

**Physikalische und mathematische Grundlagen zu den Vorlesungen über  
„Kerntechnische Strahlungssensoren“  
im Modul „Sensorik Vertiefung“**

von

Prof. Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Edmund R. Schießle

## 16 Kerntechnische Strahlungssensoren

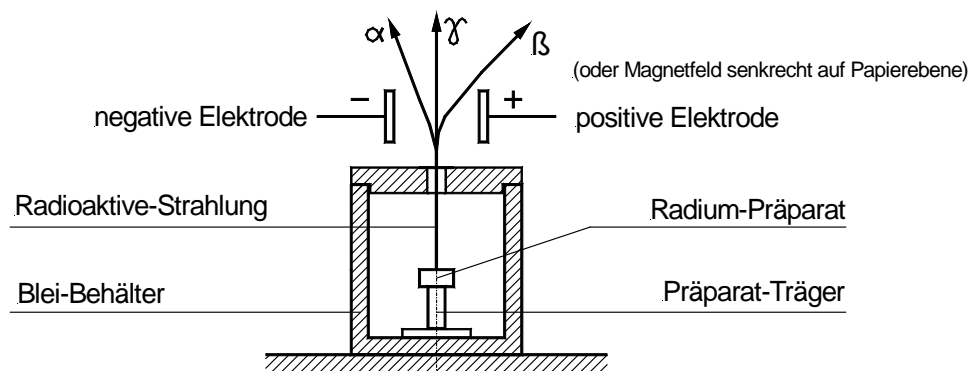
Kerntechnische Strahlungssensoren (kurz Strahlungssensoren oder Strahlungsdetektoren) sind wichtige Messmittel für die Identifizierung, Zählung und von Strahlungsteilchen und der Messung ihrer Strahlungsenergie. Sie sind, im sensortechnischen Sinne, also Sensoren in denen die kernphysikalische Strahlungsenergie in elektrische Energie umgewandelt und mit elektronischen Mitteln weiterverarbeitet werden kann. Da alle Strahlungssensoren eine exakt definierte wirksame Messfläche haben und die Strahlungsenergie über eine bestimmte Zeit gemessen wird, ist auch die Messung der Energieflussdichte (Energie pro Zeit und Fläche) möglich. Ist zudem das Messvolumen des Sensors bekannt, kann man auch mit einer Zeit-Integration, prinzipiell die sog. Dosis messen. In der Industrie-Sensorik wird die Radioaktivität (kurz Aktivität), d.h. die physikalische Eigenschaft instabiler Atome und deren Isotope bei Kernzerfall oder Kernreaktionen eine radioaktive Strahlung auszusenden, für Strahlenschutz-Maßnahmen technischen Einsatz, zur Dicken-, Konzentrations-, Verschleiß- und Durchflussmessung genutzt.

### 16.1 Physikalische und messtechnische Grundlagen

#### Allg. kernphysikalische Grundlagen

Antoine Henri Becquerel entdeckte 1896, dass eine von Uranerzen ausgehende Strahlung Photoplatte schwärzt. Pierre u. Marie Curie gelang es 1898 aus uranhaltigen Mineralien die stark strahlenden Elemente Polonium und Radium zu isolieren. Die drei Forscher erhielten für ihre Arbeiten über die Radioaktivität (lat. Radius = Strahl) 1903 den Nobelpreis für Physik. Ernest Rutherford u. Frederik Soddy erklärten 1902, dass das Auftreten radioaktiver Strahlung immer mit einer Kernumwandlung verbunden ist, so dass sich ein Stoff in einen anderen Stoff umwandelt. Experimentelle Untersuchungen der Strahlungseigenschaften beim durchfliegen von Magnetfeldern ergaben, dass man aufgrund der Ablenkung im Magnetfeld zwei Arten von Strahlung unterscheiden kann, die als Alpha- u. Beta-Strahlung ( $\alpha$ - u.  $\beta$ -Strahlung) benannt wurde. Paul U. Villard erkannte um 1900 eine dritte Strahlungsart mit sehr hoher Energie, die sich in magnetischen und elektrischen Feldern nicht ablenken ließ, also elektrisch neutral war. Sie wurde  $\gamma$ -Strahlung genannt. 1905 erkannte der Physiker Egon v. Schweidler den statistischen Charakter des radioaktiven Zerfalls. Für seine Forschungsarbeiten zur Radioaktivität erhielt E. Rutherford 1908 den Nobelpreis für Chemie. Er erkannte, dass radioaktive Strahlung keine einheitliche physikalische Natur besitzt, sondern in drei Formen vorkommt. Er nannte die 3 Formen des Zerfalls: Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlung ( $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ - Strahlung).

