

# Radioaktivität

## Grundlagen und Messtechnik



Freudenstadt im Mai 2006

## **Vorwort**

Dieses Werk entstand ursprünglich in der Firma LS – Systemtechnik GmbH welche sich unter anderem mit der Entwicklung von Strahlenmessgeräten beschäftigte. Aufgrund der damaligen Anfragen der Kunden wollte ich ein kleines verständliches Handbuch entwickeln. Ich hoffe es ist mir hiermit gelungen.

Dieses Werk soll hierbei lediglich zum besseren Verständnis des doch sehr komplexen Themas dienen und ist für den Laien als auch den wissenschaftlich – technisch Interessierten gedacht.

Grundsätzlich konnten die physikalischen Zusammenhänge leider nicht ohne etwas Mathematik dargestellt werden, wobei jedoch auf die Herleitungen der Gleichungen verzichtet wurde.

Ich habe versucht die Zusammenhänge im Allerkleinsten, welche zur Emission radioaktiver Strahlung führen, so anschaulich und genau wie möglich darzustellen.

Ich hoffe, dass ich Ihnen mit diesem kleinen Werk den Einstieg in dieses Thema ein wenig erleichtern konnte und wünschen Ihnen viel Freude bei Ihren Messungen und Experimenten.

**Lothar Schmid**

Im Mai 2006

## Inhaltsverzeichnis:

|   |    |
|---|----|
| 1. Allgemeines  | 4  |
| 2. Was ist radioaktive Strahlung                          | 4  |
| 2.1 Aufbau des Atoms                                      | 4  |
| 2.2 Radioaktive Strahlenarten                             | 6  |
| 2.3 Energiebetrachtung                                    | 11 |
| 2.4 Dosimetrie  | 13 |
| 2.5 Strahlenschäden                                       | 16 |
| 3. Messung radioaktiver Strahlung                         | 17 |
| 3.1 Leitung in Gasen                                      | 17 |
| 3.2 Geiger – Müller – Bereich und Auflösung               | 19 |
| 3.3 Prinzipieller Aufbau eines Geiger – Müller – Zählers  | 21 |
| 3.4 Ausführung mit Bedienelementen eines GM – Messgerätes | 22 |
| 3.5 Beschreibung des Messgerätes MR 9511/15               | 22 |
| 3.6 Beispiele zur Messung radioaktiver Substanzen         | 25 |
| 4.1 Anhang 1 Zur Aktivität Seite 9                        | 28 |
| 4.2 Anhang 2 Zur Halbwertszeit Seite 8                    | 29 |
| 4.3 Anhang 3 Zählstatistik                                | 31 |
| 4.4 Anhang 4 Dosimetrische Größen und Einheiten           | 32 |

## Radioaktivität

### 1. Allgemeines

Unter Radioaktivität versteht man die Eigenschaft bestimmter Stoffe, ohne äußere Einwirkung eine Strahlung auszusenden. Diese Strahlung führt Energie mit sich und ionisiert Moleküle. Der Mensch hat für diese Art der Strahlung kein Sinnesorgan. Der Nachweis ist nur mit bestimmten Methoden und Geräten möglich, wie z.B. mit einem Geiger-Müller-Zähler.

Bevor auf die Messung näher eingegangen wird, sollen vorher einige wichtige Zusammenhänge erläutert werden.

### 2. Was ist radioaktive Strahlung?

Im Jahre 1896 entdeckte **Prof. Antoine Henri Becquerel**, dass Uransalze auch bei vollkommener Dunkelheit eine Photoplatte durch seine lichtdichte Verpackung hindurch zu schwärzen vermochten. Hieraus schloss Becquerel, dass die Schwärzung nur durch eine vom Uransalz stammende Strahlung verursacht werden konnte. **Das Forscherehepaar Curie** fand später heraus, dass andere Mineralien wesentlich stärker strahlen als „Uransalze“. Diese Elemente mußten nicht zum Strahlen angeregt werden.

Pierre und Marie Curie prägten den Begriff „**Radioaktivität**“, da die Strahler selbständig und spontan strahlten. In nachfolgenden Versuchen, in welchen verschiedene Proben u.a. extremen Temperaturen und Drücken ausgesetzt wurden, welche alle die Elektronenhülle der Atome beeinflussten, stellte man fest, dass die Strahlung selbst hierdurch nicht beeinflusst wurde. Dies führte zu der Schlussfolgerung, dass die Strahlung nicht aus der Atomhülle emittiert wird, sondern aus dem Atomkern.

#### 2.1 Aufbau des Atoms

Alle Stoffe, ob fest, flüssig oder gasförmig, bestehen aus Atomen. Hierbei sind alle Atome nach gemeinsamen Gesetzmäßigkeiten aufgebaut. Jedes Atom besteht aus einem Kern und einer Hülle. Sowohl Kern als auch Hülle sind aus **Elementarteilchen** zusammengesetzt (Bild 2.1.1).

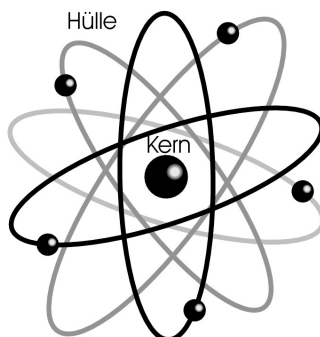


Bild 2.1.1  
Aufbau eines Atoms

In Tabelle 2.1.1 sind die wichtigsten Werte und Eigenschaften eines Atoms zusammengefasst.

|                    | Atomkern                     |                     | Atomhülle                                    |
|--------------------|------------------------------|---------------------|--|
| Elementarteilchen: | Protonen                     | Neutronen           | Elektronen                                   |
| Ladung Q:          | + 1,6 · 10 <sup>-19</sup> As | 0                   | - 1,6 · 10 <sup>-19</sup> As                 |
| Ruhemasse m:       | 1836 m <sub>e</sub>          | 1839 m <sub>e</sub> | 9,11 · 10 <sup>-31</sup> kg = m <sub>e</sub> |
| Symbol:            | p                            | N                   | E  |

Tabelle 2.1.1  
Werte und Eigenschaften der Elementarteilchen

Der Atomkern ist aus positiv geladenen **Protonen** und elektrisch neutralen **Neutronen** aufgebaut. Protonen und Neutronen bezeichnet man daher als **Nukleonen** (Kernbausteine). Die Masse eines Protons beträgt ca.  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg. Da die Masse eines Elektrons nur ca. 1/1836 der Masse eines Nukleons entspricht, wird praktisch die gesamte Masse eines Atoms durch den Kern bestimmt. Die Gesamtzahl A der Nukleonen wird also aus der Anzahl Z der Protonen plus der Anzahl N der Neutronen gebildet.

$$A = Z + N$$

A wird als **Massenzahl** eines Atoms bezeichnet und bestimmt die Kernart (Nuklid) eines Atoms. Die Anzahl Z der Protonen wird als **Kernladungszahl** bezeichnet und ist bei einem neutralen Atom gleich der Elektronenzahl der Atomhülle. Sie bestimmt das chemische Verhalten des Atoms und ist gleich der **Ordnungszahl** im Periodensystem der Elemente.

**Beispiel:**  $^{226}_{88}\text{Ra}$

Ein Radiumatom hat A = 226 Nukleonen und Z = 88 Protonen. Damit ergibt sich die Neutronenzahl N zu:

$$N = 226 - 88 = 138$$

Die Kerne vieler Elemente treten in mehreren Arten auf, die sich in der Anzahl N der Neutronen unterscheiden. Die Anzahl Z der Protonen bleibt dagegen immer gleich und somit die Ordnungszahl im Periodensystem. Die verschiedenen Sorten eines Elements nennt man **Isotope** (Isotop bedeutet „an derselben Stelle“). Damit will man ausdrücken, dass alle Elemente mit gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl an derselben Stelle im **PSE** (Periodensystem der Elemente) stehen. Isotope unterscheiden sich daher nicht in ihrem chemischen Verhalten, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften. So hat z.B. das Element Wasserstoff (H) drei Isotope:

- H-1: gewöhnlicher Wasserstoff mit 1 Proton und 1 Elektron und 0 Neutronen
- H-2: schwerer Wasserstoff (**Deuterium**) mit jeweils 1 Proton und Elektron und zusätzlich 1 Neutron
- H-3: überschwerer Wasserstoff (**Tritium**) wie H-1 und H-2 aber 2 Neutronen.

Die Atomhülle besteht aus Elektronen, die nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten um den Kern kreisen. Dies wird in Atommodellen veranschaulicht.

Ein Elektron kann den Kern nur auf bestimmten Bahnen umkreisen, ohne Strahlung abzugeben. Dabei besitzt es eine bestimmte Energie W. Der Übergang von einer kernferneren stationären Bahn zu einer kernnäheren erfolgt sprunghaft und unter Abgabe eines **Energiequants**. Nach Max Planck besteht jede Strahlungsenergie aus einem ganzzahligen Vielfachen eines Elementarquantums (Quant). Die Größe dieses elementaren Energiequantums ist frequenzabhängig. Es gilt:

$$W_q = h \cdot f$$

Hierin ist  $W_q$  Energie eines Strahlungsquants in J, h das elementare Wirkungsquantum mit  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js und f die Frequenz in Hz bzw. 1/s. Diese Gleichung gilt auch für Licht. Man bezeichnet  $W_q$  dann als Lichtquant.

Nach Albert Einstein sind Masse und Energie nach folgender Gleichung miteinander verknüpft:

$$W = m \cdot c^2$$

Hierin ist W die Energie eines Körpers, einer Strahlung, eines Feldes usw., m die Masse, die der Energie W entspricht und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum mit  $3 \cdot 10^8$  m/s.

Diese Gleichung besagt, dass Masse und Energie einander proportional sind. Eine Änderung des einen hat immer eine Änderung des anderen zur Folge.

Wenn man die beiden vorgenannten Gleichungen gleichsetzt ergibt sich:

$$m_q = \frac{h \cdot f}{c^2}$$

$m_q$  ist die Masse eines Lichtquants. Man nennt sie Photon. Diese Masse existiert nur bei Lichtgeschwindigkeit. Eine Ruhemasse besitzt ein Photon nicht. Da in der v.g. Gleichung  $c$  und  $h$  Konstanten sind, ist eine Energie bzw. Massenänderung des Photons nur durch eine Frequenzänderung möglich. So hat z.B. ein Lichtquant mit einer Frequenz von  $f = 5 \cdot 10^{14}$  Hz eine Masse von ca.  $3,48 \cdot 10^{-36}$  kg.

## 2.2 Radioaktive Strahlenarten

Die drei wichtigsten Strahlenarten werden mit

- $\alpha$  – Strahlen (ALPHA)
- $\beta$  – Strahlen (BETA)
- $\gamma$  – Strahlen (GAMMA)

bezeichnet.

Bei der Untersuchung in einem magnetischen Feld kommt man zu folgendem Ergebnis (Bild 2.2.1):

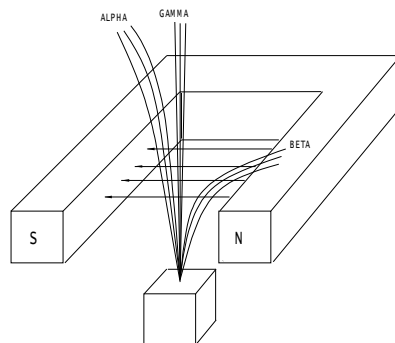


Bild 2.2.1  
Ablenkungsmodell für  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$  – Strahlen

### $\alpha$ – Strahlen

Durch Versuche wurde bekannt, daß bei Radiumverbindungen, die  $\alpha$  – Strahlen aussenden, Helium auftritt. Beim  $\alpha$  – Zerfall werden Teilchen ausgesandt, die aus 2 Protonen und 2 Neutronen bestehen. Es handelt sich also um Heliumkerne. Nach einem  $\alpha$  – Zerfall fehlen dem ursprünglichen Nuklid 2 Protonen und 2 Neutronen. Das ursprüngliche Element hat sich also durch den Zerfall in ein neues gewandelt.

**Beispiel:** Radon-222 mit der Protonenzahl  $Z = 86$  ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ) sendet ein  $\alpha$  – Teilchen aus. Damit gehen dem Kern 2 Protonen und 2 Neutronen verloren. Es wird in Polonium-218 ( $^{218}_{84}\text{Po}$ ) umgewandelt.

