

---

## 6.10 Einfache Kernreaktionen; freies Neutron

### Entdeckung des Neutrons

Bereits 1920 sprach Rutherford die Vermutung aus, dass zwei damals unbekannte Kerne existieren: Kerne mit der Massenzahl 2 und einer Ladung (Deuteronen) und Teilchen mit der Massenzahl 1 und der Ladung Null (Neutronen).

1930 entdeckten Walter Bothe (1891 - 1957, dt. Physiker, NP 1954) und August Becker (1879 - 1953, dt. Physiker), dass bei der Beschießung einiger leichter Elemente (vor allem Be-9 und Be-10) mit  $\alpha$ -Strahlen eine durchdringende Strahlung entsteht, zu deren Absorption eine Bleischicht mit einer Halbwertsdicke von 5 cm erforderlich ist (zum Vergleich: Die harte  $\gamma$ -Strahlung von Th erfordert 1,5 cm Bleidicke!). Die Strahlung selbst ist in Nebel- oder Ionisationskammern nicht nachweisbar, wohl aber die im wasserstoffreichen Paraffin auftretenden Rückstoßprotonen. Zunächst nahm man daher an, es handle sich bei dieser "Berylliumstrahlung" um äußerst harte Gammastrahlung. 1932 gelang es James Chadwick (engl. Physiker, 1891 - 1974, NP 1935), nachzuweisen, dass die Rückstoßprotonen durch Stoß mit ungeladenen Teilchen, die nahezu dieselbe Masse haben wie Protonen, entstehen: Das Neutron war entdeckt!

Der Vorgang der Entstehung freier Neutron kann durch eine weiter unten noch genauer zu besprechende sog. Kernreaktion beschrieben werden:

$${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n} + W.$$

### Eigenschaften freier Neutronen

Neutronen sind elektrisch neutrale Elementarteilchen. Daher treten keine direkten Wechselwirkungen mit den Elektronen eines Absorbermaterials auf. Das bedeutet, dass sie keine unmittelbaren Ionisationen verursachen und z. B. in der Nebelkammer nicht direkt nachgewiesen werden können.

Neutronen erfahren wegen ihrer Neutralität keine Coulombkräfte und stoßen deshalb leichter als geladene Elementarteilchen mit den Kernen eines Absorbers zusammen. Bei der Wechselwirkung mit Kernen können sowohl elastische als auch inelastische Stöße stattfinden, es kann aber auch zu einem Neutroneneinfang kommen. Bevorzugt werden sog. thermische Neutronen eingefangen, deren kinetische Energie derjenigen von Gasatomen von Zimmertemperatur vergleichbar ist.

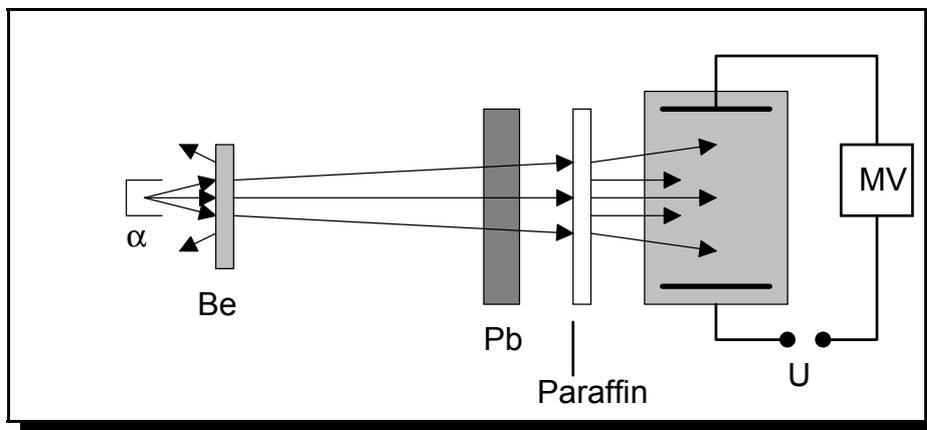
Nach den klassischen Stoßgesetzen ist die beim Stoßvorgang übertragene Energie maximal, wenn der Stoß zentral, elastisch und zwischen zwei Partnern gleicher Masse erfolgt. Letzteres ist der Fall, wenn ein Neutron auf ein Proton trifft; es gibt dann im Idealfall seine ganze Energie ab. Wasserstoff-

haltige Substanzen sind daher zur raschen Abbremsung von Neutronenstrahlen besser geeignet als schwere Atome. Als Absorber werden deshalb häufig Wasser oder Paraffin verwendet.