**Bild 16.1** zeigt das Prinzip des stark vereinfachten Ablenkungsversuches mit drei verschiedenen Strahlungsarten in einem elektrostatischen Feld, beim Radium- Zerfall.



**Bild 16.1**

Die  $\alpha$ -Strahlung (o.  $\alpha$ -Teilchen) wird von der elektrisch negativen Elektrode angezogen. Die  $\beta$ -Strahlung ( $\beta$ -Teilchen) wird von der elektrisch positiven Elektrode angezogen. Die  $\gamma$ -Strahlen ( $\gamma$ -Teilchen) werden vom elektrostatischen Feld nicht abgelenkt. Daraus ergibt sich nun die nachfolgende Systematik.

### Systematik der Strahlungsarten und ihre physikalische Natur:

- $\alpha$ -Strahlen: doppelpositiv geladene Heliumkerne ( ${}^4_2\text{He}$ -Strahlen)
- $\beta$ -Strahlen: energiereiche negativ geladene Elektronenstrahlen
- $\gamma$ -Strahlen: sehr harte elektrisch neutrale „Röntgenstrahlung“ (Photonen)

Anmerkung:  $\gamma$ -Strahlung entsteht im Atomkern und Röntgenstrahlung in der Atomhülle und werden von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlern zusätzlich ausgesandt.

### a) Gesetz des radioaktiven Zerfalls

Für die Zahl  $N$  der zu einem Zeitpunkt  $t$  noch nicht zerfallenen Atome gilt das Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad \text{Gl. 16.1}$$

Wobei  $N_0$  die Zahl der zur Zeit  $t=0$  (d.h. am Anfang) nicht zerfallenen Atome ist, und  $\lambda$  die sog. Zerfallskonstante.

Die Gl.16.1 zeigt, dass die Zahl der Atomkerne in den radioaktiven Substanzen nach einem Exponentialgesetz abnimmt. Die Zerfallskonstante gibt an, welcher Anteil von einer beliebigen Menge  $N_0$  radioaktiver Kerne in einer bestimmten Zeiteinheit zerfällt. Eine hieraus abgeleitete wichtige Kenngröße ist die sog. Halbwertszeit. In der Praxis wird, anstatt der Zerfallskonstante  $\lambda$  meist die sog. Halbwertszeit  $T_{1/2}$  verwendet.

#### Die Halbwertszeit $T_{1/2}$

Sie ist die Zeit, in der die Hälfte aller Atomkerne einer radioaktiven Substanz zerfallen ist.

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda \quad \text{Gl. 16.2}$$

Diese Formel kann aus Gl.16.2 abgeleitet werden, wie in der Vertiefung gezeigt wird.

Anstatt der Halbwertszeit  $T_{1/2}$  kann als Kenngröße auch die Lebensdauer  $\tau$  verwendet werden.

$$\tau = 1/\lambda \quad \text{Gl. 16.3}$$

### Ableitung des Zerfallsgesetzes

#### a) Das Zerfallsgesetz:

Die Gl. 16.1 erhält man durch folgende auf experimentell Ergebnisse gestützte Überlegung: Die Anzahl  $dN$  der in der kurzen Zeit  $dt$  zerfallenen Atomkerne einer radioaktiven Substanz ist stets proportional zu der jeweils noch vorhandenen Menge  $N$ . Damit gilt dann:

$$\frac{dN}{dt} \sim -N \Rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t \Rightarrow \quad \text{Gl. 16.4}$$

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

Wobei  $\lambda$  eine Proportionalitätskonstante ist, mit dem Namen Zerfallskonstante.

#### b) Die Halbwertszeit

Nach verstreichen der Halbwertszeit gilt:  $N = N_0/2$  und  $t = T_{1/2}$  damit in Gl. 16.3 ergibt:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot T_{1/2}) \Rightarrow 0,5 = \exp(-\lambda \cdot T_{1/2}) \Rightarrow \ln(0,5) = -\lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow \quad \text{Gl. 16.5}$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

### Ende der Ableitung

### b) Systematik der Kenngrößen und Maßeinheiten

#### Strahlenaktivität oder kurz Aktivität $A$

Die Aktivität  $A$  ist eine Kenngröße die beschreibt wie viele Kerne  $N$  pro Zeiteinheit zerfallen:

$$A = \lambda \cdot N \quad \text{Gl. 16.6}$$

Wobei die Proportionalitätskonstante  $\lambda$  die Zerfallskonstante ist.