In Bild 2.2.2 ist ein  $\alpha$  – Zerfall schematisch dargestellt.

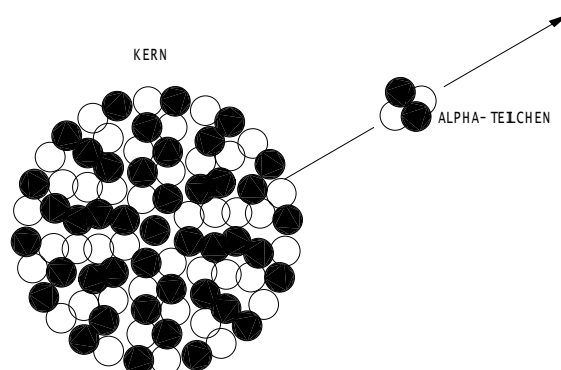


Bild 2.2.2  
Schematische Darstellung des  $\alpha$  – Zerfalls

## $\beta$ – Strahlen

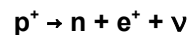
Die beim  $\beta$  – Zerfall ausgestrahlten Teilchen verhalten sich wie Elektronen. Wegen ihrer kleinen Masse werden sie daher im Magnetfeld leicht (weit) abgelenkt. Es treten zwei verschiedene Strahlungsarten von  $\beta$  – Teilchen auf:

$\beta^-$  - Strahlung (BETA – MINUS – STRAHLUNG = ELEKTRONEN)  
 $\beta^+$  - Strahlung (BETA – PLUS – STRAHLUNG = POSITRONEN)

Diese zwei Teilchen unterscheiden sich im Vorzeichen ihrer Ladung. In einem Atomkern sind jedoch weder negativ- noch positiv geladene Elektronen vorhanden. Durch Experimente wurde jedoch nachgewiesen, dass Neutronen in Protonen und Protonen in Neutronen umgewandelt werden können. Es entstehen so die beiden vorgenannten **Elektronen** bzw. **Positronen**.

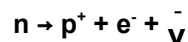
### Umwandlung Proton in Neutron (n)

Wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt, so muss ein Teilchen entstehen, welches die positive Ladung aufnehmen kann, da nach dem Gesetz der Ladungserhaltung, die Summe der Ladungen erhalten bleiben muss. Diese Forderung wird durch das Positron ( $e^+$ ) erfüllt; es hat die gleiche Masse wie ein Elektron, ist jedoch positiv geladen. Da es im Kern keine freien Positronen geben kann, werden diese sofort aus dem Kern emittiert. Beim Zerfall entsteht noch ein drittes Teilchen, welches den restlichen Teil der Zerfallsenergie trägt. Es ist ungeladen und wird als **Neutrino (v)** bezeichnet. Das Neutrino wird ebenfalls aus dem Kern emittiert. Der  $\beta^+$  - Zerfall kann wie folgt dargestellt werden:



### Umwandlung Neutron in Proton ( $p^+$ )

Beim  $\beta^-$  - Zerfall wird ein Neutron in ein Proton umgewandelt. Wie beim  $\beta^+$  - Zerfall entsteht ebenfalls ein drittes Teilchen, welches als **Antineutrino ( $\bar{\nu}$ )** bezeichnet wird. Die Kurzschreibweise lautet:



Beim  $\beta^-$  - Zerfall geht also ein Neutron des Kerns in ein Proton über. Die Ordnungszahl des Kerns erhöht sich um 1. Beim  $\beta^+$  - Zerfall dagegen wird die Ordnungszahl um 1 erniedrigt. In Bild 2.2.3 ist ein  $\beta^-$ -Zerfall schematisch dargestellt.

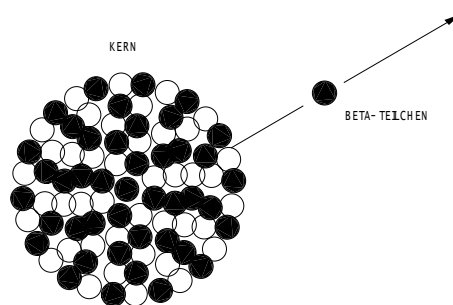


Bild 2.2.3  
Schematische Darstellung eines  $\beta^-$ -Zerfalls

## $\gamma$ – Strahlen

Nach einem  $\alpha$  – oder  $\beta$  – Zerfall ist der Kern oft in einem angeregten Zustand, d.h. im Kern befindet sich noch Energie, die abgebaut werden sollte. Dieser Energieabbau erfolgt durch das Aussenden von elektromagnetischer Strahlung. Diese Strahlung besitzt die gleiche Natur wie Licht, ist aber viel kurzwelliger und somit viel energiereicher als Licht. Die Energie wird dabei nicht kontinuierlich, sondern in einzelnen Portionen (Quanten) ausgesandt. Die  $\gamma$  – Strahlen bestehen also aus **Quanten** bzw. aus **Photonen (sog. Korpuskularstrahlung)**.

Beim  $\gamma$  - Zerfall erfolgt weder eine Umwandlung noch ein Aussenden von Nukleonen. Das Element bleibt also erhalten, der Kern strahlt nur Energie ab.  $\gamma$  - Strahlung ist somit sehr viel durchdringender als  $\alpha$  - bzw.  $\beta$  - Strahlung. Seine Energie verringert sich kaum mit dem Abstand zur Strahlungsquelle, im Gegensatz zur  $\alpha$  - bzw.  $\beta$  - Strahlung. Allen Zerfallsvorgängen ist jedoch eines gemeinsam, sie gehen in einen immer stabileren Zustand über, bis zum stabilen Endzustand.

Bild 2.2.4 zeigt schematisch den  $\gamma$  -Zerfall.

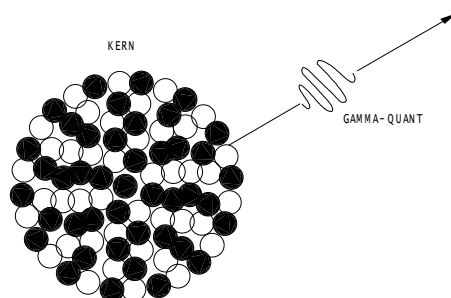


Bild 2.2.4  
Schematische Darstellung des  $\gamma$  -Zerfalls

### Halbwertszeit

Wie bereits erwähnt, kommt die radioaktive Strahlung aus den Atomkernen, die sich dadurch verändern. Die Atomkerne zerfallen also. Dieser Zerfall erfolgt nach statistischen Gesetzen. Dabei nimmt die Zahl der noch zerfallsfähigen Kerne ab. Die Zeit, bis die Zahl der ursprünglich vorhandenen zerfallsfähigen Atomkerne auf die Hälfte abgesunken ist, wird als **Halbwertszeit**  $T_{1/2}$  bezeichnet. Das Gesetz, nach dem die Zahl der noch nicht zerfallenen Atome  $N(t)$  zeitlich abnimmt, entspricht der Exponentialfunktion (Ableitung s. Anhang 1):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Hierin bedeuten:

|           |  |
|-----------|--|
| $N(t)$    | Anzahl der nach Ablauf der Zeit $t$ noch nicht zerfallenen Kerne |
| $N_0$     | Anzahl der zu Beginn des Zeitabschnittes $t$ vorhandenen Kerne   |
| $e$       | Basis des natürlichen Logarithmensystems (2,71828)               |
| $\lambda$ | Zerfallskonstante  |
| $t$       | Dauer des Zerfallsvorganges                                      |

Die Zerfallskonstante  $\lambda$  ist abhängig vom entsprechenden Nuklid und ergibt sich zu (Ableitung s. Anhang 2):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,69314}{T_{1/2}}$$

Mit einer Halbwertszeit von  $T_{1/2} = 55$  s für Radon  $^{220}_{86}\text{Rn}$  ergibt sich für  $\lambda = 12,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .  
Wird die vorgenannte Gleichung nach  $T_{1/2}$  umgestellt, so ergibt sich für die Halbwertszeit:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69314}{12,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}} = 55 \text{ s}$$

Für das radioaktive Nuklid Radon  $^{220}_{86}\text{Rn}$  beträgt die Halbwertszeit  $T_{1/2} = 55$  s. Nach dieser Zeit ist also die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atomkerne  $N_0$  auf  $N_1 = \frac{1}{2} \cdot N_0$  gesunken. Nach weiteren 55 s zerfällt wieder die Hälfte der Kerne auf  $N_2 = \frac{1}{2} \cdot (\frac{1}{2} \cdot N_0) = \frac{1}{4} \cdot N_0$  usw. Diese Zerfallskurve ist in Bild 2.2.5 dargestellt.



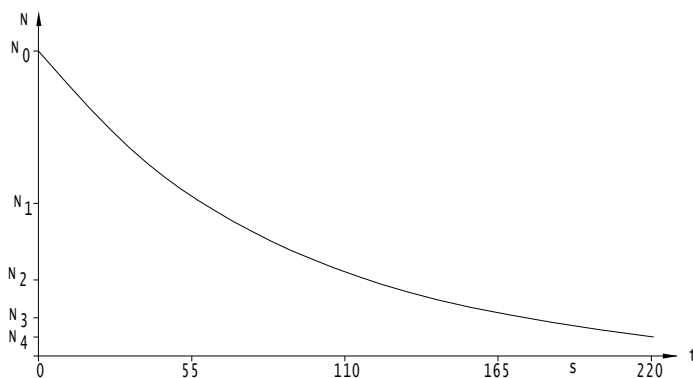


Bild 2.2.5  
Zerfall von Radon  $^{220}_{86}\text{Rn}$  mit einer Halbwertszeit von  $T_{1/2} = 55\text{ s}$

Die Funktion  $N(t)$  stellt nicht die wirkliche, sondern die mittlere Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne als Funktion der Zeit dar. Von  $N(t)$  Kernen zerfallen in der Zeit  $\Delta T$  im Mittel  $\Delta N$  Kerne.  $\Delta N/N$  ist somit die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Kern in dieser Zeit zerfällt. Die Zerfallswahrscheinlichkeit eines Kerns ist unabhängig von der Zeit  $t$ , d.h. vom Alter des Kerns. Die Zerfallskonstante  $\lambda$  und die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  können nicht durch äußere Einflüsse verändert werden.

Das Zerfallsgesetz gilt für alle radioaktiven Substanzen. Jedes radioaktive Nuklid hat eine charakteristische Halbwertszeit, die für alle Kerne einer bestimmten Nuklidart gleich groß und unabhängig vom Alter der Kerne ist. Sie kann von außen her nicht beeinflusst werden. In Tabelle 2.2.1 sind die Halbwertszeiten sowie die Zerfallsenergie für einige Nuklide zusammengefasst.

| Element                          | Z  | A   | $T_{1/2}$                     | Zerfall               | Energie in MeV |
|----------------------------------|----|-----|-------------------------------|-----------------------|----------------|
| Thorium $^{232}_{90}\text{Th}$   | 90 | 232 | $1,41 \cdot 10^{10}\text{ a}$ | $\alpha$<br>$\gamma$  | 4,01<br>0,0187 |
| Uran $^{238}_{92}\text{U}$       | 92 | 238 | $4,5 \cdot 10^9\text{ a}$     | $\alpha$<br>$\gamma$  | 4,19<br>0,048  |
| Kohlenstoff $^{14}_6\text{C}$    | 6  | 14  | 5730 a                        | $\beta^-$             | 0,158          |
| Cäsium $^{137}_{55}\text{Cs}$    | 55 | 137 | 30 a                          | $\beta^-$<br>$\gamma$ | 0,51<br>0,66   |
| Plutonium $^{239}_{94}\text{Pu}$ | 94 | 239 | 24000 a                       | $\alpha$<br>$\gamma$  | 5,15<br>0,4    |
| Radon $^{222}_{86}\text{Rn}$     | 86 | 222 | 3,83 d                        | $\alpha$              | 5,49           |
| Radium $^{226}_{88}\text{Ra}$    | 88 | 226 | 1601 a                        | $\alpha$<br>$\gamma$  | 4,78<br>0,187  |
| Polonium $^{210}_{84}\text{Po}$  | 84 | 210 | 138,4 d                       | $\alpha$<br>$\gamma$  | 5,3<br>0,8     |

Tabelle 2.2.1  
Halbwertszeiten sowie Zerfallsenergien einiger Nuklide (a = Jahre; d = Tage)

### Aktivität einer radioaktiven Substanz

Unter der Aktivität  $A$  einer radioaktiven Substanz versteht man die Anzahl der Zerfallsakte pro Zeiteinheit. (Genauere Betrachtung siehe Anhang 1)

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$$

Die Einheit ist das **Becquerel (Bq)**:

$$1\text{ Bq} = 1\text{ s}^{-1}$$

Eine Substanz weist also die Aktivität 1 Bq auf, wenn pro Sekunde ein Zerfallsakt auftritt. Früher benutzte man hierfür die Einheit **Curie (Ci)**.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Diese Einheit entspricht der Aktivität von 1 g Ra-226.  
Die Aktivität A ergibt sich aus der Beziehung

$$A = \lambda \cdot N = \frac{0,69314 \cdot N}{T_{1/2}}$$

mit N als Zahl der zerfallsfähigen Kerne.