Die Absorption von Neutronen ist besonders bei leichten Elementen mit der Bildung von Rückstoßkernen verbunden; dies führt zu einer mittelbaren Ionisation im Absorber, wobei auf kurzen Bahnen hohe Ionendichten auftreten.

Zwei wesentliche Folgerungen daraus sind:

1. Wegen der mittelbaren Ionisation des Absorbermaterials können Neutronenstrahlen indirekt auch in Ionisations- oder Nebelkammern nachgewiesen werden (siehe Skizze).



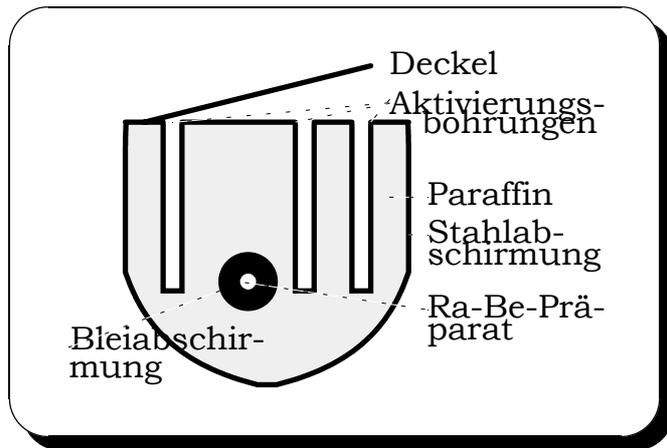
2. In jedem lebenden Organismus sind Wassermoleküle und damit Protonen in großer Anzahl vorhanden. Hieraus entstehen bei der Abbremsung von Neutronen Rückstoßkerne, die starke Ionisationen und damit Schädigungen der Zellen hervorrufen können.

Energieverluste erleiden Neutronen wegen des Fehlens einer elektrischen Ladung ausschließlich durch Zusammenstöße mit den Atomkernen, die aufgrund der geringen Größe der Kerne viel seltener erfolgen als die Ionisation eines ganzen Atoms. Dies hat zur Folge, dass Neutronen eine große Durchdringungsfähigkeit haben (Neutronenbombe!) und nur durch dicke Bleiplatten oder wasserstoffhaltige Schichten absorbiert werden.

Neutronen existieren nur sehr kurze Zeit im freien Zustand, da sie einerseits leicht von Kernen eingefangen werden und zum anderen radioaktiv sind ( $\beta$ -Strahler) und mit einer kurzen Halbwertszeit in der Größenordnung von  $T = 20$  min zerfallen. Deshalb existiert kein Vorrat an freien Neutronen in der Natur: Man muss sie durch Kernreaktionen gewinnen.

Die einfachste Neutronenquelle besteht aus einer Metallkapsel, die ein Gemisch aus Radium und Beryllium enthält.

Prinzipskizze einer Neutronenquelle:



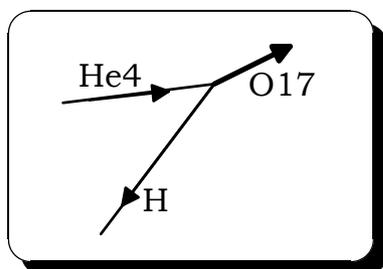
Die Neutronen entstehen durch die weiter oben beschriebene Reaktion und werden durch die Metallhülle kaum geschwächt. Da sich das Radium in der Quelle zusammen mit seinen Zerfallsprodukten befindet, die  $\alpha$ -Strahlen mit unterschiedlichen Energien aussenden, erhält man so auch Neutronen mit unterschiedlichen Energien. Pro Milligramm Radium werden je Sekunde  $1,5 \cdot 10^4$  Neutronen geliefert.

### Der Kernumwandlungsversuch von Rutherford

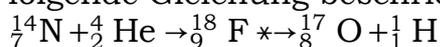
E. Rutherford ließ 1919  $\alpha$ -Teilchen aus dem Zerfall von  ${}_{84}^{214}\text{Po}$  ( $W \approx 7,7 \text{ MeV}$ ) in einer Nebelkammer durch Stickstoff fliegen. In seltenen Fällen gabelte sich eine der ansonsten geradlinig verlaufenden Bahnen in eine lange dünne und eine kurze dicke Teilchenbahn.

