

A. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER IONISIERENDEN STRAHLUNG

B. Kopka

Labor für Radioisotope
der Georg-August-Universität Göttingen

1. Aufbau der Materie
 - 1.1. Die Atomhülle
 - 1.2. Der Atomkern

2. Strahlenarten
 - 2.1. Einteilung der Strahlenarten
 - 2.2. Strahlen elektrisch geladener Teilchen
 - 2.2.1. Der α -Zerfall
 - 2.2.2. Der β -Zerfall
 - 2.3. Gamma- und Röntgen-Strahlung
 - 2.3.1. γ -Strahlung
 - 2.3.2. Röntgenstrahlung

3. Halbwertszeit

1. Aufbau der Materie

Atome sind aufgebaut aus einem Atomkern und einer Atomhülle. Der Atomkern enthält (fast) die gesamte Masse des Atoms; er besteht aus den Nukleonen, aus positiv geladenen Protonen (p) und etwa gleich schweren elektrisch neutralen Teilchen, den Neutronen (n). Die Atomhülle wird gebildet aus den elektrisch negativ geladenen Elektronen (e^-). Der Durchmesser eines Atomkerns liegt in der Größenordnung von 10^{-12} cm, derjenige der Hülle bei etwa 10^{-8} cm.

Jedes Proton trägt die gleiche Ladung wie ein Elektron, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Damit wirken zwischen Kern und Hülle elektrostatische Anziehungskräfte (Coulomb-Kräfte), die Atomkern und Hülle zusammenhalten. Jedes Atom ist im Normalzustand elektrisch neutral, weil das der Zustand mit der geringsten potenziellen Energie ist und damit der stabilste Zustand. Ein elektrisch neutrales Atom enthält also im Kern genau so viele Protonen wie Elektronen in der Hülle.

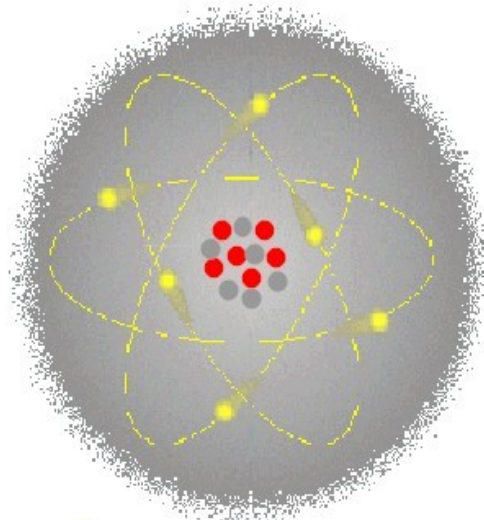


Abb. 1: Aufbau des Atoms
Beispiel: ^{12}C

● Elektronen	negative Ladung
● Protonen	positive Ladung
● Neutronen	elektrisch neutral

In der Abbildung 1 ist der Kern mit 6 Protonen und 6 Neutronen zu sehen. Es ist das Kohlenstoffisotop ^{12}C .

Die Abstoßung der positiven Ladungen im Kern wird durch die stärkeren, aber nicht so weit reichenden Kernkräfte überwunden.

1.1. Die Atomhülle

Die verschiedenen Atome werden durch die Ordnungszahl Z charakterisiert. Diese Zahl gilt sowohl für die Protonen (Kernladungszahl) als auch für die Elektronen der Hülle. Und mit der Anzahl der Elektronen in der Hülle ändern sich die chemischen Eigenschaften. Erhöhen wir die Ladungszahl bei Kohlenstoff um 1, haben wir Stickstoff vorliegen. Ändert sich die Anzahl der Neutronen im Kern bleiben die chemischen Eigenschaften unverändert. Man spricht von Isotopen eines Nuklids. Zur besseren Vorstellung gruppiert man die Elektronen in sog. "Schalen", denen man eine Energie zuordnet (jedes Elektron in einer Schale besitzt die gleiche Gesamtenergie).