An einem Beispiel sollen die Zusammenhänge veranschaulicht werden. Für den Betrieb eines Kernkraftwerkes werden bestimmte Grenzwerte für die an die Umwelt abgegebenen Aktivitäten festgelegt. So darf z.B. die Jahresaktivität  $A_a$  an Jod-131 maximal  $7,4 \cdot 10^9$  Bq betragen. Umgerechnet ergibt dies eine Aktivität A von:

$$A = \frac{A_a}{3,1536 \cdot 10^7} = \frac{7,4 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}}{3,1536 \cdot 10^7} = 235 \text{ Bq} \quad 1a = 3,1536 \times 10^7 \text{ s}$$

Wieviele Jod-131-Atome dürfen maximal in die Umwelt gelangen, damit der vorgenannte Grenzwert nicht überschritten wird?

Nach dem Zerfallsgesetz ist die Anzahl der pro Zeitintervall  $\Delta t$  zerfallenen Kerne  $\Delta n$  proportional zur Anzahl der vorhandenen Kerne.

Mit  $\Delta n$  wird hier die Abnahme der Teilchenzahl beschrieben. Es gilt somit:

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = -\lambda \cdot N$$

Das Minuszeichen in der Gleichung berücksichtigt die Abnahme der Teilchenzahl.

Die Anzahl der Kernumwandlungen muss gleich der Anzahl der zerfallenen Kerne sein. Damit ist:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left| \frac{\Delta n}{\Delta t} \right| = A$$

Wird  $A = \lambda \cdot N$  nach N umgestellt, ergibt sich:

$$N = \frac{A}{\lambda}$$

Die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  für Jod-131 beträgt 8,05 d (Tage) bzw.  $6,96 \cdot 10^5$  s. Wir erhalten somit:

$$N = \frac{A}{\frac{\ln 2}{T_{1/2}}} = \frac{A \cdot T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{235 \text{ s}^{-1} \cdot 6,69 \cdot 10^5}{0,69314} = 235 \cdot 10^6$$

Es dürfen also pro Sekunde maximal  $235 \cdot 10^6$  Jod-131-Atome in die Umwelt gelangen, die eine Jahresaktivität  $A_a$  von  $7,4 \cdot 10^9$  Bq erzeugen. Dies sind  $7,41 \cdot 10^{15}$  Atome pro Jahr.

Die absolute Atommasse ist die Summe der absoluten Massen der am Atomaufbau beteiligten Protonen, Neutronen und Elektronen. Seit 1961 gilt als Atommassenkonstante  $m_u$ :

$$m_u = 1/12 \cdot m(^{12}\text{C}) = 1,6605656 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

Wird diese Zahl mit der ganzzahlig gerundeten Atommasse 131 – daher Jod-131 – multipliziert, so erhalten wir als Masse für ein Jod-131-Atom:

$$m = 131 \cdot 1,6605656 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 2,175340936 \cdot 10^{-22} \text{ g}$$

Der Jahresausstoß darf also maximal

$$m_a = 2,175340936 \cdot 10^{-22} \text{ g} \cdot 7,41 \cdot 10^{15} = 1,611927634 \cdot 10^{-6} \text{ g}$$

betragen.

### 2.3 Energiebetrachtungen

In der Kernphysik wird die Strahlungsenergie in **eV (Elektronenvolt)** angegeben. Die Ladung eines Elektrons beträgt  $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (C = Coulomb = As). Das eV ist also eine auf die Elementarladung zugeschnittene Energieeinheit. Dabei ist 1 eV die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen von 1 V Spannungsdifferenz gewinnt. Es gilt:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J (J = Joule)}$$

Die  $\beta$ -Teilchen sind die kleinsten Bausteine und haben eine sehr kleine Masse. Wenn  $\beta$ -Teilchen vom Kern abgestoßen werden, können sie Geschwindigkeiten von ca. 90% der Lichtgeschwindigkeit erreichen. Dabei betragen die Anfangsenergien einig 100 keV. Beim Strontium-90 beträgt diese z.B. 540 keV. Zur Ionisation eines Luftmoleküls werden pro Ion ca. 35 eV benötigt, so dass nach 15429 Stößen die Energie aufgebraucht ist. In Wasser ist damit die Reichweite nur einige mm, in Luft bis zu 2m. Anzumerken ist, dass die Anfangsenergie von  $\beta$ -Teilchen, bei gleichen Mutterkernen, unterschiedlich ist. Sie kann zwischen 0 und einem Maximum ( $E_{\max}$ ) liegen. Diese Erscheinung wird als **Beta-Spektrum** bezeichnet. In Tabelle 2.3.1 sind für einige Radionuklide die Werte zusammengefasst.

| Radionuklid  | Größte $\beta$ -Energie | Reichweite |        |
|--------------|-------------------------|------------|--------|
|              |                         | Wasser     | Luft   |
| Jod-131      | 606 keV                 | 2,3 mm     | 178 cm |
| Cäsium-137   | 514 keV                 | 2,0 mm     | 155 cm |
| Tellur-132   | 215 keV                 | 0,5 mm     | 39 cm  |
| Strontium-90 | 546 keV                 | 2.1 mm     | 163 cm |
| Yttrium-90   | 2.248 keV               | 10,65 mm   | 825 cm |
| Zirkon-95    | 398 keV                 | 1,7 mm     | 132 cm |
| Kalium-40    | 1.312 keV               | 5,9 mm     | 457 cm |

Tabelle 2.3.1  
Energie und Reichweite von  $\beta$ -Strahlen für einige Radionuklide

Im Gegensatz zu den  $\beta$ -Teilchen haben  $\alpha$ -Teilchen eines Mutterkerns immer dieselbe Startenergie. Sie besitzen also ein **Linienspektrum**, welches charakteristisch für das  $\alpha$ -strahlende Radionuklid ist. Für die verschiedenen Nuklide liegt der Wert zwischen 4 MeV und 8 MeV.

Bei 4 MeV haben  $\alpha$ -Teilchen nur eine Startgeschwindigkeit von ca.  $14 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  oder 4,6% der Lichtgeschwindigkeit. Bedingt durch ihre Größe, treffen  $\alpha$ -Teilchen bei der Wanderung durch die Gasmoleküle viel häufiger auf Hüllenelektronen als die kleinen  $\beta$ -Teilchen. Dadurch ist die zurückgelegte Wegstrecke auch sehr gering (Tabelle 2.3.2).

| Radionuklid | Energie in MeV | Reichweite in Luft |
|-------------|----------------|--------------------|
| Po-210      | 5,3            | 3,9 cm             |
| Ra-222      | 5,48           | 4,2 cm             |
| Ra-226      | 4,8            | 3,1 cm             |
| Th-232      | 4,0            | 2,5 cm             |
| U-233       | 4,8            | 3,3 cm             |
| U-235       | 4,4            | 2,9 cm             |
| U-238       | 4,2            | 2,7 cm             |
| Pu-239      | 5,1            | 3,6 cm             |
| Am-241      | 5,48           | 4,2 cm             |

Tabelle 2.3.2  
Energie und Reichweite von  $\alpha$ -Strahlen für einige Radionuklide

Bei den  $\gamma$ -Strahlen handelt es sich, wie bereits erwähnt, um Wellenstrahlen oder „Teilchen“, die nur aus Energie bestehen und keine Ladung sowie Masse bei der Energie Null (**Ruhemasse**) aufweisen. Im Gegensatz zu den beiden vorgenannten Strahlenarten kann ein Photon einen viel längeren Weg ohne Energieabgabe zurücklegen. Trifft es aber auf ein Hüllenelektron, gibt es seine ganze Energie ab und hört damit auf zu existieren (**Fotoeffekt**). Die Energie wird von dem Elektron übernommen, welches jetzt praktisch zu einem  $\beta$ -Teilchen wird. Alle weiteren Aktivitäten werden jetzt von diesem Sekundärelektron verursacht.

Bei den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen verringert sich mit zunehmenden Abstand vom Entstehungsort die Energie. Die Anzahl der Teilchen bleibt jedoch erhalten. Bei der  $\gamma$ -Strahlung hingegen nimmt mit zunehmendem Weg die Anzahl der Quanten ab. Alle Photonen die nicht auf ein Elektron treffen, behalten jedoch ihre Anfangsenergie. Für die Schwächung der  $\gamma$ -Strahlung ist die Dichte des durchstrahlten Stoffes maßgebend. Wenn die Strahlungsintensität auf die Hälfte reduziert ist, ist die **Halbwertsdicke** erreicht. Nach zwei Halbwertsdicken ist die Energie auf ein Viertel u.s.w. abgesunken. Mathematisch erfolgt die Abschwächung einem Exponentialgesetz. Je stärker ein Material  $\gamma$ -Strahlung absorbiert, um so kleiner (kürzer) wird die Halbwertsdicke. Tabelle 2.3.3 zeigt Halbwertsdicken für bestimmte Materialien in Abhängigkeit von der Quantenenergie.

Neben dem Fotoeffekt sind noch zwei weitere Effekte für die Schwächung von  $\gamma$ -Strahlen verantwortlich:

### Compton-Effekt

Das Photon gibt einen Teil seiner Energie durch einen Stoß mit einem Elektron ab und fliegt als energieärmeres Photon in eine andere Richtung weiter. Dieser Effekt wurde im Jahre 1922 von **A.H. Compton** an der Universität in Chicago entdeckt.

Ein  $\gamma$ -Strahl wird also beim Durchgang durch die Materie aufgefächert. Dies hat Konsequenzen bei der Energiemessung eines  $\gamma$ -Strahles. Neben der Primärenergie, hervorgerufen durch Fotoeffekte, ist noch eine „verwischte“ Energieverteilung mit niedrigeren Energien vorhanden, das **Compton-Kontinuum**.

| Halbwertsdicken in cm  |          |       |       |      |       |
|------------------------|----------|-------|-------|------|-------|
| Quanten-Energie in MeV | Material |       |       |      |       |
|                        | Wasser   | Beton | Eisen | Blei | Luft  |
| 0,1                    | 21,0     | 4,7   | 0,4   | 0,1  | 3700  |
| 0,2                    | 27,0     | 7,6   | 1,6   | 0,1  |       |
| 0,5                    | 28,8     | 12,4  | 2,6   | 0,5  | 6600  |
| 0,8                    | 28,1     | 12,7  | 3,1   | 1,0  |       |
| 1,0                    | 28,4     | 12,8  | 3,4   | 1,3  |       |
| 1,25                   | 29,4     | 13,1  | 3,6   | 1,6  |       |
| 1,5                    | 29,9     | 13,4  | 3,8   | 1,8  |       |
| 2,0                    | 31,1     | 14,5  | 4,1   | 2,0  | 12900 |

Tabelle 2.3.3  
Halbwertsdicken für bestimmte Materialien und verschiedenen Quantenenergien

### Paarbildung

Hier dringt das Photon bis in unmittelbare Kernnähe vor und wird bei genügend Energie (Masse) in ein Elektron und ein Positron materialisiert. Die Energie  $h \cdot f$  des Photons geht in die Ruhemassen zweier Elektronen, äquivalent der Energie

$$W_e = 2 \cdot m_e \cdot c^2$$

über. Es ergibt sich so die Energiesumme von

$$W_e = 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} = 16,4 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 1,02 \text{ MeV}$$

für die beiden Ruhemassen. Der Rest der Energie gibt beiden Teilchen zusammen die kinetische Energie  $W_{\text{kin}}$ . Die gesamte Energiebilanz lautet:

$$h \cdot f = 2 \cdot m_e \cdot c^2 + W_{\text{kin}}$$

Die Gleichung zeigt, dass Quanten mit einer Energie  $h \cdot f < 2 \cdot m_e \cdot c^2 = 1,02 \text{ MeV}$  kein Elektron-Positron-Paar erzeugen können, da sonst  $W_{\text{kin}}$  negativ sein müsste.