SI-Einheit der Aktivität: 1Bq (Becquerel) = 1 Kernumwandlung (Ereignis) / Sekunde = 1/s.  
Diese Einheit Bq ersetzt die alte Einheit 1 Ci (Curie) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq (Becquerel). Anschaulich gilt: 1 Gramm Radium entspricht etwa 1Ci.

Die Aktivität fällt analog zum Zerfallsgesetz ebenfalls exponentiell mit der Zeit ab. Es gilt:

$$A(t) = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad \text{Gl. 16.7}$$

Wobei  $A_0$  die Anfangsaktivität zum Zeitpunkt  $t = 0$  ist.

#### Spezifische Aktivität

Sie ist die Aktivität bezogen auf die sog. Masseneinheit erhält man die spezifische Aktivität:

$$A_{\text{spez.}} = A/m \quad \text{Gl. 16.8}$$

Wobei  $m$  die Masse des strahlenden Stoffes ist. Die SI-Einheit ist 1 Bq/g (Gramm).

#### **□ Strahlendosis**

##### Energiedosis (kurz Dosis) $D_E$

Bei der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie wird auf diese Energie übertragen. Die Wechselwirkung ist die absorbierte Energie bezogen auf die durchstrahlte Materie. Damit gilt:

$$D_E = W/m \quad \text{Gl. 16.9a}$$

Wobei  $W$  die absorbierte Strahlungsenergie und  $m$  die Masse der durchstrahlten Materie ist. Die Energieaufnahme von 1J/kg der durchstrahlten Materie entspricht einer absorbierten Energiedosis der Materie von 1Gy (Gray). Damit gilt für die SI-Einheit: 1Gy = 1J(Joule)/kg.

Die Einheit Gy ersetzt die alte Einheit 1 rad =  $10^{-2}$  Gy.

1 rad ist die Dosis bei der in der Masse von 1g des durchstrahlten Stoffes eine Energie von  $10^5$  J absorbiert wird.

##### Dosisleistung (oder Dosisrate)

Die pro Zeiteinheit übertragene Energiedosis wird Dosisleistung genannt. Einheit: Gy/s.

$$\dot{D}_E = \Delta D_E / \Delta t \quad \text{Gl. 16.9b}$$

##### Ionendosis $D_I$

Da in der Praxis ist die Messung der Energiedosis oft schwierig ist, verwendet man die Ionendosis und rechnet sie in die Energiedosis um. In der Sensormesstechnik kann die Ionendosis auch vorteilhaft eingesetzt werden. Es gilt dann:

$$D_I = Q/m \quad \text{Gl. 16.10}$$

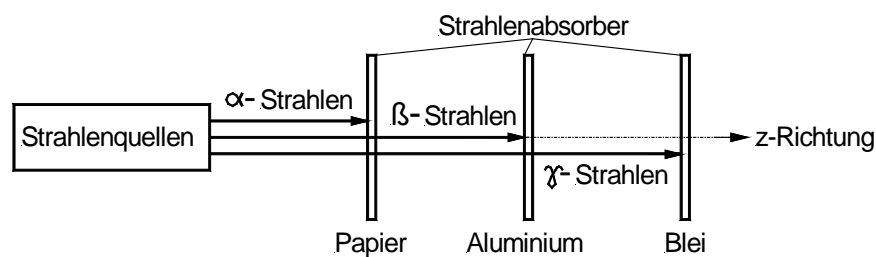
Wobei  $Q$  die erzeugte Ladung und  $m$  die Masse der durchstrahlten Materie ist. Für die SI-Einheit gilt: 1 As/kg = 1 C/kg, sie ersetzt die alte Einheit 1 R (Röntgen) =  $2,85 \cdot 10^{-4}$  C/kg.

1 R (Röntgen) liegt vor, wenn die  $\gamma$ - Strahlung in 1g Luft  $1,62 \cdot 10^{12}$  Ionen- Paare erzeugt.

#### **c) Reichweite und Abschirmung der radioaktiven Strahlung**

Außer den natürlichen Stoffen senden auch Hunderte von künstlich hergestellten Kernarten, die teilweise auch messtechnisch genutzt werden, radioaktive Strahlung aus.

**Bild 16.2** zeigt graphisch anschaulich die Reichweite der Strahlen in der Luft, und mögliche Materialien zu ihrer strahlentechnischen Abschirmung bzw. Schwächung dargestellt.