Die einzelnen Schalen werden von innen her durchnummeriert ($n =$ Hauptquantenzahl) bzw. mit großen lateinischen Buchstaben versehen. Die dem Kern nächste Schale ($n = 1$) heißt K-Schale, es folgt L

Das Elektron kann also nur solche Energiewerte aufnehmen, absorbieren, die der Differenz zweier Schalenenergien entspricht. Das Elektron befindet sich dann im "angeregten Zustand", und kann beim Übergang in den Grundzustand diese Energiedifferenz wieder abgeben. Die Abgabe von Energie erfolgt meist in Form von elektromagnetischen Wellen. Liegt die Frequenz dieser Strahlung zwischen $4 \cdot 10^{14}$ und $7 \cdot 10^{14}$ Hz (Wellenlänge zwischen 0,4 bis 0,8 μm), so empfinden wir die

Strahlung als sichtbares Licht. Da die Aussendung zeitlich begrenzt ist sprechen wir von sog. Lichtquanten = Photonen.

Bei komplizierten Atomen mit mehreren Elektronen in der Hülle werden die Schalen vom energetisch tiefsten Zustand, also von der innersten Schale her aufgefüllt. An der Absorption und Emission von Energie beteiligt sich meistens nur das äußerste Elektron.

Atome können auch größere Energieportionen aufnehmen, z.B. durch Stöße mit hochenergetischen Elektronen oder Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung sehr kurzer Wellenlänge (Röntgenstrahlung). Dabei wird meist ein inneres Elektron aus dem Atomverband gelöst (das Atom wird ionisiert). Die entstehende Lücke wird sofort wieder von energetisch höheren Elektronen aufgefüllt, wobei eine kurzwellige Strahlung ausgesandt wird, die sog. charakteristische Röntgenstrahlung. Es werden ganz bestimmte Frequenzen ausgesandt, den Energieunterschieden entsprechend, die für das Atom charakteristisch sind.

Der größere Anteil der bekannten Röntgenstrahlung besteht aus der Bremsstrahlung, die bei der Abbremsung von schnellen geladenen Teilchen in Materie entsteht. Da die meisten geladenen Teilchen ihre Energie nicht in einem Bremsakt verlieren, entsteht ein kontinuierliches Spektrum verschiedener Frequenzen. Da ein Teilchen maximal seine gesamte kinetische Energie in einem Bremsakt in elektromagnetische Strahlung verwandeln kann, hat das Bremsspektrum eine Maximalfrequenz bzw. eine kurzwellige Grenze.

1.2. Der Atomkern

Der Atomkern wird aufgebaut durch die Nukleonen, die 1830 mal schwerer sind als die Elektronen. Durch die Ordnungszahl Z ist die Anzahl der Protonen im Atomkern festgelegt. Die Anzahl N der Neutronen ist meistens gleich oder größer als die der Protonen (Ausnahmen ^1H , ^3He). Unter der Massenzahl M versteht man die Summe aus Protonen- und Neutronenzahl $M = Z + N$. Die Massenzahl schreibt man links oben an das Elementsymbol, die Kernladungszahl Z links unten. Man schreibt also:

$$\begin{array}{c} M \\ \text{Symbol} \\ Z \end{array}$$

Im Atomkern sitzen Z elektrisch gleiche Ladungen dicht beieinander, die abstoßende Kräfte aufeinander ausüben. Damit die Atomkerne überhaupt stabil sein können, muss eine sehr starke kurzreichweitige Kraft zwischen allen Nukleonen (auch den neutralen) existieren. Die kurze Reichweite folgt aus der Tatsache, dass Atomkerne mit $Z > 92$ nicht mehr stabil sind, dass hier also die abstoßenden elektrischen Kräfte größer sind als die anziehenden Kernkräfte (der Atomkern ist größer als die Reichweite der Kernkräfte).

