

# Strahlenschutz-Information zum Versuch $\gamma$ -Spektroskopie

## 1. Strahlenquellen des Versuchs

Der Versuch  $\gamma$ -Spektroskopie wird mit  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  und  $^{137}\text{Cs}$  durchgeführt. Die Energien der emittierten  $\gamma$ - und  $\beta$ -Strahlung dieser Isotope sind Abb. 1 zu entnehmen. Alle dort angegebenen Daten für  $\beta$ -Strahlung stellen Maximalwerte der kontinuierlichen Energieverteilung dar.

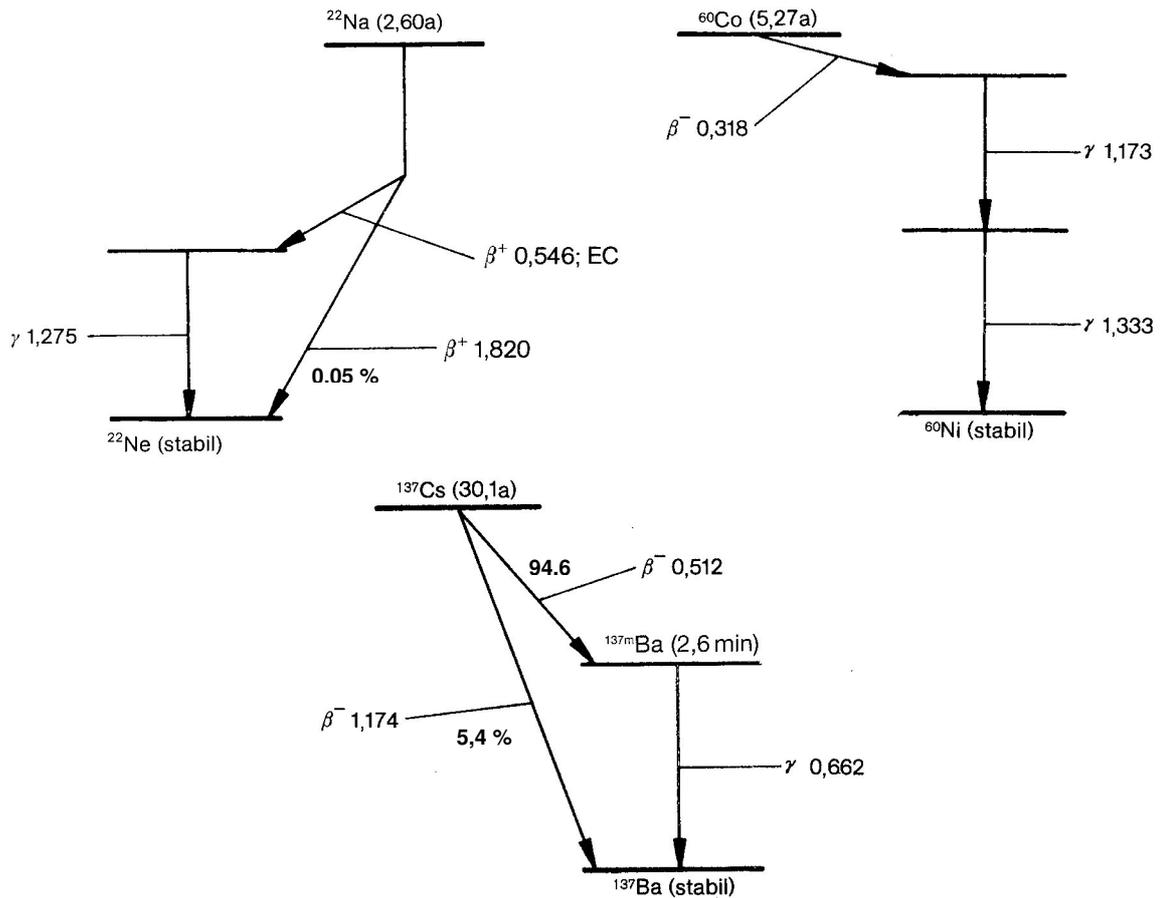


Abb. 1: Zerfall von  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  und  $^{137}\text{Cs}$  (angegebene Energien in MeV)

Die benutzten Strahler wiesen am Ende des Jahres 2004 folgende Aktivitäten auf:

$^{22}\text{Na}$	4,8 kBq
$^{60}\text{Co}$	2,3 kBq
$^{137}\text{Cs}$	21 kBq.

