $\beta$ -Strahlung hat die  $\alpha$ -Strahlung etwa die zwanzigfache Wirkung auf Zellen. Die *Äquivalentdosis*  $H$ , die in der Einheit *Sievert* definiert durch  $1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  gemessen wird, berücksichtigt die unterschiedliche Wirkung der Strahlentypen. Es gilt  $H = q \cdot D$ , wobei  $q = 20$  für  $\alpha$ -Strahlung und  $q = 1$  für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung gesetzt wird.

Die verschiedenen radioaktiven Strahlentypen dringen unterschiedlich tief in einen Körper ein. Für die menschliche Haut ist die maximale Eindringtiefe von  $\alpha$ -Strahlung etwa 0.05 mm, sodass dieser Strahlentyp bereits vollständig durch ein Blatt Papier abgeschirmt werden kann, während  $\beta$ -Strahlung maximal etwa 5 mm tief eindringt und durch eine Plexiglasscheibe zu 100% abgeschirmt werden kann. Keine maximale Eindringtiefe und somit auch keinen hundertprozentigen Schutz gibt es für die  $\gamma$ -Strahlung. Selbst hinter mehreren Metern Blei ist noch  $\gamma$ -Strahlung messbar. Die Intensität der  $\gamma$ -Strahlung nimmt aber exponentiell ab, sodass man eine Halbwertsdicke einführen kann, die von der Energie der  $\gamma$ -Strahlung abhängt. (Nimmt man Blei zur Abschirmung, ist die Halbwertsdicke von radioaktivem Polonium 5 cm und von radioaktivem Thorium 1.5 cm.)

### 3.2 Natürliche Radioaktivität

Weil zum Zeitpunkt der Entstehung der Erde auch radioaktive Materialien vorhanden waren, gibt es natürliche Radioaktivität. Im Gestein kommt das instabile Metall Radium  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  vor, das durch  $\alpha$ -Zerfall in das Edelgas Radon  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  zerfällt und aus dem Gestein austritt. Es ist für 40% der natürlichen radioaktiven Strahlung zuständig, der die Bevölkerung in der Schweiz ausgesetzt ist. Die Radon-Konzentration in bewohnten Räumen beträgt  $75 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ , kann in abgeschlossenen und schlecht belüfteten Räumen wie häufig in Kellern aber noch bedeutend höhere Werte annehmen.

### 3.3 Medizinische Anwendungen

Radioaktive Substanzen werden sowohl in der medizinischen Diagnose als auch in der Therapie eingesetzt. So werden so genannte Radiopharmaka, die kurzlebige Nuklide enthalten, mit der Nahrung oder mit Spritzen in den Körper gebracht, wo sie beispielsweise von den Zellen einer bestimmten Tumorart aufgenommen werden. So kann der Tumor diagnostiziert, aber auch bestrahlt und damit behandelt werden.

Mit  $\gamma$ -Strahlung können Krebszellen von aussen abgetötet werden. Weil dabei das gesunde Gewebe möglichst wenig geschädigt werden soll, wird mit dem so genannten Gamma-Knife das kranke Gewebe von möglichst vielen Seiten bestrahlt, sodass nur dort, wo sich die verschiedenen Strahlen kreuzen, eine hohe Intensität entsteht.

## 4 Energie aus Kernkraftwerken

### 4.1 Energiegewinnung durch Kernphysik

Weil die Bindungsenergie pro Nukleon in den Kernen von  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ -Atomen am stärksten ist, kann bei Atomen mit Ordnungszahl kleiner als 26 nur Energie gewonnen werden, wenn man Atomkerne verschmelzt, während bei Atomen mit grösserer Ordnungszahl die Energie bei der Spaltung entsteht. In beiden Fällen ist die Bindungsenergie pro Nukleon in den Ausgangsatomen kleiner als in den entstehenden Atomen, sodass die durch den damit verbundenen Massendefekt  $E = \Delta m \cdot c^2$  entstehende Energie als Wärme freigesetzt wird.

### 4.2 Kernspaltung

Als Otto Hahn und Fritz Strassmann das Urannuklid  ${}^{238}_{92}\text{U}$  mit Neutronen beschossen, erwarteten sie, dass dadurch  ${}^{239}_{92}\text{U}$  entsteht, weil sich das Neutron im Urankern integriert. Das Neutron spaltete aber den Urankern, wie Lise Meitner richtig interpretierte, in zwei Kerne nämlich einen Bariumkern  ${}^{145}_{56}\text{Ba}$  und einen Kryptonkern  ${}^{94}_{36}\text{Kr}$ . Durch Neutronenbeschuss kann man noch andere Kerne spalten, wobei dazu

bei einigen Nukliden vergleichsweise nur wenig Energie nötig ist. In diesem Fall genügen so genannte langsame Neutronen, die effizienter sind als schnelle, weil schnelle Neutronen meist einfach den Kern durchschlagen und dabei der Kernkraft keine Zeit lassen, um das Neutron einzufangen. Das Neutron kann seine Energie so nicht auf den Kern übertragen, und es kommt nicht zur Spaltung.