Die Masse eines zusammengesetzten Atomkerns sollte sich nach unseren bisherigen Vorstellungen aus den Massen seiner Bausteine zusammensetzen, nämlich $m = Z * m_p + N * m_n$ (m_p = Protonenmasse, m_n = Neutronenmasse). Die genaue Messung von Kernmassen mit sog. Massenspektrometern hat ergeben, dass die obige Annahme nur näherungsweise richtig ist. Die Masse des zusammengebauten Kerns ist kleiner als die Summe der Massen seiner Bausteine.

Zur Bestimmung der Atomgewichte hat man sich geeinigt, als Einheit $1/12$ des Gewichts eines Kohlenstoffatoms zu verwenden.

Der Grund liegt in der Häufigkeit von Kohlenstoffverbindungen und der damit einfachen Vergleichbarkeit. Kohlenstoff enthält im Kern 6 Protonen und 6 Neutronen, so dass $M = 12$ ist. Da die Elektronen nur einen vernachlässigbaren Beitrag zur Masse liefern, ist das Atomgewicht $A = M$; das Atomgewicht ist also eine Zahl. Ein Grammatom einer Substanz sind A Gramm dieser Substanz.

Für zusammengesetzte Atome, d.h. Moleküle können wir als Summe der Atomgewichte ein Molekulargewicht definieren (Beispiel: H_2O , Molekulargewicht $2 * 1 + 1 * 16 = 18$). Ein Mol einer Substanz entspricht dem Molekulargewicht in Gramm (1 Mol Wasser sind $18 \text{ g} = 18 \text{ ml}$ Wasser). In einem Mol einer beliebigen Substanz befinden sich immer gleich viele Moleküle, nämlich $L = 6 * 10^{23}$ ($L =$ Loschmidt'sche Zahl); 18 ml Wasser enthalten also $6 * 10^{23}$ Moleküle.

Beim Aufbau der Atomkerne haben wir gesehen, dass Nukleonen unter dem Einfluss der Kernkräfte zusammengehalten werden. Ähnlich wie in der Atomhülle gruppieren sich die Nukleonen im Atomkern in Schalen, denen man wieder Energiewerte zuordnen kann. Auch Atomkerne kann man anregen, Kerne können Energieportionen absorbieren, wenn diese den Differenzen zwischen Schalen-Energien entsprechen. Während in der Hülle diese Differenzen in der Größenordnung eV lagen, liegen sie beim Atomkern in der Größenordnung MeV , sind also 10^6 mal größer. Die Anregung kann z.B. durch Stoßprozesse mit hochenergetischen Teilchen aus Beschleunigern erfolgen. Der Kern kann (wie die Hülle) seine Anregungsenergie in Form von elektromagnetischer Strahlung abgeben, die in diesem Fall sehr kurzweilig (sehr hochfrequent, sehr energiereich) ist; man nennt sie γ -Strahlung.

Für Atomkerne ist dies nicht die einzige Möglichkeit, die Anregungsenergie abzugeben. Je nach Bauart des Atomkerns können α - oder β -Strahlen ausgesandt werden. Hierbei handelt es sich um Korpuskularstrahlen, α -Teilchen sind Atomkerne des Helium-Atoms mit zwei Protonen und zwei Neutronen, β -Teilchen sind Elektronen (die aus dem Kern emittiert werden). Bei der Emission geladener Teilchen ändert der Kern seine Zusammensetzung, so dass sich die Elektronenhülle umordnen muss; damit hat sich eine Atomumwandlung vollzogen.