## 2. Dosis-Definitionen

Die Strahlung radioaktiver Materialien ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) ist gefährlich wegen ihrer ionisierenden Wirkung. Sie erzeugt biologische Schäden durch Bindungsänderungen in Molekülen. Zur Beurteilung des Schadensrisikos, dem man in einem Strahlungsfeld ausgesetzt ist, benötigt man eine entsprechende Messgröße, die "Strahlendosis". Diese Größe soll die Summe aller auftretenden Bindungsänderungen und der daraus resul-

tierenden Schadensphänomene in biologischen Organismen erfassen, was natürlich nicht direkt möglich ist. Eine messtechnisch realisierbare Annäherung erreicht man über die folgenden Dosis-Definitionen:

**Energiedosis  $D$**  = an Materie übertragene (absorbierte) Energie pro Masseneinheit

Einheit: Gray (Gy)     1 Gy = 1 J/kg

Bei der Wechselwirkung mit Materie gibt Strahlung Energie an die Materie ab. Die Definition der Energiedosis beruht daher auf der Überlegung, dass die Änderung der elektronischen Struktur eines Materials proportional zum Energieübertrag pro Masseneinheit durch die einfallende Strahlung ist.

Beispiel: Die Energiedosis von  $\gamma$ -Strahlung in Luft lässt sich auf einfache Weise mit Ionisationskammern bestimmen, indem man die Anzahl der Ionenpaare misst, die beim Durchgang der Strahlung erzeugt werden und diesen Wert mit der mittleren Ionisationsenergie von Luft multipliziert und auf die Masse der Luft in der Ionisationskammer umrechnet.

Der Energieübertrag von Strahlung an Materie – und damit die Energiedosis - ist stark abhängig von der Art der Wechselwirkung, von der Ordnungszahl der Atome des Materials und der Strahlungsenergie. Bei der Energiedosis muss angegeben werden, auf welches Material sie sich bezieht. Im Strahlenschutz ist Gewebe das Bezugsmaterial.

**Äquivalentdosis  $H$**  =  $w_R \cdot D$  = Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$  · Energiedosis  $D$  in Gewebe

Einheit: Sievert (Sv)

$w_R$  hat für Photonen und Elektronen den Wert 1 Sv/Gy. Für  $\alpha$ -Strahlung gilt  $w_R = 20$  Sv/Gy. Der hohe Wert von  $w_R$  bei  $\alpha$ -Strahlung beruht auf der hohen Ionisationsdichte längs der Bahn eines  $\alpha$ -Teilchens. Bezogen auf gleiche übertragene Energie wirkt dichtere Ionisierung schädlicher, weil die Wahrscheinlichkeit von Reparaturmechanismen an ausgelösten Gewebedefekten herabgesetzt ist.

**Effektive Dosis  $H_E$**  =  $\sum H_T \cdot w_T$  (Index T über alle Körperorgane)

wobei  $H_T$  = Organdosis = Äquivalentdosis im Organ T,

$w_T$  = Gewebe-Wichtungsfaktor für das jeweilige Organ T mit  $\sum w_T = 1$ .

Einheit: Sievert (Sv).

Tabelle 1 zeigt Gewebe-Wichtungsfaktoren für die einzelnen menschlichen Organe. Den höchsten Wert haben die Keimdrüsen mit  $w_T = 0,20$ . Mit diesen Wichtungsfaktoren lassen sich Körperdosen berechnen. Zur normalen Strahlenschutz-Personenüberwachung dienen als Messgröße für äußere Strahlung die beiden folgenden Größen:

**Tiefen-Personendosis  $H_P(10)$**  = Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe im Körper,

**Oberflächen-Personendosis  $H_P(0,07)$**  = Äquivalentdosis in 0,07 mm Tiefe im Körper.

$H_P(10)$  interessiert bei durchdringender Strahlung (Röntgen-,  $\gamma$ -Strahlung) und wird von Personendosimetern gemessen, die am Rumpf getragen werden, z.B. den Filmdosimetern, deren Anwendung bei Personal der medizinischen Röntgendiagnostik üblich ist.  $H_P(0,07)$  soll die Strahlendosis in der menschlichen Haut beim Umgang mit Strahlung kurzer Reichweite (z.B.  $\beta$ -Strahlung) erfassen. Da Strahlenexpositionen beim

Umgang mit entsprechenden Quellen vor allem an der Hand auftreten, kommen zur Bestimmung dieser Messgröße Fingerringdosimeter zum Einsatz.