Eine komplizierte Rechnung unter Berücksichtigung der auftretenden Winkel, der Spurenlängen, des Energie- und Impulssatzes sowie der Erhaltungssätze für Ladung und Masse führte zu folgendem Ergebnis: Die lange Bahn ist einem Proton, die kurze einem  ${}_{8}^{17}\text{O}$  zuzuordnen.

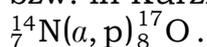
Bild:



Dies bedeutet, dass eine Kernumwandlung stattgefunden hat, die durch die folgende Gleichung beschrieben werden kann:



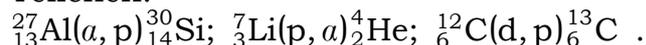
bzw. in Kurzform



Anmerkungen:

1. In der Physik sind beide oben angegebenen Schreibweisen gebräuchlich.
2. Um eine derartige Kernreaktion auslösen zu können, muss ein eingeschossenes Teilchen die Coulombkraft des Kerns überwinden können. Dies ist für  $\alpha$ -Strahlen aus radioaktiven Zerfällen bis  $Z \approx 23$  der Fall.

Beispiele für Kernumwandlungen beim Beschuss von Kernen mit geladenen Teilchen:



Manche der Reaktionsprodukte sind radioaktiv und zerfallen nach demselben Mechanismus wie die natürlichen radioaktiven Stoffe.

### Allgemeine Charakteristik der Kernreaktionen

(Die folgende Darstellung stammt fast wörtlich aus O. Höfling, Physik Band II Teil 3, Dümmler)

Als Kernreaktionen bezeichnet man Vorgänge, bei denen durch Beschuss eines Kerns mit einem schnellen Teilchen dieses in das Feld des Kerns eintritt. Für Kernreaktionen wird wie auch bei chemischen Reaktionen in manchen Fällen Energie frei, in anderen Energie verbraucht. Im ersten Fall heißt eine Kernreaktion exoenergetisch, im zweiten Fall endoenergetisch.

Beim Einfang eines Geschosses durch einen Kern entsteht meist ein Zwischenkern (Compoundkern), der sich nach folgenden Mechanismen weiter umbilden kann:

1. Die elastische Streuung: Der Zwischenkern strahlt das eingefangene oder ein schon vorher im Kern vorhanden gewesenes gleichartiges Teilchen wieder aus, wobei die Richtung des einfallenden und des ausgestrahlten Teilchens im allgemeinen nicht übereinstimmen. Die von dem Teilchen eingebrachte Energie wird ebenfalls mit abgegeben. Auf diese Weise kehrt der Kern in seinen Ausgangszustand zurück.  
Beispiel:  ${}^{197}\text{Au}(\alpha; \alpha){}^{197}\text{Au}$
2. Die unelastische Streuung: Der Zwischenkern strahlt das eingefangene oder ein schon vorher im Kern vorhanden gewesenes gleichartiges Teilchen wieder aus, wobei aber ein Teil der eingebrachten Energie im Kern zurückgelassen wird. Auf diese Weise verbleibt der Kern in einem angeregten Zustand, aus dem er meistens durch Abgabe eines Gammaquants in seinen Grundzustand übergeht.  
Beispiel:  ${}^{115}\text{In}(\text{n}; \text{n}'){}^{115}\text{In}^*$
3. Die Austauschreaktion: Der Zwischenkern gibt statt des eingefangenen Teilchens ein anderes geladenes oder ungeladenes Teilchen ab, wobei ein oft auftretender Energieüberschuss noch durch ein abge-

strahltes Gammaquant ausgeglichen wird. Es kann auch passieren, dass der Zwischenkern kein Teilchen, sondern nur ein Gammaquant abgibt. Dieser letzte Fall tritt besonders beim Beschuss mit Neutronen auf.