2. Strahlenarten

2.1. Einteilung der Strahlenarten

Ionisierende Strahlen sind alle Teilchenstrahlen oder elektromagnetische Wellen, die beim Durchgang durch Materie deren Atome direkt oder indirekt zu ionisieren vermögen. Hinsichtlich der primären physikalischen Vorgänge bei ihrer Wechselwirkung mit Materie lassen sich drei Gruppen von Strahlenarten unterscheiden:

- a) Strahlen elektrisch geladener Teilchen, wie z.B.
Elektronen, Positronen, Protonen, α -Teilchen, Rückstoßkerne
- b) Röntgen- und γ -Strahlen
- c) Neutronenstrahlen

Jedes Teilchen oder Quant eines Strahls besitzt eine bestimmte Energie. Als Energieeinheit ist in der Atom- und Strahlenphysik das Elektronenvolt [eV] gebräuchlich:

$$1 \text{ eV} = 10^{-3} \text{ keV} = 10^{-6} \text{ MeV}$$
$$1.000.000 \text{ eV} = 1.000 \text{ keV} = 1 \text{ MeV}$$

Haben die Teilchen eines Strahls alle die gleiche kinetische Energie, so spricht man von einem monoenergetischen oder monochromatischen Strahl; im entgegengesetzten Fall von einem Energiespektrum (Linienspektrum oder kontinuierliches Spektrum) des Strahls.

2.2. Strahlen elektrisch geladener Teilchen

Wir haben gesehen, dass man als Maß für die Stabilität eines Atomkerns die Bindungsenergie/Nukleon E_B/M betrachten kann. Dies errechnet sich aus dem Massendefekt, der beim Zusammenbau des Kerns aus seinen Bestandteilen erzielt wird; die Einzelteile sind schwerer als der zusammengesetzte Kern. Je größer der Unterschied, desto stabiler ist der Kern.

Schwere Atomkerne enthalten viele Protonen, die sich gegenseitig auf Grund elektrischer Kräfte abstoßen. Da die bindende Kernkraft sehr stark, aber nur eine kurze Reichweite haben, überwiegen bei Kernen mit Z größer als 92 die abstoßenden Kräfte; diese Kerne sind instabil.

Es zeigt sich, dass diese Atomkerne nicht in ihre Einzelnukleonen zerfallen, sondern dass z.B. ein sehr stabiler Helium-Kern (2 Protonen, 2 Neutronen) emittiert wird. Schon vor der Identifikation dieser Teilchen als Helium-Kerne hat man dieser "Aktivität" den Namen α -Strahlung gegeben.

2.2.1. Der α -Zerfall

Ein α -Teilchen ist ein ${}^4_2\text{He}$ -Kern, d.h., es ist 2-fach positiv geladen und ist ca. 7000-mal schwerer als ein Elektron. Schwere Kerne können sich in leichtere Kerne (2 Protonen und 2 Neutronen weniger) umwandeln, wobei der Gewinn an Bindungsenergie größer ist als die Ablösearbeit für das α -Teilchen. Die überschüssige Energie wird dem α -Teilchen als kinetische Energie mitgegeben, so dass sie alle die gleiche Geschwindigkeit haben (für Atomkerne gleicher Art), d.h., das Energiespektrum der α -Teilchen besteht aus einer diskreten Linie im MeV-Bereich (2-10 MeV). Atomkerne, die α -Strahlung emittieren, kommen besonders in der Natur vor.

Die α -Strahler sind in der Nuklidkarte in gelber Farbe eingetragen; die α -Emission ist vorwiegend eine Eigenschaft der schweren Kerne.

Beispiel:



2.2.2. Der β -Zerfall

Betrachten wir wieder die Nuklidkarte, so sehen wir, dass die Hänge des Gamow-Tales ("Stabilitätsrinne") rot und blau eingetragen sind. Hiermit werden die Atomkerne gekennzeichnet, die durch Emission positiver oder negativer β -Teilchen in stabilere Kerne übergehen können.

Bei der β -Strahlung handelt es sich um eine Teilchen-Strahlung, die nachweislich aus den Kernen kommt. Es werden dabei geladene Teilchen ausgesandt, die die gleichen Eigenschaften haben wie Elektronen. Man hat keinen Unterschied zwischen denen aus dem Kern kommenden Elektronen und denen der Atomhülle feststellen können. Bei der Aussendung eines Elektrons muss sich wegen der Ladungserhaltung im Atomkern ein Neutron in ein Proton verwandeln.