Tab. 1: Gewebe-Wichtungsfaktoren

Gewebe oder Organ	Gewebe-Wichtungsfaktoren $w_T$
Keimdrüsen	0,20
Knochenmark	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
Andere Organe oder Gewebe	0,05

### 3. Grundlagen der Dosisberechnung für $\gamma$ - und $\beta$ -Strahlung

#### a) $\gamma$ - Strahlung

Wie aus der Vorbereitung für den Versuch bestens bekannt ist, wechselwirken Photonen mit Materie über Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung. Die Art der Wechselwirkung hängt ab von der Strahlungsenergie und der Ordnungszahl des Materials. Bei niedrigen Energien dominiert der Photoeffekt, im anschließenden Energiebereich der Comptoneffekt und bei Energien  $> 5 - 10$  MeV die Paarbildung. Die schädigende Wirkung auf biologisches Material resultiert allerdings nicht unmittelbar aus diesen primären Wechselwirkungen, sondern aus den sekundären Wechselwirkungen der freigesetzten Elektronen. Sieht man von Randschichteffekten ab, so ändert sich das Photonenstrahlungsfeld mit der Tiefe im Material nur wenig im Vergleich zu den Elektronenreichweiten. Unter diesen Bedingungen sind die Energieüberträge pro Volumen an das Material gleich der pro Volumen freigesetzten Startenergie von Photo- und Comptonelektronen und Paarerzeugung. Die Energiedosis  $D$  im bestrahlten Material ist gegeben durch

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{dE}{\rho \cdot dV} = \Psi(h\nu) \cdot \frac{\eta}{\rho}, \text{ wobei}$$

$$\frac{dE}{dm} = \text{übertragene Energie pro Masse}$$

$$\Psi(h\nu) = \frac{n \cdot h\nu}{dA},$$

$$\frac{\eta}{\rho} = \text{Massen - Energieumwandlungskoeffizient,}$$

$$n \cdot h\nu = \text{Energie von } n \text{ Photonen}$$

Die Energiefluenz  $\Psi$  gibt die Summe der Einzelenergien von  $n$  einfallenden Photonen pro Flächenelement  $dA$  an. Im Massenenergieumwandlungskoeffizienten (Abb. 2) sind die Wirkungsquerschnitte der einzelnen Photonenwechselwirkungen enthalten.