**Bild 16.2**

Die unterschiedlichen Reichweiten der Strahlung in der Luft und die unterschiedlichen Durchdringungen verschiedener Materialien sind bedingt durch die unterschiedlichen Wechselwirkungen mit der Luft (z. B. Ionisierung) und den verschiedenen Materialdichten.

### □ Reichweitengesetz der $\alpha$ -Strahlung in Luft

Die beim Zerfall (Umwandlung) des Kernes ausgestoßenen  $\alpha$ -Teilchen verlassen diese mit einer Geschwindigkeit von ca. 10000km/s. Bei ihrem Weg durch die Luft stoßen sie mit den Luftmolekülen zusammen und erzeugen je cm Bahnlänge 20000 bis 40000 Ionen. Zur Bildung eines Ionenpaares werden ca. 34eV benötigt. Die mittlere Reichweite  $R_\alpha$  in Luft lässt sich nach folgender Energie-Reichweite-Faustformel für 15°C und 1 bar berechnen:

$$R_\alpha = 0,323 \cdot E_0^{3/2} \quad \text{Gl. 16.11}$$

Mit  $R_\alpha$  in cm, wenn die Anfangsenergie  $E_0$  in MeV eingesetzt wird und  $E_0 > 2,5\text{MeV}$  ist.

Hinweis: 1 eV (Elektronenvolt) ist die Energie die ein Elektron hat, wenn es eine elektrische Potentialdifferenz von 1V durchlaufen hat.

Typisch Daten: Energie 5MeV, Reichweite in Luft 4cm, Abschirmung durch 1 Papierblatt. Für andere Stoffe richtet sich die Reichweite R nach seiner Atommasse und Dichte.

Beispiel:  $\alpha$ -Teilchen von 3MeV dringen in Aluminium nur 10 $\mu\text{m}$  ein.

### □ Reichweitengesetz der $\beta$ -Strahlung in Luft

Die aus Elektronen bestehenden  $\beta$ -Strahlen erzeugen aufgrund ihrer kleinen Masse in Luft nur 50 bis 100 Ionen je cm Bahnlänge. Die Energieverluste der  $\beta$ -Strahlen sind nur zum Teil auf Ionisation zurückzuführen. Die Wechselwirkung der  $\beta$ -Strahlung mit Materie hat 3 Ursachen:

1. Ionisation der Atome des durchstrahlten Stoffes („Ionisationsbremse“).
2. Abbremsung beim durchfliegen eines elektrischen Feldes in der Atomhülle.
3. Streuung durch das elektrische Potential in der Atomhülle.

Für die material unabhängige maximale Reichweite gelten folgende Faustformeln:

$$E_{\max} < 0,8\text{MeV} : R_{\beta,\max} = 0,407 \cdot E_{\max}^{1,38} \quad \text{Gl. 6.12}$$

mit  $E_{\max}$  in MeV ergibt  $R_{\beta,\max}$  in  $\text{g}/\text{cm}^3$

$$E_{\max} > 0,8\text{MeV} : R_{\beta,\max} = 0,542 \cdot E_{\max}^{1,38} - 0,133 \quad \text{Gl. 6.13}$$

Typisch Daten: Energie 1MeV, Reichweite in Luft 3m, Abschirmung 0,5cm Plexiglas.

### □ Reichweitengesetz der $\gamma$ -Strahlung in Luft

Nach Abgabe eines  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchens sind die meisten Kerne in energetische ein- oder mehrstufigen angeregten Zuständen. Kehrt ein angeregter Kern in seinen energetischen Grundzustand, über eine oder mehrere Anregungsstufen zurück, sendet er entsprechend der Energiedifferenz(en) quantisierte  $\gamma$ -Strahlung aus. Die  $\gamma$ -Strahlung eines angeregten Kernes setzt sich meist aus mehreren Komponenten zusammen. Gegenüber der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung besitzt die  $\gamma$ -Strahlung ein großes Durchdringungsvermögen. Die Intensität der  $\gamma$ -Strahlung nimmt in der Luft (analog zu den Photonen des Lichts) mit dem Quadrat der Entfernung von der Strahlenquelle ab. Damit gilt:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow I_2 = \frac{r_1^2}{r_2^2} \cdot I_1 \quad \text{Gl. 16.14}$$

Wobei  $I_1$  und  $I_2$  die Strahlungsintensitäten in den Abständen  $r_1$  und  $r_2$  sind.

Typisch Daten: Energie 1MeV, in Luft Gl.16.14, Abschirmung durch 10cm Blei.