Bei der Kernspaltung sind verschiedene Aufspaltungen möglich, wobei häufig noch zwei oder drei Neutronen freigesetzt werden. Trotzdem haben die entstehenden Spaltprodukte meist immer noch zu viele Neutronen und sind somit radioaktiv. Wird beispielsweise ein Urankern  $^{235}_{92}\text{U}$  von einem langsamen Neutron getroffen, ist eine der möglichen Reaktionen die Aufspaltung in einen Bariumkern  $^{141}_{56}\text{Ba}$  und einen Kryptonkern  $^{92}_{36}\text{Kr}$ , wobei drei Neutronen frei werden.

Bei vielen Reaktionen wird ein Neutron verschluckt, es entstehen aber zwei oder drei Neutronen. Das kann zu einer Kettenreaktion führen. Dabei gibt es drei Möglichkeiten:

1. Von den zwei bis drei frei werdenden Neutronen trifft mehr als eines einen Kern, was zu einer exponentiellen Zunahme freier Neutronen und damit einer unkontrollierbaren Kettenreaktion führt.
2. Von den zwei bis drei frei werdenden Neutronen trifft genau eines einen Kern, was zu einer immer gleich schnell ablaufenden und damit kontrollierbaren Kettenreaktion führt.
3. Von den zwei bis drei frei werdenden Neutronen trifft weniger als eines einen Kern, was zu keiner Kettenreaktion führt.

Bei einer auf Kernspaltung basierenden Atombombe sollte möglichst jedes frei werdende Neutron einen Kern treffen, damit es zu einer Explosion kommt. Dazu braucht es eine Mindestmasse von spaltbarem Material wie Uran oder Plutonium, weil sonst zu viele Neutronen das Material verlassen, ohne auf einen Kern getroffen zu sein. Man nennt diese Mindestmasse die kritische Masse.

### 4.3 Kernfusion

Bei der Kernfusion verschmelzen beispielsweise ein Heliumkern  $^4_2\text{He}$  und ein Kohlenstoffkern  $^{12}_6\text{C}$  zu einem Sauerstoffkern  $^{16}_8\text{O}$ , wobei  $\gamma$ -Strahlung entsteht. Allgemein können zwei Kerne mit weniger als 56 Nukleonen verschmelzen. Damit sich zwei Atomkerne nahe genug kommen, dass sie die elektrische Abstoßung überwinden und zu einem Kern verschmelzen können, braucht es eine Temperatur in der Größenordnung von  $10^7$  K.

Die Sterne gewinnen (oder gewannen früher einmal) ihre Energie auf diese Weise. Die Sonne beispielsweise ist ein Gasball mit einem Durchmesser von  $1.4 \cdot 10^6$  km, der zu 78% aus Wasserstoff und zu 20% aus Helium besteht und eine Aussentemperatur von 6 000 K und eine Innentemperatur von  $1.5 \cdot 10^7$  K hat. Durch den hohen Druck und die enorme Hitze, die im Innern herrschen, fusionieren vier Wasserstoffkerne  $^1_1\text{H}$  zu einem Heliumkern  $^4_2\text{He}$ , wobei zwei Protonen in Neutronen umgewandelt und zwei Positronen, Neutrinos sowie  $\gamma$ -Strahlung emittiert werden.

### 4.4 Kernkraftwerke

Heutige Kernkraftwerke basieren auf der Kernspaltung. Im Reaktorkern wird spaltbares Material, also die so genannten Brennstäbe, mit langsamen Neutronen gespalten. Ein Moderator verringert die Geschwindigkeit der entstehenden Neutronen, und die Steuerstäbe bestimmen die Anzahl Neutronen und damit die Geschwindigkeit der Kettenreaktion. Die entstehende Wärme wird abgeführt und zur Erzeugung elektrischer Energie benutzt.

Kernkraftwerke sind aus zwei Gründen problematisch. Einerseits können sie in einen unkontrollierbaren Zustand geraten wie in Tschernobyl 1986 und Fukushima 2011, sodass Hunderte Quadratkilometer unbewohnbar werden, und andererseits entstehen radioaktive Abfälle, die entsorgt werden müssen.

In Fusionsreaktoren versucht man je einen Deuteriumkern  $^2_1\text{H}$  und einen Tritiumkern  $^3_1\text{H}$  zu einem Heliumkern  $^4_2\text{He}$  zu fusionieren, wobei noch ein schnelles Neutron freigesetzt wird. Im Vergleich zu Reaktoren, die auf Kernspaltung beruhen, hätten Fusionsreaktoren den Vorteil, dass Helium als Produkt weder giftig noch radioaktiv ist, dass Deuterium in grossen Mengen vorkommt, und dass Tritium leicht hergestellt werden kann. Die technischen Probleme sind, dass es kein Material gibt, das bei  $10^7$  K nicht schmilzt, und dass sehr viel Energie nötig ist, um Gas auf diese Temperatur aufzuheizen.