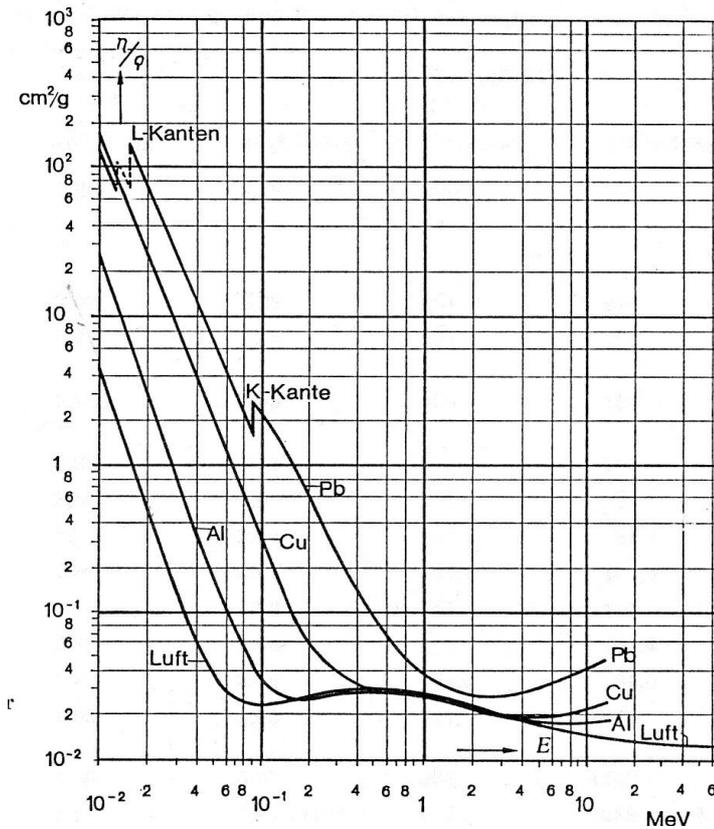


Abb. 2:  
Energieabhängigkeit des Massenenergieumwandlungskoeffizienten verschiedener Materialien

### b) Elektronen und $\beta$ -Strahlung

Elektronen mit Energien  $< 10$  MeV wechselwirken mit Materie vor allem durch unelastische Stöße mit Hüllenelektronen von Atomen (Ionisation und Anregung) und in geringerem Ausmaß durch Erzeugung von Bremsstrahlung im Feld von Atomkernen und Hüllenelektronen. Ein primäres Elektron gibt seine Energie nicht in einem, sondern in vielen Wechselwirkungsprozessen ab. Durch die hierdurch ausgelösten zahlreichen sekundären Elektronen entsteht eine verästelte Elektronenkaskade. Die Energiedosis, die an die durchdrungene Materie abgegeben wird, ergibt sich aus der Summe aller Einzelwechselwirkungen der Kaskadenelektronen. Zur rechnerischen Erfassung aller entsprechenden Einzelprozesse sind Monte-Carlo-Simulationen erforderlich.

Für eine Teilchenfluenz  $\Phi(E)$  von monoenergetischen Elektronen der Energie  $E$  lässt sich der Beitrag der primären Wechselwirkung zur Energiedosis beschreiben durch

$$D = \Phi(E) \cdot \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{Stoß}}(E).$$

Die Teilchenfluenz ist definiert als Anzahl von Teilchen pro Fläche. Das Massenstoßbremsvermögen  $(S/\rho)_{\text{Stoß}}$  (Abb. 3) kann durch die Bethe-Bloch-Gleichung berechnet werden.

Während sich zur Abschirmung von Photonen besonders gut Materialien hoher Ordnungszahl eignen, ist die Situation bei Elektronenstrahlung genau umgekehrt. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, nimmt das Massenstoßbremsvermögen mit zunehmender Ordnungszahl ab. Am besten geeignet zur Abschirmung von Elektronen sind daher wasserstoffhaltige Kunststoffe, wie z.B. Acrylglas (Plexiglas,  $C_5H_8O_2$ ), bei den Metallen empfiehlt sich Aluminium.

Die Reichweite von 1 MeV-Elektronen in Festkörpern beträgt ungefähr 1,5 mm, von 0,5 MeV-Elektronen 0,6 mm. Eine signifikante Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung ergibt sich dagegen erst bei Materialstärken im Bereich mehrerer Zentimeter.