Die durch Paarbildung entstandenen Positronen reagieren sehr schnell mit Elektronen und bilden wieder Photonen. Die Ruhemassen  $2 \cdot m_e$  der beiden Teilchen verschwinden und gehen in die Energie  $W_e = 1,02 \text{ MeV}$  über. Bei dieser Zerstrahlung fliegen zwei Quanten mit halber Energie (511 keV) in entgegengesetzter Richtung weg. Im Energiespektrum wird die 511 keV-Linie als **Zerstrahlungs-Peak** sichtbar. Zwei gegenüberliegende Zählrohre registrieren gleichzeitig je einen  $\gamma$ -Impuls.

In Bild 2.3.4 sind die drei vorgenannten Effekte prinzipiell dargestellt.

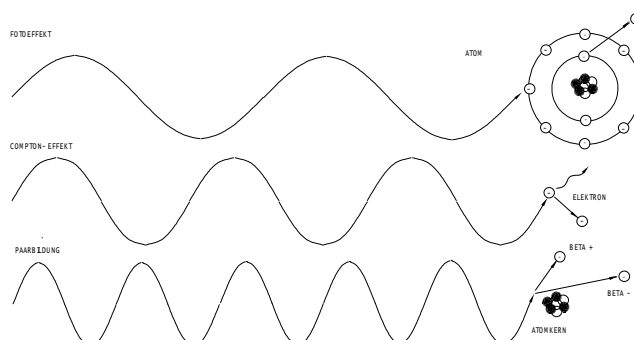


Bild 2.3.4  
Prinzipielle Darstellung der drei Effekte

## 2.4 Dosimetrie

Die Gesamtwirkung einer Strahlung auf eine Masse wird als **Strahlendosis** oder **Dosis** bezeichnet. Die zu ihrer Messung entwickelten Verfahren werden **Strahlungsdosimetrie** oder **Dosimetrie** genannt.

### Energiedosis

Die biologische Wirkung von ionisierenden Strahlen hängt von der Strahlungsenergie ab, die von einer bestimmten Masse absorbiert wird. Sie ist wie folgt definiert:

$$\text{Energiedosis } D = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie } W}{\text{Masse des bestrahlten Gewebes } m} \quad D = \frac{\Delta W}{\Delta m}$$

Die Einheit der Energiedosis ist **1 Gray**, benannt nach dem Briten **Louis Gray**.

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

In der Praxis ist es jedoch so, dass die verschiedenen Strahlungsarten auch unterschiedliche Ionisationsdichten in dem bestrahlten Gewebe bewirken. So erzeugt z.B. ein  $\alpha$ -Teilchen beim Durchqueren einer Zelle 10 000 bis 70 000 Ionenpaare, ein  $\beta$ -Teilchen dagegen nur 10 bis 100. Um die biologische Wirkung ionisierender Strahlung verschiedener Art in demselben Gewebe vergleichen (beurteilen) zu können, wird ein dimensionsloser **Qualitätsfaktor Q** eingeführt. Das Produkt aus  $Q \cdot D$  ergibt die **Äquivalentdosis H**.

$$H = Q \cdot \dot{D}$$

Der Faktor Q charakterisiert die Ionisationsdichte einer Strahlung.  $Q = 1$  ist bezogen auf eine Röntgenstrahlung mit 200 keV.

Für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung ist Q ebenfalls 1, für  $\alpha$ -Strahlung ist  $Q = 20$ .

Zur Unterscheidung der messbaren Energiedosis D hat man der Äquivalentdosis H die Einheit

$$1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

gegeben. Die frühere Bezeichnung hierfür war das Rem (roentgen equivalent man) mit  $1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$ . Treffen nun z.B. zwei Strahlenarten gleichzeitig auf ein Gewebe, so kann die Wirkung durch die Äquivalentdosen richtig beurteilt werden.

**Beispiel:** Bei einer Röntgenuntersuchung mit einer mittleren Strahlendosis von 30 mGy ( $Q = 1$ ) tritt eine Äquivalentdosis von 30 mSv auf. Dagegen bewirkt die gleiche Energiedosis einer  $\alpha$ -Strahlung ( $Q = 20$ ) eine Äquivalentdosis von 600 mSv.

### Dosisleistung

Unter **Dosisleistung** versteht man die pro Zeiteinheit absorbierte Energiedosis. Sie wird in Gy/s bzw. Sv/s (Äquivalentdosisleistung) angegeben.

$$\dot{D} = \text{Gy s}^{-1}; H = \text{Sv s}^{-1}$$

Eine herrschende Dosisleistung von z.B.  $0,2 \text{ Sv h}^{-1}$  ergibt pro Jahr mit 8760 h eine Äquivalentdosis von:

$$H = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} \cdot 8760 \text{ h} = 1752 \text{ } \mu\text{Sv} = 1,75 \text{ mSv}$$

Der vorgenannte Wert von  $H = 0,2 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$  ist bei uns in etwa die **natürliche Strahlenbelastung**. Diese setzt sich wie folgt zusammen:

### Terrestrische Strahlung

Sie stammt aus radioaktiven Stoffen (z.B. U-238, Ra-226, K-40), die in unserer Erde vorhanden sind. Der Anteil an der natürlichen Strahlenbelastung beträgt ca. 20%.

### Kosmische Strahlung

Sie stammt aus dem Weltraum und nimmt mit der Höhe zu. Bei einem Flug in 10 000 m Höhe wurden  $1,8 - 2,4 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$  gemessen. Der Anteil beträgt ca. 15%.

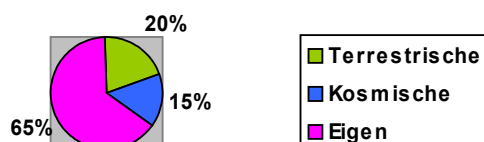
### Eigenstrahlung des Körpers

Stammt von radioaktiven Nukliden im Körper (z.B. K-40, Ra-226, Rn-222). Die größte Belastung geht dabei von Radon 222, einem geruchlosen Edelgas, aus. Es entsteht aus Radium-226 (Uran  $\rightarrow$  Radiumzerfall) und ist ein  $\alpha$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von  $T_{1/2} = 3,83$  Tagen. Rn-222 findet sich überall dort, wo Uran im Erdboden vorhanden ist. Es sammelt sich vor allem in Höhlen und Kellerräumen von Gebäuden. Im Durchschnitt wird jeder Mensch in Deutschland jährlich mit etwa 1,4 mSv belastet. Der Anteil im Freien beträgt hiervon nur ca. 0,2 mSv. Die Belastung stellt eine besondere Gefahr für die Atemwege dar. Der Gesamtanteil der Eigenstrahlung an der natürlichen Strahlenbelastung liegt bei ca. 65%.

Die natürliche Strahlenbelastung beträgt bei uns ca. 1,5 – 2 mSv pro Jahr. Hinzu kommt noch die Belastung durch künstliche Strahlung von ca. 1 mSv, vorwiegend durch Röntgendiagnostik und radioaktiven Stoffen

der Medizin. Die Strahlenbelastung durch Atom – und Kohlekraftwerke sowie sonstige Verwendung von ionisierender Strahlung in Forschung und Technik mit ca. 0,04 mSv a<sup>-1</sup> kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

### Natürliche Strahlenbelastung in Prozent



**(20% Terrestrische Strahlung, 15% Kosmische Strahlung, 65% Eigen Strahlung)**

Die vorgenannten Belastungswerte beziehen sich immer auf eine **Ganzkörperbestrahlung** des Menschen. In der Äquivalentdosis sind die Unterschiede der einzelnen Strahlungsarten berücksichtigt. Damit allein kann jedoch noch nicht beurteilt werden, wie sich radioaktive Strahlung auf biologische Gewebe auswirkt. Wird ein Mensch einer schwachen radioaktiven Strahlung ausgesetzt, so werden Gewebezellen mit unterschiedlichem Aufbau bestrahlt, z.B. Leberzellen, Darmzellen, Schilddrüsenzellen usw. Der unterschiedliche Aufbau der Zellen bedingt eine unterschiedliche Strahlungsempfindlichkeit. Dies wird durch die **effektive Äquivalentdosis** berücksichtigt. Hierzu werden die Äquivalentdosen der einzelnen Organe mit einem Faktor  $w_i$  gewichtet. Die effektive Äquivalentdosis  $H_{\text{eff}}$  ergibt sich dann als Summe über die gewichteten Äquivalentdosen  $w_i \cdot H_i$ . Die Summe über alle Gewichtungsfaktoren  $w_i$  muß gleich 1 sein.

Es gilt:

$$H_{\text{eff}} = \sum w_i \cdot H_i$$

Hierin sind:  $w_i$  = Gewichtungsfaktor des Organs i und  
 $H_i$  = Äquivalentdosis im Organ i.

In Tabelle 2.4.1 sind die wichtigsten Gewichtungsfaktoren angegeben.

| Organ/Gewebe      | Gewichtungsfaktor |
|-------------------|-------------------|
| Gonaden           | 0,2               |
| Brust             | 0,05              |
| rotes Knochenmark | 0,12              |
| Lunge             | 0,12              |
| Schilddrüse       | 0,05              |
| Knochenoberfläche | 0,01              |
| Magen             | 0,12              |
| Leber             | 0,05              |
| Blase             | 0,05              |
| Haut              | 0,01              |
| Übrige            | 0,22              |
| <b>Summe</b>      | <b>1</b>          |

Bild 2.4.1  
Gewichtungsfaktoren

Der Gewichtungsfaktor des Magens ist 0,12. Einer Dosis, welche mit  $H = 1$  Sv auf den Magen einwirkt, entspricht demnach der effektiven Äquivalentdosis  $H_{\text{eff}} = 120$  mSv.

Ist also eine einzelne Person einer schwachen Ganzkörperbestrahlung ausgesetzt, so kann man mit der effektiven Äquivalentdosis die gesamte Strahlengefährdung beurteilen.

Zur besseren Veranschaulichung sind nachfolgend einige Dosiswerte zusammengestellt.

#### Werte aus der Natur

- Leben in 1900 m Höhe:  $0,68 \text{ mSv a}^{-1}$  (zusätzlich)
- Flugzeugpilot:  $5 \text{ mSv a}^{-1}$  zusätzlich bei 480 Flugstunden pro Jahr
- Terrestrische Strahlung:  $15 \text{ mSv a}^{-1}$  in einigen Gebieten des Schwarzwaldes
- Gesamtdosis einer Radonkur in Gastein: 2,3 mSv
- Beschäftigte in einem Radiumbad:  $8,2 \text{ mSv a}^{-1}$

#### Zivilisatorische Belastungen

- In der Nähe von Atomkraftwerken:  $10 - 50 \mu\text{Sv a}^{-1}$
- Rauchmelder; Leuchtuhren:  $0,1 \text{ mSv a}^{-1}$
- Fernsehen:  $1 - 30 \mu\text{Sv a}^{-1}$
- Castor in 2 m Entfernung:  $20 - 70 \mu\text{Sv h}^{-1}$  (offizielle Angaben)
- Castoroberfläche:  $0,24 \text{ mSv h}^{-1}$

#### Medizin

- Strahlentherapie: 0,01 mSv (über Bevölkerung gemittelt)
- Schilddrüsenbestrahlung:  $100 \text{ Sv/Organ} = 0,2 \text{ Sv Gesamtkörperdosis}$
- Mammographie:  $15 - 65 \text{ mSv Brustgewebedosis}$  je nach Technik pro Aufnahme
- Schädelaufnahme: 4,1 mSv

## 2.5 Strahlenschäden

#### Sofortschäden

Eine kurzfristige Ganzkörperbestrahlung von über 7 Sv führt nach wenigen Tagen zum Tod. Je nach Gewebe und Zeitdauer der Bestrahlung treten bei  $0,25 - 1$  Sv Appetitlosigkeit, Haarausfall und Übelkeit auf. Unterhalb dieser Grenze sind Sofortschäden nicht festzustellen.