### □ Wechselwirkung von $\gamma$ -Strahlen mit Materie

Bei der Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlen mit Materie werden 3 Effekte unterschieden:

1. Der Photo-Effekt: Absorptionseffekt im  $\gamma$ -Energiebereich von  $< 1\text{MeV}$ . Die  $\gamma$ -Quanten stoßen aus der Atomhülle Elektronen, wobei ihre Energie aufgebraucht (absorbiert) wird. Die befreiten (emittierten) Elektronen heißen Photoelektronen.

2. Der Compton-Effekt: Streueffekt im  $\gamma$ -Energiebereich von 0,2 bis 8MeV. Die  $\gamma$ -Quanten stoßen mit den Elektronen der Atomhüllen zusammen und übertragen auf sie einen Teil ihrer kinetischen Energie, wobei die Elektronen aus den Atomhüllen herausgelöst werden. Die  $\gamma$ -Quanten werden dabei mit verminderter Frequenz aus ihrer Einfallrichtung abgelenkt, d.h. gestreut. Die bei diesem Ereignis freigesetzten Elektronen heißen Compton-Elektronen.

**3. Die Paarbildung:** Materieerzeugung aus Energie im  $\gamma$ -Energiebereich  $> 1\text{MeV}$  (doppelte Elektronenruhemasse). Die  $\gamma$ -Strahlung wandeln sich beim durchdringen eines Kernfeldes, mit einer kinetischen Energie die  $> 5\text{MeV}$  ist sicher in Elektronen- Positronen Paare um.

#### □ Messtechnischer Nachweis und biologische Wirkung

Da bei den drei Wechselwirkungen Elektronen mit verschiedenen kinetischen Energien frei werden bewirken diese Ionisierungen beim durchqueren von Stoffen. Dieser physikalische Effekt ist die physikalische Grundlage für viele technische Sensoren und damit Messgeräte zum Nachweis und der Intensitätsmessung von  $\gamma$ -Strahlen sowie der ursächliche physikalische Grund für die biologische Wirkung der  $\gamma$ -Strahlung (Biophysik, Nuklearmedizin).

#### d) Absorptionsgesetz für $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlen

Für die Strahlungsintensität (kurz Intensität)  $I$  nach dem durchlaufen der Schichtdicke  $x$  eines Stoffes bei einer Anfangsintensität  $I_0$  gilt das Absorptionsgesetz:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) \quad \text{Gl. 16.15}$$

Wobei jetzt  $I_0$  und  $I$  die Zahl von gemessenen  $\beta$ -Teilchen bzw.  $\gamma$ -Quanten vor bzw. nach dem durchfliegen der Schichtdicke  $x$  eines Stoffes ist und  $\mu$  der lineare Absorptionskoeffizient mit der Maßeinheit  $1/\text{cm}$ .

#### □ Berechnung des Absorptionsgesetzes

Mit folgender Überlegung erhält man Gl.16.15: Durchquert die Strahlung eine dünne Schicht eines Materials, so ist die Intensitätsabnahme  $dI$  proportional zur Anfangsintensität  $I_0$  und der entsprechenden Schichtdicke  $dx$ . Damit gilt mathematisch analog zum Zerfallsgesetz:

$$dI \sim -I_0 \cdot dx \Rightarrow dI = -\mu \cdot I_0 \cdot dx \Rightarrow \int_{I_0}^I \frac{dI}{I_0} = -\mu \cdot \int_0^x dx \Rightarrow I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) \quad \text{Gl. 16.16}$$

Wobei  $\mu$  mathematisch der Proportionalitätsfaktor, also ein linearer Absorptionskoeffizient.

#### □ Ende der Berechnung

Eine wichtige Kenngröße ist die sog. Halbwertdicke, leicht herzuleiten aus Gl.16.15.

#### Die Halbwertdicke

Die Halbwertdicke  $d_{1/2}$  ist die Dicke eines Absorbers, bei der die Strahlungsintensität auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes gefallen ist.

Die Formel ergibt sich, wenn man in Gl.16.15 die Beziehung  $I = I_0/2$  einsetzt. Also:

$$\frac{I_0}{2} = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d_{1/2}) \Rightarrow \ln(0,5) = -\mu \cdot d_{1/2} \Rightarrow d_{1/2} = -\frac{0,693}{\mu} \quad \text{Gl. 16.17}$$

Wobei  $\mu$  der lineare Absorptionskoeffizient des Absorbers ist.