Beispiel:



Bei der Aussendung eines Positrons (= "positives Elektron") muss sich ein Proton in ein Neutron verwandeln. Es gilt dann:



Da bei diesen Kernumwandlungen die Bindung im Kern hinterher stabiler ist wird Bindungsenergie frei. Weil immer dieselbe Energie freigesetzt wird, erwartete man monoenergetische Beta-Teilchen. Die Wahrheit ist aber ein kontinuierliches β -Spektrum. Diese Tatsache hat Pauli dazu veranlasst, ein weiteres Teilchen hypothetisch zu fordern, das bei der Umwandlung vom Neutron in ein Proton und Elektron entsteht. Dieses Teilchen muss ungeladen sein und muss ein Teilchen mit verschwindend kleiner Masse sein; Pauli nannte es Neutrino. Da sich die überschüssige Bindungsenergie nun auf zwei Teilchen verteilt, kann man das kontinuierliche β -Spektrum erklären (Abbildung 2).

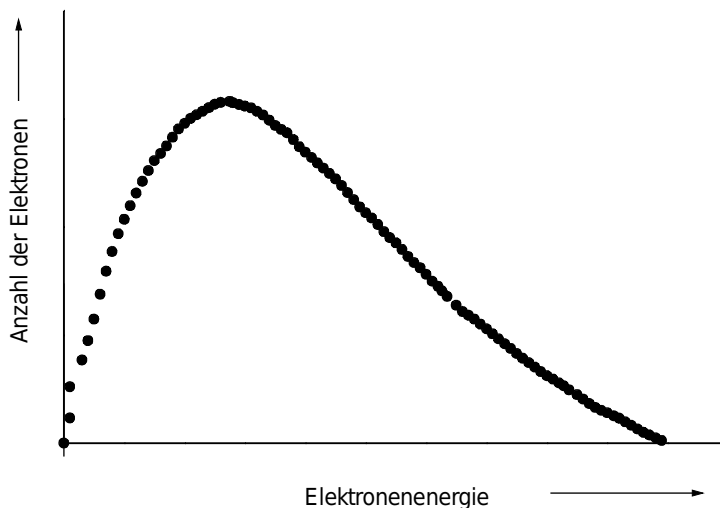
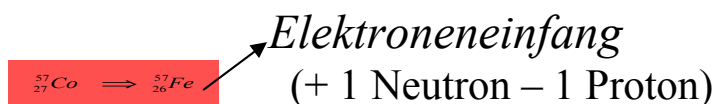


Abb. 2: Energieverteilung der β -Teilchen beim β -Zerfall

Der β -Zerfall muss nicht unbedingt in den Grundzustand der Tochterkerne erfolgen. Meist treten Übergänge in "angeregte Zustände" auf, die dann ihrerseits z.B. durch γ -Emission in den Grundzustand übergehen.

Außer der Positronen-Emission kann bei Isotopen mit Protonenüberschuss auch der sogenannte K-Einfang (englisch EC = electron capture) stattfinden. Der Atomkern verleiht sich ein Elektron aus der kernnächsten Elektronenschale (K-Schale) ein. Die entstandene Lücke füllt sich mit einem Elektron der energiereichen Schale unter Emission eines charakteristischen Röntgenquantens.