#### Stochastische Schäden (Leukämie, Krebs)

Diese Schäden treten sowohl nach einer einmaligen hohen Dosis als auch nach einer längeren schwachen Strahlenbelastung auf. Als Spätschäden kommen sie oft erst nach Jahren oder Jahrzehnten zum Vorschein. Das Risiko an Leukämie oder Krebs zu erkranken – nicht die Schwere einer möglichen Erkrankung – steigt mit wachsender Dosis.

Durch Untersuchungen von Menschen, die starken Strahlenbelastungen ausgesetzt sind (z.B. Uranbergarbeiter, Atombombenüberlebende in Japan), vermutet man heute, dass die natürliche Strahlenbelastung von  $1,5 - 2 \text{ mSv a}^{-1}$  etwa 1% der Krebsfälle verursacht.

#### Genetische Strahlenschäden

Die beiden vorgenannten Schäden treten bei den bestrahlten Personen selbst auf (somatische Schäden). Genetische Schäden wirken sich erst bei Nachkommen aus.

Sie werden von Mutationen verursacht, die in den Keimzellen der Gonaden ausgelöst worden sind. Sie treten ebenfalls stochastisch auf.

Genmutationen wirken sich bei den Nachkommen aus, wenn von beiden Elternteilen jeweils die gleiche Genveränderung zusammentrifft. Das genetische Strahlenrisiko liegt demnach deutlich unter dem Krebsrisiko.



### 3. Messung radioaktiver Strahlung

Nachdem die radiologischen Größen und Einheiten bekannt sind, wird nachfolgend gezeigt, wie in der Praxis  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen gemessen werden können. Dabei wird der Schwerpunkt auf Messungen mit dem Geiger-Müller-Zählrohr gelegt, da Geräte mit diesem Detektor auf dem Markt sehr verbreitet sind. Bevor auf die spezifischen Eigenschaften des GM-Zählrohrs eingegangen werden kann, sollen vorher noch einige physikalische Grundüberlegungen angestellt werden.

#### 3.1 Leitung in Gasen

Unter normalen Bedingungen sind Gasmoleküle elektrisch neutral und werden somit nicht von den Polen einer Spannungsquelle angezogen. Erst durch die Zuführung einer **Ionisationsenergie** kann es zu einem Stromfluss kommen. Wird an einen mit Gas gefüllten Zylinder, der mit zwei Elektroden versehen ist, eine veränderbare Spannung gelegt, so ergibt sich bei einer bestimmten radioaktiven Bestrahlung eine Kennlinie entsprechend Bild 3.1.1.

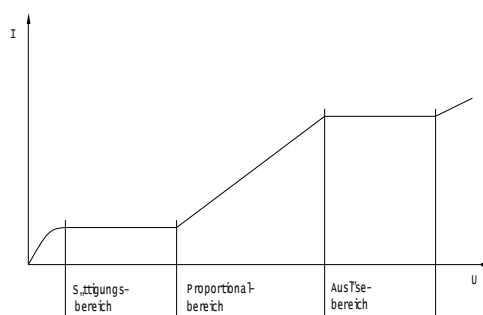


Bild 3.1.1  
I(U)-Kennlinie eines gasgefüllten Zylinders

Durch die Bestrahlung werden die zunächst neutralen Moleküle des Gases ionisiert, d.h. in ein oder mehrere Elektronen und den positiv geladenen Rest, also in Ion bzw. Ionen, zerlegt. Wird nun eine Spannung angelegt und damit ein elektrisches Feld erzeugt, so wandern die Elektronen zur positiven und die positiv geladenen Edelgasionen ( $\text{He}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,...) zur negativen Elektrode des Zylinders. Es fließt ein Strom, bis keine Ionen mehr vorhanden sind. Durch die radioaktive Bestrahlung entstehen jedoch immer neue Ionen, und es stellt sich ein dauernder Strom ein. Nicht alle Elektronen und Ionen gelangen zu den Elektroden, da viele von ihnen bereits auf dem Weg dorthin **rekombinieren** und wieder neutrale Moleküle bilden.

Die Rekombination erfolgt aber nur, solange die Elektronen im elektrischen Feld nicht zu schnell geworden sind. Wird die Feldstärke erhöht, dann gelangen schließlich fast alle Ionen und Elektronen die gebildet wurden, zu den Elektroden. Die Stromstärke wird dann nur noch von der absorbierten Dosisleistung bestimmt (**Sättigungsbereich der Kennlinie**).

Wird die elektrische Feldstärke weiter erhöht, dann werden die Moleküle so energiereich, dass sie selber weitere Moleküle ionisieren (Stoßionisation). Jedes von einfallender Strahlung gebildetes Ionenpaar bildet eine bestimmte Anzahl von weiteren Ionenpaaren, es findet eine Verstärkung statt (**Proportionalitätsbereich**).

Bei weiterer Erhöhung der Feldstärke reicht schließlich schon ein einziges ionisiertes Paar, um nach einer Kettenreaktion das gesamte Gasvolumen zu ionisieren (**Auslösebereich**). Nach einer solchen Entladung vergeht eine gewisse Zeit, bis die Ionisation abgeklungen ist. Erst dann kann ein weiteres ionisierendes Ereignis eine Entladung auslösen. Diese Zeit wird als **Totzeit** bezeichnet.

Die gebräuchlichen Messverfahren für ionisierende Strahlung verwenden Ionisationskammern oder Zählrohre als Detektoren. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 3.1.2 dargestellt.

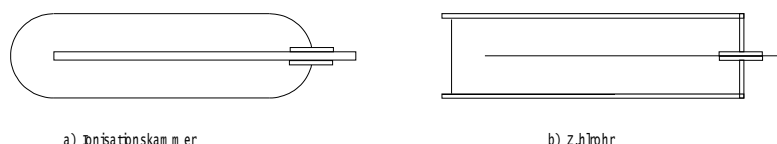


Bild 3.1.2  
 Prinzipieller Aufbau von a) Ionisationskammer und b) Zählrohr

### Ionisationskammern

Die Ionisationskammern arbeiten im Sättigungsbereich. Die von der äußeren Elektrode gebildete Kammer ist mit Luft gefüllt. Der durch die Anordnung fließende Strom ist ein Maß für die je Zeiteinheit gebildeten Ionenpaare und damit für die Dosisleistung. Für  $\beta$ -Strahlung lassen sich Dosisleistungen zwischen  $10^{-5} \text{ Gy h}^{-1}$  und  $10^3 \text{ Gy h}^{-1}$  messen.

Solche Ionisationskammern haben ein Fenster, welches für  $\beta$ -Strahlung durchlässig ist.

### Zählrohre

Der Zählrohrzylinder besteht aus Metall oder Glas mit aufgebrachter Metallkathode mit einem Durchmesser von einigen Zentimetern. Ein Wolfram- oder Eisendraht von ca. 0,05 mm Durchmesser bildet die Anode. Als Füllung wird Argon oder Helium mit Methan-Zusatz verwendet. Für die Messung von  $\alpha$ - und energiearmen  $\beta$ -Strahlen muß der Zylinder an einem Ende mit einem „Fenster“ aus Nylon oder Mylar-Folie versehen sein, welches für diese Strahlenart durchlässig ist.

Im Gegensatz zur Ionisationskammer arbeiten Zählrohre mit „Gasverstärkung“. Es wird nicht der hindurchfließende Strom, sondern die zwischen Anode und Kathode liegende Spannung als Indikator für die ionisierende Strahlung gemessen (Bild 3.1.3).

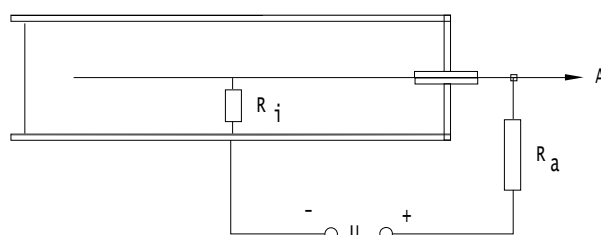


Bild 3.1.3  
 Prinzipschaltung eines Zählrohrs

Ohne radioaktive Strahlung liegt am Punkt A die volle positive Spannung, da der Widerstand  $R_i$  sehr hochohmig ist.  $R_i$  ist nicht als realer Widerstand vorhanden, sondern wird durch das mehr oder weniger leitende Gas gebildet. Ionisierende Strahlung verringert diesen Widerstand, so dass an A negative Impulse entstehen.

Die Arbeitsweise des Zählrohrs wird von der Betriebsspannung bestimmt. Im Sättigungsbereich arbeitet ein Zählrohr wie eine Ionisationskammer. Dieser Bereich wird deshalb als **Ionisationskammer-Bereich** bezeichnet. Da  $\alpha$ -Teilchen wesentlich höhere Impulshöhen liefern als  $\beta$ -Teilchen und  $\gamma$ -Quanten, kann eine Unterscheidung dieser Strahlungsarten erfolgen.

**Proportionalitäts-Zählrohre** arbeiten im Proportionalbereich. Die bei entsprechender Betriebsspannung von der Strahlung durch die Stoßionisation ausgelösten Sekundärelektronen bewirken eine „**Gasverstärkung**“ mit einem Verstärkungsfaktor von bis zu  $10^6$ , so dass Spannungsimpulse bis zu 1 mV entstehen. Die Anzahl der Sekundärelektronen und damit die Impulshöhe ist proportional der Energie der einfallenden Teilchen. Die Auswertung der Impulshöhen bedingt eine sehr konstante Betriebsspannung.

Stark ionisierende  $\alpha$ -Teilchen liefern im Gegensatz zu  $\beta$ -Teilchen und  $\gamma$ -Quanten große Impulshöhen. Die nachgeschaltete Messelektronik lässt sich so einstellen, dass nur Impulse einer bestimmten Höhe

diskriminiert werden. Auf diese Weise kann bei Messungen die kosmische Höhenstrahlung und der von der natürlichen Radioaktivität ausgelöste Nulleffekt ausgeblendet werden.

**Geiger-Müller-Zählrohre** werden im Auslösebereich betrieben. Die durch Strahlung freigesetzten Elektronen werden in das sehr starke Feld in Anodennähe (Feldstärken über  $10^5 \text{ V m}^{-1}$ ) gezogen und lösen lawinenartig eine in radialer Richtung zur Anode gerichtete Stoßionisation und damit eine Gasentladung aus. Diese breitet sich sofort längs des Anodendrahtes als Photoionisation aus und hüllt ihn ein. Die freigesetzten Elektronen werden wegen ihrer geringen Masse sehr schnell zur Anode gezogen und neutralisieren diese. Die trägen positiven Ionen bilden eine positive Raumladung um die Anode, die relativ langsam (in etwa  $10^{-4} \text{ s}$ ) zur negativ geladenen Zählrohrwand (Katode) wandert. Da nun die Feldlinien nicht mehr an der Anode sondern an der positiven Raumladung beginnen, wird das Gebiet um die Anode kurzzeitig feldfrei. Das Zählrohr spricht während dieser Zeit (**Totzeit**) nicht auf weitere radioaktive Strahlung an. In Bild 3.1.4 sind diese Vorgänge prinzipiell dargestellt.

Die durch ein ionisierendes Teilchen ausgelöste Entladung wird durch Zusätze von Alkoholdampf oder Halogengasen zum Füllgas (Edelgas mit etwa  $100 \text{ hPa} = 0,1 \text{ bar}$  Druck) wieder gelöscht, so dass das Zählrohr möglichst rasch auf das nächste Teilchen ansprechen kann. Diese Zusätze haben die Eigenschaft, die Photonen zu absorbieren, während sie selbst dabei zu niederatomigen Kohlenwasserstoffen abgebaut werden. Dieser Abbau kann wegen der beschränkten Menge des Dampfzusatzes nicht beliebig lange erfolgen. Die Zählrohre haben daher eine begrenzte Lebensdauer. Eine wesentliche Erhöhung der Lebensdauer ergeben gewisse Halogenzusätze, welche die Eigenschaft haben, nach Dissoziation (Elektronenstoß) sich wieder zu regenerieren. Die heute verwendeten Zählrohre haben eine Mindestlebensdauer von  $10^{10}$  Zählungen  $\approx 10\,000$  Stunden.