Beispiel:  $^{10}\text{B} + ^4\text{He} \rightarrow ^{14}\text{N}^* \rightarrow ^{13}\text{C} + ^1\text{p}$

4. Der Kernfotoeffekt: Der angeregte Zwischenkern entsteht durch den Einfang eines Gammaquants. Der Kernfotoeffekt stellt ein Analogon zum gewöhnlichen Fotoeffekt dar. Während beim Fotoeffekt durch Beschuss mit Photonen aus der Atomhülle Elektronen ausgelöst werden, erfolgt beim Kernfotoeffekt eine Freisetzung von Teilchen aus dem Atomkern durch Beschuss mit genügend energiereichen Gammaquanten. Dabei können aus dem Atomkern Neutronen, Protonen, Alphateilchen usw. herausgeschossen werden. Ebenso können bei solchen Reaktionen andere bisher nicht besprochene Teilchen (z. B. Mesonen) entstehen. Die durch den Kernfotoeffekt erzeugten Neutronen und Protonen werden als Fotoneutronen und Fotoprotonen bezeichnet. Der Kernfotoeffekt wird in der Photoneutronenquelle zur Erzeugung von Neutronen verwendet.

Beispiel:  $^9\text{Be}(\gamma; \text{n}) \rightarrow ^8\text{Be}^* \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$

5. Die partielle Kernverdampfung oder Kernspaltung oder Spallation: Der angeregte Zwischenkern gibt spontan je nach der Größe der Anregungsenergie eine mehr oder weniger große Zahl von Protonen, Neutronen, Alphateilchen oder anderen Teilchen ab.
6. Die Kernspaltung oder Fission: Die Kernspaltung tritt vorwiegend bei schweren Atomkernen auf. Der angeregte Zwischenkern zerfällt in zwei mittelschwere Kerne und einige Neutronen. Die angeregten Kernbruchstücke zerfallen weiter unter Emission von Neutronen, Beta- und Gammastrahlung.

Beispiel:  $^{235}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}\text{U}^* \rightarrow ^{144}\text{Ba}^* + ^{89}\text{Kr}^* + 3 \cdot ^1_0\text{n}$

7. Die direkten Reaktionen: Die unter 1., 2. und 3. genannten Reaktionstypen können auch ohne die Bildung eines Zwischenkerns ablaufen. Man spricht dann von direkten Reaktionen. Bei der unelastischen Streuung überträgt dann beispielsweise ein im Bereich des Kernfeldes vorbeifliegendes Teilchen Energie auf den Kern und regt ihn an.

Beispiel:  $^{35}\text{Cl}(\text{d}; \text{p})^{36}\text{Cl}$ .

### **Künstlich-radioaktive Nuklide**

Beim Rutherford'schen Kernumwandlungsversuch entstand erstmals ein Fluorisotop, das erst durch einen künstlichen Eingriff radioaktiv wurde. Für dieses Phänomen gelten folgende Definitionen:

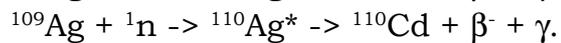
Man bezeichnet radioaktive Nuklide, die in der Natur nicht vorkommen, sondern aus stabilen Atomkernen künstlich hergestellt wurden, als Radioisotope. Sie zerfallen nach den gleichen Gesetzen wie die natürlichen Radionuklide.

Die Herstellung von künstlichen Radionukliden (Aktivierung) kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: durch Beschuss mit anderen Teilchen oder durch Kernspaltung.

Wichtige Beispiele für Aktivierungsmechanismen:

1. Aktivierung durch Beschuss mit Alphateilchen: Eine wichtige Kernreaktion ist z. B. der Vorgang zur Entdeckung freier Neutronen:  
 ${}^9\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{13}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^1_0\text{n} + \gamma.$
2. Aktivierung durch Beschuss mit Neutronen: Kernumwandlungen nach Beschuss mit Neutronen sind besonders leicht, da Neutronen keine Coulombkräfte erfahren.

Beispiele:



Heute kann man von allen Elementen mindestens je ein radioaktives Isotop herstellen. Bis heute sind bereits mehr als 1200 solcher Radioisotope bekannt.

Unter den vielen Radionukliden verdient das Co-60 besondere Aufmerksamkeit. Es ähnelt in Bezug auf Haltbarkeit und Strahlungsart sehr dem Ra-228, nur lässt es sich viel billiger und in beliebig großen Mengen aus gewöhnlichem Kobaltmaterial herstellen. Es wird mit großem Erfolg in der Medizin angewandt.