#### Anwendung des Absorptionsgesetzes auf $\beta$ - Strahlen

Trotz des komplexen Zusammenwirkens der die  $\beta$ -Strahlung schwächende Effekte lässt sich in vielen praktischen Anwendungen Gl.16.15 mit guter Näherung anwenden. Zu diesem Zwecke wird ein Koeffizient eingeführt der nur von der Energie der  $\beta$ -Teilchen abhängt, er heißt material unabhängiger Massenschwächungskoeffizient  $\mu'$ . Es gilt:

$$\mu' = \mu / \rho \quad \text{Gl. 16.18}$$

Wobei  $\mu$  wieder der lineare Absorptionskoeffizient und  $\rho$  die das spez. Dichte ist. Die Maßeinheit ist  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Gl.16.18 ist wieder als empirische Formel (Faustformel) darstellbar.

Für  $E_{\text{max}} > 0,5 \text{ MeV}$  gilt:

$$\mu' = 22 / E_{\text{max}}^{4/3} \quad \text{Gl. 16.19}$$

Man  $\mu'$  in  $\text{cm}^2/\text{g}$ , wenn  $E_{\text{max}}$  in MeV eingesetzt wird.

#### Anwendung des Absorptionsgesetzes auf $\gamma$ - Strahlen

Für den linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$  der  $\gamma$ -Strahlung gilt durch die 3 Effekte:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad \text{Gl. 16.20}$$

Wobei  $t$  der photoelektrische Absorptionskoeffizient ist,  $s$  der Compton -Streukoeffizient und  $k$  der Koeffizient der Paarbildung.

Die Koeffizienten sind aber stark abhängig vom Material und der Energie  $E_\gamma$  der Strahlung.

Für die  $\gamma$ -Strahlung gilt das Absorptionsgesetz Gl.16.15 exakt, jedoch nur für den Fall eines sehr dünnen Strahls. Um ausreichend gute Ergebnisse auch für einen breiteren Strahl zu erreichen wird ein Aufbaufaktor  $B$  eingeführt mit dem die Intensität noch multipliziert wird.

### 16.2 Sicherheitstechnik

Die Sicherheitstechnik beschreibt die Gefahren im Umgang mit radioaktiven Substanzen und die zur Kennzeichnung notwendigen kernphysikalischen Größen (Strahlendosen).

#### Äquivalentdosis $H$

Diese Kenngröße beschreibt die biologische Wirkung der radioaktiven Strahlung.

Die Äquivalentdosis berücksichtigt neben der Energieabgabe an den Körper die unterschiedliche Wirkung verschiedener Strahlenarten auf das Zellgewebe eines lebenden Organismus, indem die Energiedosis mit einem sog. Bewertungsfaktor  $q$  multipliziert wird.

$$H = q \cdot D_E$$

Gl. 16.21

Strahlenarten		Bewertungsfaktoren $q$
Photonen, alle Energien		1
Elektronen, alle Energien		1
Neutronen	kleiner 10 keV	5
	10 keV bis 100 keV	10
	100 keV bis 2 MeV	20
	2 MeV bis 20 MeV	10
	größer 20 MeV	5
Protonen		5
Alphateilchen, schwere Kerne		20

Obwohl die Äquivalentdosis nach der obigen Gleichung dieselbe Einheit hat wie die Energiedosis wird zur Unterscheidung als SI-Einheit 1 Sv (Sievert) = 1 Gy  $\cdot$   $q$  verwendet.

Ersetzt die ältere Einheit 1 rem (roentgen equivalent man) =  $10^{-2}$  Sv.

#### Effektive Äquivalentdosis

Nach den Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung ist eine effektive Dosis zu berechnen, die sich aus den summierten Äquivalentdosen für jedes Organ zusammensetzt, wobei die Organdosen noch jeweils mit einem Gewebe- Bewichtungsfaktor  $w$  zu multiplizieren sind:

$$H = w \cdot D_E$$

Gl. 16.22

Organe	$w$ - Werte	Organe	$w$ - Werte
Keimdrüsen	0,20	Brust	0,05
Rotes Knochenmark	0,12	Leber	0,05
Dickdarm	0,12	Speiseröhre	0,05
Lunge	0,12	Schilddrüse	0,05
Magen	0,12	Haut	0,01
Blase	0,05	Knochenoberfläche	0,01
Andere Organe u. Gewebe	0,05		

Die Organe mit der schnelleren Zellbildung sind besonders gefährdet. Die effektive Dosis der natürlichen Strahlenbelastung beträgt für Menschen etwa 0,4 rem pro Jahr.