Halogenzählrohre weisen allgemein gute Eigenschaften auf. Außer den Eigenschaften

- selbsttätige Löschung
- lange Lebensdauer

kommt noch hinzu:

- eine relativ niedrige Zählrohrspannung
- eine weitgehende Temperaturunempfindlichkeit

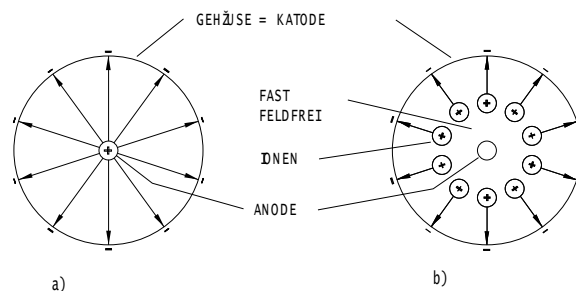


Bild 3.1.4  
Geiger-Müller-Zählrohr a) vor der Ionisation und b) nach der Ionisation

### 3.2 Geiger-Müller-Bereich und Auflösung

Wie bereits erwähnt, löst bei dieser Betriebsart jedes primäre Ionisationsereignis, gleich welcher Ursache und Stärke, stets eine Ionisation im ganzen Zählrohr aus.

Trägt man, für eine im Mittel konstante Strahlungsquelle, die Anzahl der auftretenden Impulse als Funktion der Zählrohrspannung  $U_a$  in ein Diagramm ein, so erhält man die typische Kennlinie für ein GM-Zählrohr (Bild 3.2.1).

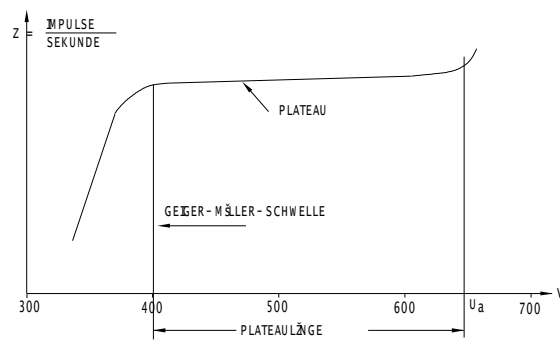


Bild 3.2.1  
Kennlinie eines GM-Zählrohres

Die Zahl der im Mittel pro Sekunde bzw. Minute zählbaren Teilchen ist hauptsächlich durch folgende Eigenschaften begrenzt:

- Auflösungsvermögen der nachgeschalteten Elektronik ( Verstärker, Registriereinheit)
- Auflösungsvermögen des Zählrohres

Vorausgesetzt, dass die Elektronik heute keine Probleme mehr bereitet, bestimmt das Zählrohr selbst die Auflösung. Die Zusammenhänge sind in Bild 3.2.2 dargestellt.

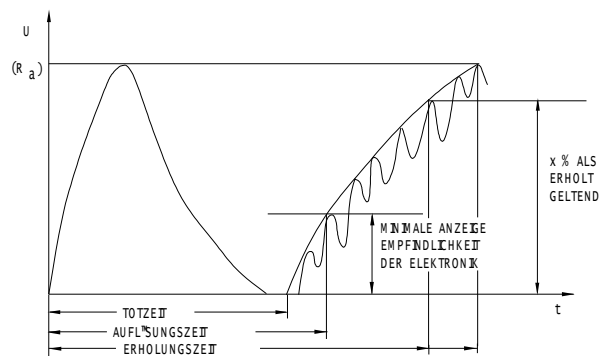


Bild 3.2.2  
Auflösungsverhalten

Als **Totzeit** ist die Zeit definiert, nach welcher ein folgender Auslösevorgang im Zählrohr sich erst wieder als Lawine bemerkbar machen kann.

Unter **Auflösungszeit** versteht man die Zeit, nach der ein folgender Impuls die Empfindlichkeitsgrenze der Elektronik erreicht. Diese Zeit gehört nicht zu den Kenndaten des Zählrohres, da sie von der Ansprechempfindlichkeit des Verstärkers abhängig ist.

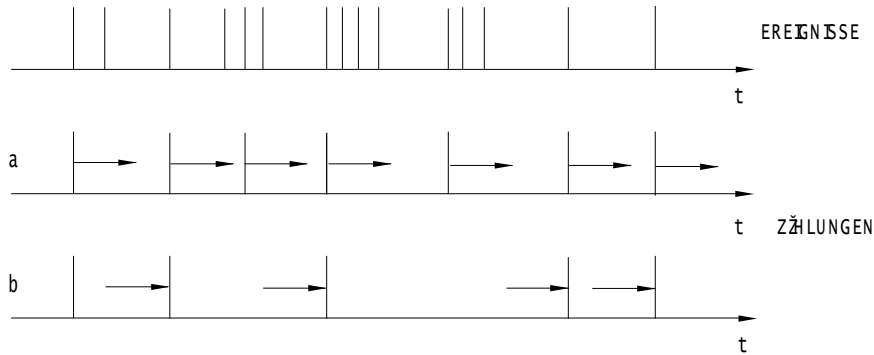


Bild 3.2.3  
Auflösung und Ansprechwahrscheinlichkeit

Die Registrierung der einfallenden Teilchen im Zählrohr ist zum einen abhängig von Totzeit (Zählung a.) und zum anderen von der Ansprechwahrscheinlichkeit A (Zählung b.)

Die Ansprechwahrscheinlichkeit für  $\alpha$  - und  $\beta$  - Strahlung ist wie folgt definiert:

$$A = \frac{\text{Anzahl der vom Zählrohr registrierten Teilchen}}{\text{Anzahl der ins Zählrohr einfallenden Teilchen}}$$

Die Ansprechwahrscheinlichkeit für  $\gamma$  - Quanten

$$A = \frac{\text{Anzahl der vom Zählrohr registrierten } \gamma\text{-Quanten}}{\text{Anzahl der ins Zählrohr einfallenden } \gamma\text{-Quanten}}$$

Die **Erholungszeit** gibt an, wie lange ein Zählrohr braucht, bis die in der unmittelbaren Umgebung des Drahtes entstandenen Ionen an die Kathode abgewandert sind. Während dieser Zeit bleibt das Zählrohr gegen neue Entladungsstöße unempfindlich. Die Erholungszeit liegt in der Größenordnung von ca.  $10^{-4}$  s.

### 3.3 Prinzipieller Aufbau eines Geiger - Müller - Zählers

Das nachfolgende Blockschaltbild zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Geiger - Müller - Zählers wie er als Handgerät üblicherweise im Handel erhältlich ist.

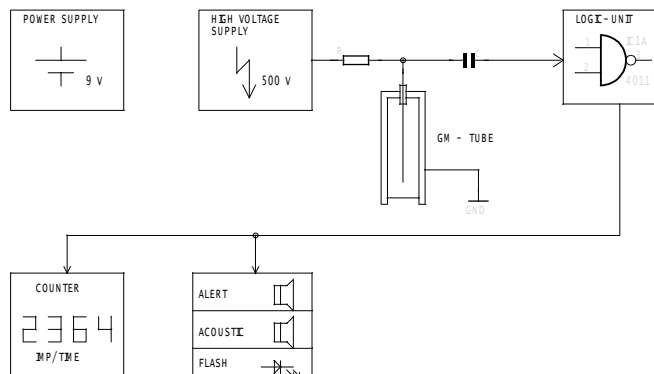


Bild 3.3.1  
Blockschaltbild des Geiger - Müller - Zählers

Die Funktionsblöcke unterteilen sich wie folgt:

1. Versorgungsspannung meist 9 V Blockbatterie oder Akku
2. Hochspannungsteil zur Versorgung des Zählrohres
3. GM - Zählrohr
4. Elektronik zur Auswertung der Impulse (Logic - Unit)
5. Einzelimpulszähler oder LCD - Anzeige
6. Elektronik für die akustisch - optische Anzeige

### 3.4 Ausführung mit Bedienelementen eines GM – Messgerätes (MR95 11/15)



Bild 3.4.1  
Messgerät Geiger - Müller – Zähler MR 9511/15 (LS – Systemtechnik GmbH)

### 3.5 Beschreibung des Messgerätes MR9511/15

#### Allgemeine Gerätebeschreibung

Das Gerät MR 9511/15 ist ein leistungsfähiges Taschengerät zum Nachweis und zur Messung radioaktiver Strahlen.

Die moderne Elektronik entspricht dem Stand heutiger Anforderungen und garantiert eine hohe Messgenauigkeit, die bislang nur von wesentlich teureren Geräten erreicht wird.

Das Gerät arbeitet mit einer 9V Blockbatterie und ist deshalb an jedem Ort sofort einsatzbereit. Ein eingebauter Alarmsignalgeber signalisiert lautstark, wenn der eingestellte Grenzwert überschritten wird, so dass das Gerät auch zur Dauerüberwachung in strahlengefährdeten Bereichen und Labors eingesetzt werden kann.

Das Eintrittsfenster für das Zählrohr befindet sich oben am Gerät auf der linken Seite. Als Strahlendetektor wird ein empfindliches Endfensterzählrohr verwendet. Es reagiert auf Alpha-, Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlung. Die Strahlenarten lassen sich in vielen Fällen durch Abschirmung des Eintrittsfensters mit Hilfe geeigneter Materialien wie Papier, Aluminium, etc. unterscheiden.

Jeder einzelne Kernzerfall wird optisch und akustisch angezeigt. Die einzelnen Zerfälle können mittels der Start/Stop-Funktion gezählt und auf dem LCD-Display angezeigt werden. Hierbei wird die Zähldauer mit den

Tasten START/STOP bestimmt. Beim MR9511 haben wir zwei Signalausgänge an einer 3,5mm Stereo-Klinkenbuchse. Diese dienen zum Anschluss von Zusatzgeräten wie z.B. Schreiber, Analog/Digital-Messgerät und externer Alarmschluss.

### Inbetriebnahme des Geräts

Vor Inbetriebnahme muss das Gerät mit dem Batterieclip an eine 9 V Blockbatterie angeschlossen werden.

**Bitte verwenden Sie möglichst Alkali/Mangan – Batterien (IEC 6F22).**

Das Batteriefach wird zugänglich, wenn der obere schwarze Deckel (Frontplatte) des Geräts abgehoben wird. Gehen Sie bitte hierzu wie folgt vor:

- b) Das Gerät mit der rechten Hand so fassen, dass Zeige – und Mittelfinger auf die Fläche neben der Handschlaufe zu liegen kommen.
- c) Mit Zeige – und Mittelfinger Druck auf den Mittelpunkt dieser Fläche ausüben und dabei den Deckel mit der linken Hand in der Mitte der Oberkante fassen und abziehen.

Beim Schließen des Deckels wird dieser vorsichtig aufgesetzt und mit leichtem Druck auf den oberen und unteren Rand eingerastet.

Das Gerät wird mit der Taste ON eingeschaltet. Zur Kontrolle der Funktion ertönt das Alarmsignal für die Dauer von ca. 3 Sekunden, außerdem erscheint auf dem LCD – Display eine „0“. Das Alarm – Kontrollsignal verhindert, dass das Gerät unbeabsichtigt eingeschaltet wird und sich hierdurch die Batterie entleert.

Wenige Sekunden nach dem Einschalten ist in unregelmäßigen Zeitabständen (1-10 sec.) ein LED-Blitz sichtbar und ein Piep hörbar. Dies ist die optische und akustische Anzeige für einen Kernzerfall.

Ist das Gerät noch keiner direkten Strahlung ausgesetzt, werden diese Impulse durch die Hintergrundstrahlung (Nulleffekt) hervorgerufen. Der Nulleffekt wird durch statistisch verteilte Zerfälle terrestrischen- und kosmischen Ursprungs hervorgerufen. Hierbei handelt es sich um die natürliche Umweltradioaktivität.

Ein Druck auf die START-Taste startet den Impulszähler. Der Druck auf die STOP-Taste beendet den Zählvorgang und hält den Wert im LCD-Display fest. Die Rückstellung auf Null erfolgt mit der RESET-Taste. Mit der OFF-Taste wird das Gerät abgeschaltet und die LCD-Anzeige erlischt.

### Alarmfunktion

Durch das auf der linken, oberen Seite befindlichen 2,5mm Loches kann mittels eines Schraubendrehers der Grenzwert des Alarmgebers eingestellt werden. In der Drehrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn ist die Einstellung am empfindlichsten und löst den Alarm schon bei geringer Überschreitung der natürlichen Umweltradioaktivität aus.