Eine sehr gut Übersicht über alle bekannten Nuklide gibt die Nuklidkarte (siehe Abbildung 3)

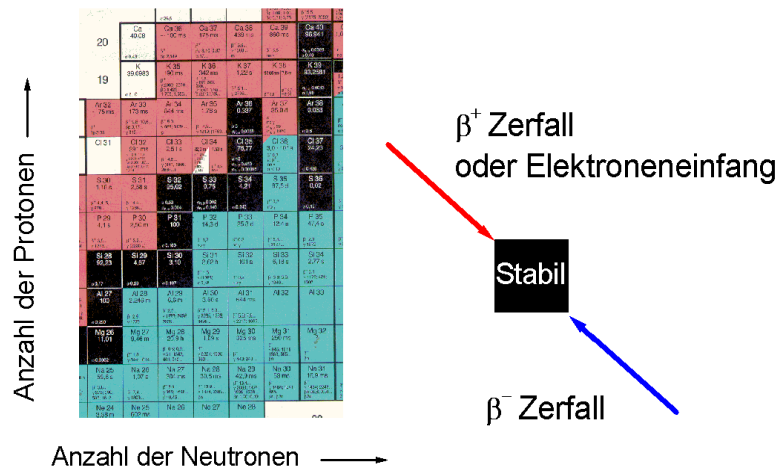


Abb. 3: Auszug aus der Karlsruher Nuklidkarte

2.3. Gamma- und Röntgenstrahlung

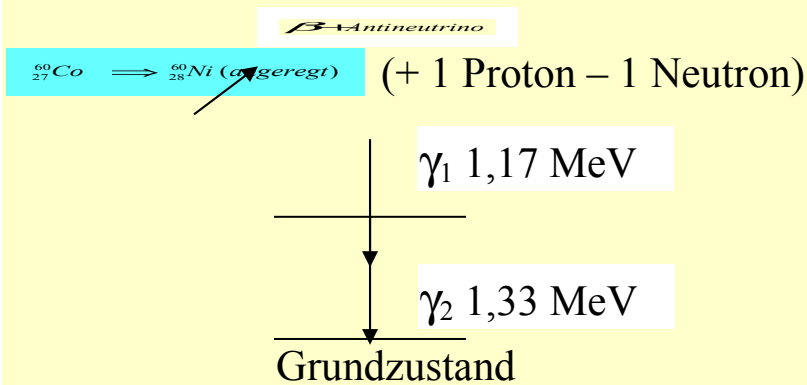
Röntgen- und γ -Strahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen, die sich nur hinsichtlich ihrer Entstehungsweise unterscheiden. Das charakteristische Merkmal der elektromagnetischen Strahlung ist ihre konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit c , die etwa 300.000 km/s beträgt und mit der Wellenlänge ν und der Frequenz h verknüpft ist durch $c = h \cdot \nu$. Auch Licht ist z. B. elektromagnetische Strahlung. Je höher die Energie der Strahlung desto kürzer ist ihre Wellenlänge und desto höher ist ihre Frequenz.

2.3.1. γ -Strahlung

Ein Atomkern kann Energie aufnehmen, er kann angeregt werden, indem ein Nukleon auf eine energetisch höhere Schale gehoben wird, z. B. nach einer Kernumwandlung (α oder β -Zerfall). Sie tritt daher in Begleitung von α - und β -Strahlung auch bei den meisten radioaktiven Zerfallsprozessen infolge der kurzzeitigen Bildung eines angeregten Tochterkerns auf. Es gilt also:

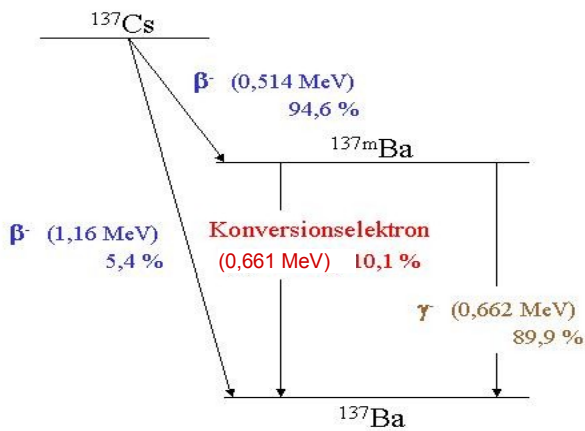
Wie in der Atomhülle kann auch der Atomkern seine Anregungsenergie in Form von elektromagnetischer Strahlung, der γ -Strahlung, abgeben. Da die Unterschiede zwischen den Schalenenergien in der Größenordnung MeV (Millionen-Elektronenvolt) liegen, ist die Frequenz sehr hoch. Meistens sind mehrere Zustände des Atomkerns angeregt, so dass es verschiedene γ -Linien (γ -Strahlung verschiedener Frequenzen) gibt. Im Falle des Zerfalls von ^{60}Co in ^{60}Ni ist die Energie der γ -Quanten $\gamma_1 = 1,17$ und $\gamma_2 = 1,33$ MeV. Die Anzahl der Nukleonen (Protonen, Neutronen) ändert sich bei der Gamma-Emission nicht.