Die Mittelstellung hat ca. das 50 – fache und die Endstellung ( im Uhrzeigersinn) ca. das 100 – fache der natürlichen Umweltradioaktivität.

Wird der eingestellte Grenzwert überschritten, so wird der Alarmsignalton ausgelöst. Beim Abfall der Strahlung unter den eingestellten Grenzwert schaltet der Alarm mit einer Verzögerung von 3 Sekunden wieder ab.

Die genaue Einstellung auf einen Grenzwert kann mittels eines geeigneten Prüfstrahlers vorgenommen werden.

### Quantitative Messung

Die Daten des Zählrohres beziehen sich auf Messungen in physikalisch definierter Umgebung. Die Zählrate des Nulleffekts ist ein stochastischer Prozess und somit Schwankungen unterworfen. Man kann also von einem Kern nicht sagen , wann er zerfällt , sondern nur wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß er in einer gewissen Zeitspanne zerfällt. Bei der Messung des Nulleffekts spielt auch die geografische Lage eine Rolle, denn je nach Standort können die Meßwerte unterschiedlich ausfallen.

Die genauen Strahlenwerte können beim Bundesamt für Strahlenschutz angefordert werden.

### Messung schwach radioaktiver Objekte

Zum Nachweis und zur Messung schwach radioaktiver Objekte wird das Gerät so gehalten, daß das Fenster des Zählrohrs dem zu messenden Objekt zugewandt ist. Durch Auszählen der Impulse pro Zeiteinheit kann die Dosisleistung ermittelt werden.

### Definition:

$$\text{Ortsdosisleistung(m rem/h)} = \frac{\text{Imp/min}}{\text{Dosisempfindlichkeit}}$$

- Dosisempfindlichkeit MR 9511/15 = 1880
- 100 rem/h entspricht 1 Sv/h ( 1 m rem/h entspricht 0,01 mSv/h)

**Strahlenmessungen im Sinne der gesetzlichen Bestimmungen sind nur mit amtlich geeichten Geräten zulässig (s. Strahlenschutzverordnung).**

### Messung stärkerer radioaktiver Objekte

Wenn der Anzeigebereich des Geräts überschritten wird, so kann zunächst keine Aussage über die tatsächliche Höhe der Strahlungsintensität gemacht werden. Doch auch in diesem Fall ist eine Messung möglich.

Das Messgerät wird hierbei soweit vom zu messenden Objekt entfernt, bis der Anzeigebereich nicht mehr überschritten wird. Unter der Voraussetzung, daß das Meßobjekt klein ist im Vergleich zum Meßabstand, kann über das Abstandsgesetz die Strahlenintensität abgeschätzt werden.

Nach dem Abstandsgesetz verringert sich die Strahlungsintensität von annähernd punktförmigen Strahlungsquellen mit dem Quadrat zur Entfernung (im halben Abstand herrscht die vierfache Dosis). Dieses Verfahren gewährleistet auch einen gewissen Schutz der Person, da diese sich nicht in unmittelbarer Nähe der Strahlenquelle aufhalten muss.

### Technische Daten

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Das Gerät ist eichfähig</b> | Eichung durch autorisierte Stellen wie z.B. das Eichamt  |
| <b>Display:</b>                | 8-digit LCD (7-segment display)  |
| <b>Einzelimpulsanzeige:</b>    | LED-flash, Kontrollton   |
| <b>Strahlendetektor:</b>       | GM - Fensterzählrohr, selbstlöschend, eichfähig  |
| <b>Strahlenart:</b>            | Alpha-radiation von 3,5 MeV<br>Beta-radiation von 50 KeV<br>Gamma-radiation von 2,5 KeV  |
| <b>Dosisempfindlichkeit:</b>   | 1880 Imp/min at 0,01 mSv / h (1 mR/h) Cs137  |
| <b>Nulleffekt:</b>             | < 7 Imp/min<br>(hinter 5 cm Pb + 0,3 cm Al)  |
| <b>Lebensdauer:</b>            | > 6 x 10 <sup>10</sup> Imp   |
| <b>Alarmgrenze:</b>            | von außen einstellbar. 1µSv/h bis 20 µSv/h<br>(0,1 m rem/h bis 2 mR/h)<br>Anzeige durch Intervallton 100 db/20 cm ca. 4000 Hz. |
| <b>Stromversorgung:</b>        | 9 V Blockbatterie  |
| <b>Stromaufnahme:</b>          | 2-3 mA   |
| <b>Spannungskontrolle:</b>     | Dauerton bei U <sub>Batt</sub> < 7 Volt  |
| <b>Signalausgänge:</b>         | s. Skizze im Anhang  |
| <b>Gehäuse:</b>                | Kunststoff, schlagfest   |
| <b>Abmessungen:</b>            | 155 x 72 x 42 mm   |
| <b>Gewicht:</b>                | 250 g incl. 9 V -Batterie  |
| <b>Garantie:</b>               | 1 Jahr, das Zählrohr ist ausgeschlossen  |



### 3.6 Beispiele zur Messung radioaktiver Substanzen

#### Quantitative Messung

Nachfolgend wird eine Messung durchgeführt, bei welcher eine Aussage über die Strahlungsintensität einer radioaktiven Quelle gemacht werden kann. Der Messaufbau ist in Bild 3.6.1 dargestellt.

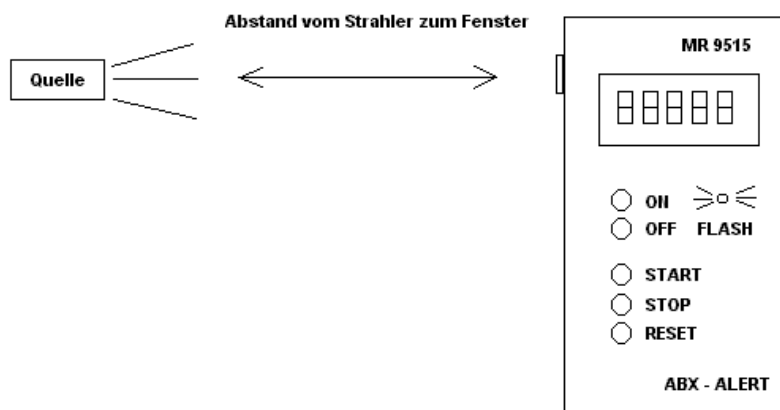


Bild 3.6.1  
Messaufbau zur quantitativen Messung

Zuerst wird die Hintergrundstrahlung (Nulleffekt), welche ortsabhängig ist, gemessen. Hierzu wird das Gerät eingeschaltet und durch drücken der START – Taste die Impulszählung gestartet. Die Zählzeit  $t$ , sollte bei schwach radioaktiven Quellen mindestens 1 Minute betragen. Nach Ablauf der Zeit  $t$  wird die Messung mit der STOP – TASTE beendet. Der im Display angezeigte Wert entspricht nun den natürlichen Zerfällen pro Zeiteinheit  $t$ .

#### Beispiel:

In der Zeit  $t = 1$  Minute wurden 36 Impulse gezählt.  
Aus dieser Messung können nun folgende Werte bestimmt werden:  
Bestimmung der Aktivität: 36 Imp/min geteilt durch 60 s ergibt 0,6 Bq

Bestimmung der Ortsdosisleistung:

$$\text{Ortsdosisleistung (m rem/h)} = \frac{\text{Imp/min}}{\text{Dosisempfindlichkeit}}$$

36 Imp/min geteilt durch 1880 ( Dosisempfindlichkeit des Zählrohres) ergibt  $19,148 \times 10^{-3}$  m rem/h.  
( 0,019148 m rem/h)

In Sivert ergibt dies einen Wert von 0,019148 m rem/h geteilt durch 100 ergibt 0,191  $\mu\text{Sv/h}$ .

Nun wird eine Strahlenquelle im Abstand von 10 cm zum Zählrohr entfernt aufgestellt.  
Die hier benutzte Strahlenquelle ist ein schwach radioaktives Urangestein (Mischstrahler) mit ca. 30% Alpha, 23% Beta und 47% Gamma Anteil.

Entsprechend dem Nulleffekt wird die Messung wiederholt.  
In der Zeit  $t = 1$  Minute haben wir nun 183 Impulse gemessen.

Dies bedeutet, dass wir, entsprechend der Berechnungen von vorher, folgende Aussagen machen können:

Aktivität = 3,1 Bq  
Ortsdosisleistung = 0,989  $\mu\text{Sv/h}$

### Zusammenfassung

Ohne den Strahler konnte eine Aktivität von 0,6 Bq bei einer Dosisleistung von 0,191  $\mu\text{Sv/h}$  gemessen werden. Dies ist die ortsabhängige natürliche Hintergrundstrahlung (Nulleffekt).

Mit einem Strahler im Abstand von 10 cm konnte eine Aktivität von 3,1 Bq bei einer Dosisleistung von 0,989  $\mu\text{Sv/h}$  gemessen werden.

Die Differenz der Aktivität als auch der Dosisleistung, wird vom Strahler im Abstand von 10 cm abgegeben und beträgt 2,5 Bq bei 0,798  $\mu\text{Sv/h}$

Der Versuch wird nun wiederholt in dem der Abstand vom Strahler zum Zählrohrfenster auf 20 cm vergrößert wird.

Ergebnis:

Imp/min = 75  
Aktivität = 1,25 Bq  
Dosisleistung = 0,3989  $\mu\text{Sv/h}$   
Differenz zum Nulleffekt = 0,207  $\mu\text{Sv/h}$

Der neue Wert von 0,207  $\mu\text{Sv/h}$  (bei 20 cm Abstand) entspricht ca.  $\frac{1}{4}$  des vorhergehenden Wertes (bei 10 cm Abstand) und bestätigt somit gleichzeitig das Abstandsgesetz.

Entsprechend diesem Aufbau können Sie nun weitere Messungen z.B mit verschiedenen Abschirmungen (Material: Blei, Aluminium, Papier usw.) des Strahlers vornehmen.

### Abschirmung mit Aluminium

Aufbau gemäß nachfolgendem Bild 3.6.2

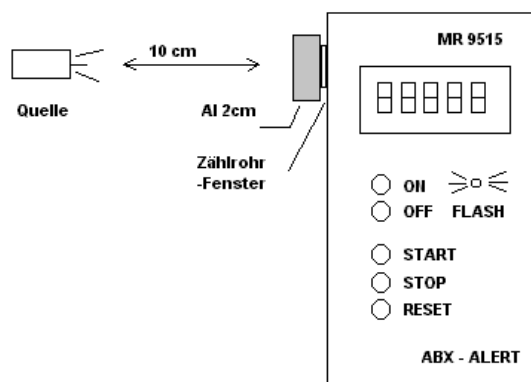


Bild 3.6.2  
Aufbau mit Abschirmung des Zählfensters

Zuerst werden wieder die Impulse in einem Abstand von 10 cm zum Zählrohrfenster in der Zeit  $t = 1$  Minute gemessen (ohne Abschirmung).

Da wir unsere Position (Ort) zum ersten Experiment nicht verändert haben, können wir auch das dort gewonnene Ergebnis verwenden.

Impulsrate im Abstand zum Strahler (10 cm) = 183 Imp./min

Nun wird das Fenster des Zählrohres durch eine 2 cm dicke Aluminiumplatte abgedeckt und die Messung erneut durchgeführt.

Hierbei wurde eine Impulsrate von 138 Imp./min gemessen.

Ergebnis:

Zuerst wird die Hintergrundstrahlung mit 36 Imp./min von beiden Ergebnissen abgezogen.

$$183 \text{ Imp./min} - 36 \text{ Imp./min} = 147 \text{ Imp./min}$$

$$138 \text{ Imp./min} - 36 \text{ Imp./min} = 102 \text{ Imp./min}$$

Damit erreichen nur noch  $100 / 147 \times 102 = 69,38\%$  der Strahlung das Zählrohr.

Die Aluminiumplatte absorbiert somit ca. 30,6% der vorhergehenden Strahlung. Bei der absorbierten Strahlung handelt es sich vorwiegend um  $\beta$  - Strahlung.

Beachten Sie, dass unsere Messung im Beispiel nur das Prinzip darstellt und von Ihren Messungen aufgrund der Ortsabhängigkeit als auch des stochastischen Prozesses des Kernzerfalls und nicht zuletzt auch durch physikalische Veränderungen im Messaufbau von Ihren gemessenen Werten abweichen kann.

**Die genaue Fehlerbetrachtung kann in Anhang 2 nachgesehen werden.**

Bei Ihren Messungen sollten Sie darauf achten, daß Sie aufgrund des stochastischen Prozesses beim Kernzerfall stets mehrere Messungen durchführen. Danach können Sie einen Mittelwert der Meßreihen bilden und erhalten somit eine größere Aussagefähigkeit über Ihre gemessenen Werte.

**Beim Umgang mit radioaktiven Stoffen sind unbedingt die Bestimmungen der gesetzlichen Strahlenschutzverordnung in der jeweils gültigen Fassung zu beachten.**

**Weiterführende Literatur:**

**PHYSIK; Gerthsen – Kneser – Vogel**

ISBN – 3 – 540 – 16155 – 4 Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo

**Autor: Lothar Schmid,**

**staatl. gepr. Techniker (FS) , ( state – certified – engineer ), Qualitätstechniker**

***Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.***

#### 4.1 Anhang 1

##### Zur Aktivität Seite 9:

Die Aktivität ergibt sich aus

$$A = N \cdot \lambda = - \frac{dN}{dt}$$

$$N \cdot \lambda = - \frac{dN}{dt} \quad \text{für } N_{(t>0)} = N_0 \text{ (siehe Bild 2.2.5)}$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int dt$$

$$\ln N = -\lambda \cdot t + c \quad \text{Anfangsbedingung: } N_{(t=0)} = N_0$$

$$\ln N_0 = 0 + c \quad \ln N_0 = c$$

$$\ln N = -\lambda \cdot t + \ln N_0$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

$$\frac{N_{(t)}}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N_{(t)} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{GL .1}$$

Hieraus lässt sich folgender Sachverhalt ableiten.

Wieviele radioaktive Kerne in der Zeit  $\Delta t$  (dt) zerfallen hängt nur von zwei Größen ab.

1. Der Anzahl vorhandener Anfangskerne  $N_0$
2. Von der Zerfallskonstante (Wahrscheinlichkeit)  $\lambda$   
(Maß für die „Zerfallsintensität“ eines Kerns)

Diese Abhängigkeit beschreibt die Gleichung 1, in einer Exponentialfunktion.

## 4.2 Anhang 2

### Zur Halbwertszeit und der Zerfallskonstante $\lambda$ Seite 8

Aus dem Zerfallsgesetz

$$N_{(t)} = N_o \cdot e^{-\lambda t}$$

folgt:

$$\frac{N_{(t)}}{N_o} = e^{-\lambda t} \quad \text{mit} \quad \frac{N_{(t)}}{N_o} = \frac{1}{2} \quad (\text{Halbwertszeit) und } t = T_{1/2}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda \cdot T_{1/2} \quad \ln 1 = 0$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

### 4.3 Anhang 3

#### Zählstatistik

Beim Kernzerfall radioaktiver Substanzen kann nicht vorhergesagt werden wann ein Nuklid zerfällt, sondern nur wie groß die **Wahrscheinlichkeit** ist das es in einer gewissen Zeitspanne zerfällt.

Beim Kernzerfall handelt es sich demzufolge um ein **stochastisches Ereignis** (dem Zufall unterworfen).

Die Messung der Ereignisse (Zerfälle) mittels eines Zählrohres wird in Zeitabschnitten  $\Delta t$  und in  $N$  Messungen erfaßt. Zum Beispiel werden bei der ersten Messung  $N_{(1)}$  in der Zeit  $\Delta t = 1$  Minute 36 Impulse gezählt und bei der zweiten Messung  $N_{(2)}$  in der Zeit  $\Delta t = 1$  Minute 40 Impulse gezählt. Die Zeit  $\Delta t$  wird für alle Messungen bis  $N_{(i)}$  beibehalten.

Alle Meßergebnisse werden sich im Ergebnis um einen Erwartungswert  $\mu$ , welcher bei großem  $N$  gegen den Mittelwert strebt, streuen.

$$h_{(z)} = \frac{\text{Anzahl der Messungen mit dem Erwartungswert } \mu}{\text{Gesamtzahl der Messungen}}$$

Die relative Häufigkeit mit welchem dieser Erwartungswert auftritt wird mit  $h_{(z)}$  bezeichnet und ist eine Funktion von  $N$ , ( $h_{(z)} = f(N)$ ). Diese Abhängigkeit ist in Bild 4.1 dargestellt.

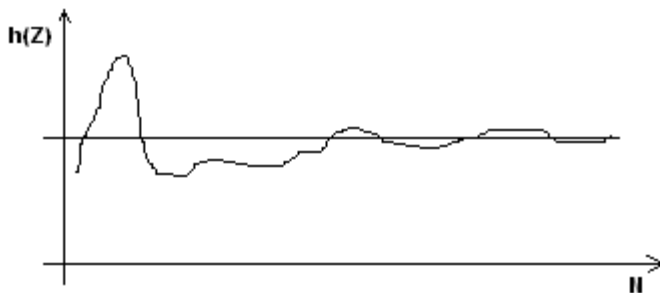


Bild 4.1  $h_{(z)} = f(N)$

Bei einer kleinen Anzahl von Messungen macht sich der Zufall hier deutlich bemerkbar. Mit wachsender Anzahl von Messungen jedoch wird das Ergebnis stabiler und strebt einem Grenzwert entgegen. Dieser Grenzwert heißt **Wahrscheinlichkeit** und wird mit  $P_{(x)}$  bezeichnet.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} h_{(\mu)} = P_{(\mu)} \quad \text{mit} \quad N \rightarrow \infty \quad \text{und} \quad P \rightarrow 0 \quad \lim_{N \rightarrow \infty} P_{(N)} Z$$

Tritt ein Ereignis selten ein, so wird die sog. **Poissonverteilung** angewendet.

Die folgende Gleichung  $\psi_N(Z)$  gibt an wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, bei einer Messung  $N$  (in  $\Delta t$ ) und einem Erwartungswert  $\mu$  genau  $Z$  Impulse zu erhalten.

$$\psi_N(Z) = \frac{\mu^Z}{Z!} e^{-\mu} \quad Z = \text{gezählte Impulse in } \Delta t \text{ (z.B. 8, 10, 5, \dots)}$$

$$\mu = \text{Erwartungswert ( für große } N, \mu \cong \bar{Z} )$$

$$\bar{Z} = \text{Mittelwert}$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \quad Z_i = \text{Einzelwerte von } i = 1 \text{ bis } i = N$$

Die nachfolgende Grafik zeigt eine solche Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Messwerte.

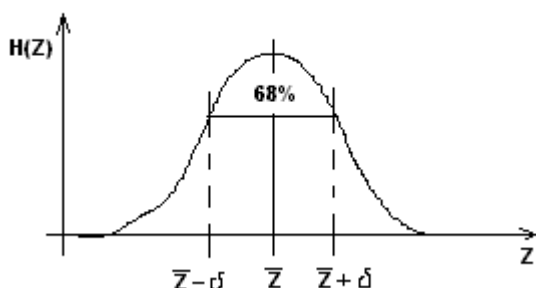


Bild 4.2 Poissonverteilung

Wie man aus der Grafik erkennen kann liegt bei einer Poissonverteilung die Impulszahl  $Z$  zu 68% in dem Intervall  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$  oder  $(\bar{Z} - \sigma, \bar{Z} + \sigma)$  wobei  $\sigma$  die **Standardabweichung** ist für die gilt

$$\sigma = \sqrt{\mu} \approx \sqrt{\bar{Z}}$$

Als Standardabweichung bezeichnet man die Streuung um den Mittelwert  $\bar{Z}$ .

**Im Umkehrschluß muß bei unbekannter Strahlenexposition der Quelle zuerst durch eine Messreihe die obige Verteilung ermittelt werden. Dies wird auch in den meisten der Fälle so sein.**

Die obige Betrachtung führt nun zu dem Ergebnis, daß bei der Messung des Nulleffekts und schwach radioaktiver Objekte sich der Zufallscharakter (stochastischer Prozess) des atomaren Zerfallsprozesses sehr stark bemerkbar macht und entsprechend berücksichtigt werden muß. Theoretisch wäre nur bei Auszählung unendlich vieler Impulse zu erwarten, daß bei der Wiederholungsmessung derselbe Wert gefunden wird.

Der relative statistische Fehler der Einzelwerte definiert sich wie folgt:

$$F_{(r)} = \frac{1}{\sqrt{Z}} \quad F_{(r)} = \text{relativer Fehler; } Z = \text{Anzahl der gemessenen Impulse}$$

Aus der Formel kann abgeleitet werden, daß der relative statistische Fehler einer gemessenen Impulszahl um so kleiner wird, je größer die Anzahl der tatsächlich gezählten Impulse ist.

Beispiel:

| Z    | $\frac{1}{\sqrt{Z}}$ | $F_{(r)}$ in % |
|------|----------------------|----------------|
| 10   | 0,32                 | 32             |
| 100  | 0,10                 | 10             |
| 1000 | 0,032                | 3,2            |

Eine signifikante Abweichung zweier Messwerte wird erwartet wenn sich die in  $\Delta t$  gemessenen Impulse  $Z_1$  und  $Z_2$  um mehr als  $\sqrt{Z_1 + Z_2}$  unterscheiden.

#### 4.4 Anhang 4

##### Dosimetrische Größen und Einheiten

| <b>Ionendosis J</b> (die alten Einheiten waren bis zum 31.12.1985 zugelassen) |   |         |                    |         |                     |         |   |
|---|---|---------|--------------------|---------|---------------------|---------|---|
| Definition  | $J = dQ / dm_a$ (in C/Kg)<br>Masse = $m_a$ ; elektrische Ladung = C (Coulomb) |         |                    |         |                     |         |   |
| Größe   | SI-Einheit  |         | Weitere ges. Einh. |         | Alte Einheit        |         | Verknüpfungs-<br>beziehung                  |
|   | Name  | Zeichen | Name               | Zeichen | Name                | Zeichen |   |
| Ionendosis J  | Coulomb / Kg  | C/Kg    | -                  | -       | Röntgen             | R       | $1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$     |
| Ionendosisleistung 'J<br>Je Zeiteinheit                                       | Ampere / Kg   | A / Kg  | Coulomb /Kg sec    | C/Kg s  | Röntgen/<br>Sekunde | R / s   | $1R/s = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg s}$ |

| <b>Energiedosis D</b> (die alten Einheiten waren bis zum 31.12.1985 zugelassen) |   |         |                    |                   |                 |         |  |
|---|---|---------|--------------------|-------------------|-----------------|---------|--|
| Definition  | $D = dW_d / dm$ (in J/Kg)<br>Masse = $m$ ; Strahlungsenergie = $W_d$ (IN Joule J) |         |                    |                   |                 |         |  |
| Größe   | SI-Einheit  |         | Weitere ges. Einh. |                   | Alte Einheit    |         | Verknüpfungs-<br>beziehung   |
|   | Name  | Zeichen | Name               | Zeichen           | Name            | Zeichen |  |
| Energiedosis D  | Gray  | Gy      | Joule/ Kg          | J/Kg              | Rad             | Rd      | $1Gy = 1J/Kg$<br>$1rd = 0,01Gy$  |
| Energiedosisleistung  | Joule/ Kg s   | Gy/s    | Joule/ Kg s        | J/Kg s<br>cJ/Kg s | Rad/<br>Sekunde | rd / s  | $1cJ/Kg s = 0,01 \text{ J/Kg s} = 1Gy/s$                                     |
| Äquivalentdosis H; $H = q \times D$   | Sievert   | Sv      | Joule/ Kg          | J/Kg              | Rem             | rem     | $1Sv = 1J/Kg$<br>$1rem = 0,01 \text{ Sv/Kg}$                                 |
| Äquivalentdosisleistung 'H  | Sievert/ Sekunde  | Sv/s    | Joule/Kg Sekunde   | J/Kg s            | Rem/s           | rem/s   | $1 \text{ Sv/s} = 1 \text{ J/Kg s}$<br>$1 \text{ rem/s} = 0,01 \text{ Sv/s}$ |

$q$  = Qualitätsfaktor (von der Strahlenart abhängige Qualitätsfaktor)  
 Rad = **R**adiation **a**bsorbed **d**ose  
 Rem = **R**adiation **e**quivalent **m**an