Beispiel:



Anstatt ein γ -Quant zu emittieren, kann ein Kern seine Anregungsenergie dazu verwenden, ein Hüllenelektron (meistens das der K-Schale) aus dem Atomverband zu lösen. Dieses sog. Konversionselektron kommt aus der Atomhülle und nimmt den Überschuss der Anregungsenergie (Anregungsenergie minus Bindungsenergie des Elektrons) als kinetische Energie mit. Konversionselektronen sind von der Emission der charakteristischen Röntgenstrahlung begleitet, die beim Auffüllen der Lücken in den Elektronenschalen entstehen.

Beispiel:



2.3.2. Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung ist ionisierende elektromagnetische Strahlung, die bei der Abbremsung von schnellen geladenen Teilchen im elektrischen Feld eines Atoms (Röntgenbremsstrahlung) entsteht. Die charakteristische Röntgenstrahlung wird infolge der Anregung von Elektronen der inneren Elektronenhüllen eines schweren Atoms gebildet. Meist werden Röntgenstrahlen durch Bremsen von schnellen Elektronen, wie z.B. in der Röntgenröhre erzeugt. Die Röntgenröhre ist eine evakuierten Röhre, in der Elektronen aus einer elektrisch beheizten Kathode im elektrischen Feld beschleunigt und im Anodenmaterial abgebremst werden. Die Beschleunigungsspannung U beträgt normalerweise 20-200 kV. Die kinetische Energie der Elektronen wird im Anodenmaterial in vorwiegend Wärmeenergie und Röntgenenergie umgesetzt.

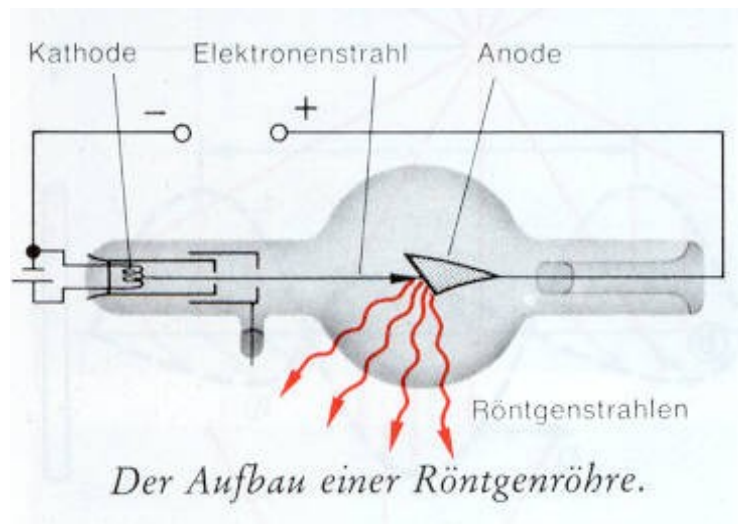


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre

Das Energiespektrum der Bremsstrahlung ist ein Kontinuum, das der charakteristischen Röntgenstrahlung ein Linienspektrum (Abbildung 5).

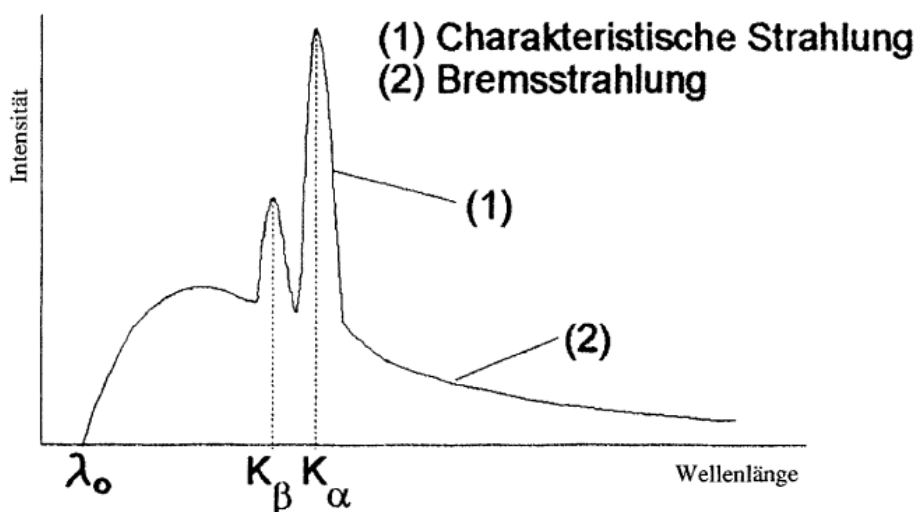


Abb. 5: Energieverteilung der Röntgenstrahlung einer Röntgenröhre

Das Verhältnis Strahlenausbeute zu Wärmeausbeute ist = gering. Für Wolfram ($Z = 74$) und 100 kV Beschleunigungsspannung ergibt sich eine Ausbeute von ca. 1 %.

3. Halbwertszeit

Grundsätzlich zerfallen Atomkerne, weil sie nicht stabil sind. Das heißt aber nicht, dass wir die Lebensspanne einzelner Atomkerne vorhersagen könnten. Sicher ist nur, dass nach einer bestimmten Zeit nur noch die Hälfte der instabilen Kerne vorhanden ist. In dieser Zeit halbiert sich als Folge davon auch die Strahlungsintensität (= Zahl der Zerfälle pro Sekunde) einer radioaktiven Substanz. Grundsätzlich wird zwischen physikalischer und biologischer Halbwertszeit unterschieden.

Die physikalische Halbwertszeit ist die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Zahl von radioaktiven Atomkernen zerfallen ist. Jedes Radionuklid hat eine für sich charakteristische

physikalische Halbwertszeit, die von Bruchteilen von Sekunden bis zu Milliarden von Jahren reichen kann.

Die biologische Halbwertszeit ist die Zeitspanne, nach deren Ablauf ein Organismus die Hälfte einer ihm zugeführten Substanz (Inkorporation) durch Stoffwechselfvorgänge ausgeschieden hat. Die Einnahme geeigneter Nahrungsmittel (z.B. jodhaltiger Nahrungsmittel bei radioaktivem Jod) bzw. chemischer Substanzen kann die Verweildauer von radioaktiven Substanzen im Körper verkürzen.

Effektive Halbwertszeit: Wird einem Organismus eine radioaktive Substanz zugeführt, so nimmt die Anzahl der radioaktiven Atome dieser Substanz einerseits durch den radioaktiven Zerfall, andererseits durch die Ausscheidung ab. Die effektive H. berücksichtigt beide Größen und gibt somit die Zeitspanne an, nach der die Gefährdung des Organismus auf die Hälfte gesunken ist.

$$H_{eff} = \frac{H_{phys} * H_{biol}}{H_{phys} + H_{biol}}$$

Beispiel: Das radioaktive Jod Isotop I-131 besitzt eine physikalische H. von 8,07 Tagen und eine biologische H. von 138 Tagen. Daraus ergibt sich eine effektive H. von $8,07 \times 138 / (8,07 + 138) = 7,6$ Tagen.