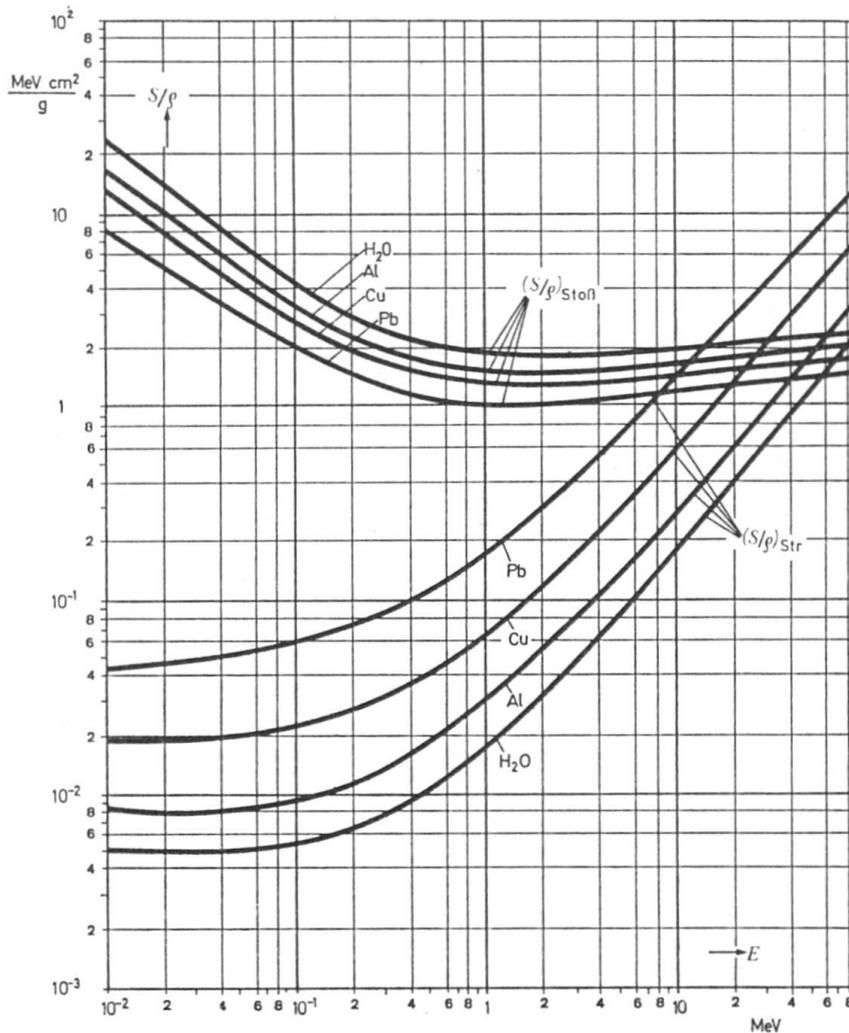


Abb. 3:  
Energieabhängigkeit von  
Massenstoßbremsvermögen  
 $(S/\rho)_{\text{Stoß}}$  und Massenstrahlungs-  
vermögen  $(S/\rho)_{\text{Str}}$  verschiedener  
Materialien für Elektronen

#### 4. Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

Die biologische Strahlenwirkung erfolgt vor allem über Ionisationen und Anregungen. Dabei kann es zu Bindungsänderungen und Radikalbildungen kommen und als Folge hiervon zu Schädigungen von Zellbereichen. Besonders schwerwiegend sind Veränderungen an Erbanlagen (Mutationen). Gewebe mit hoher Zellteilungsrate (Knochenmark, Haut) sind stärker gefährdet als Zellen geringer Teilungsrate (Nerven, Bindegewebe, Muskeln). Man unterscheidet **somatische Schäden**, die unmittelbar am bestrahlten Organismus in Erscheinung treten und **genetische Schäden**, die erst bei der Entstehung neuen Lebens wirksam werden. Daneben gibt es eine Unterteilung in **stochastische** und **nichtstochastische** Strahlenwirkungen. Bei letzteren ist der Schweregrad abhängig von der Dosis und meist gibt es für die Wirkung einen Schwellwert (z.B. Hautrötung, Linsentrübung). Bei stochastischen Schäden steigt das Risiko beginnend bei null mit der Dosis, nicht aber der Schweregrad (z.B. Krebs, Leukämie, genetische Schäden). Selbst bei sehr geringer Dosis kann hier - wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit - eine schwere Schädigung ausgelöst werden, die manchmal erst Jahre nach der Strahlenexposition in Erscheinung tritt. Aus diesem Grund sind alle Strahlenschutzmaßnahmen so ausgelegt, dass auch kleine Dosen so weit wie irgend möglich vermieden werden. Eine vernachlässigbar kleine Dosis ohne jedes Risiko gibt es nicht!

Allerdings ist der Mensch auch natürlichen Strahlenexpositionen ausgesetzt. Diese entstehen durch kosmische Strahlung (vorwiegend Folgeprodukte aus dem Auftreffen hochenergetischer Protonen auf die Erdatmosphäre), terrestrische Strahlung (natürliche Radioaktivität der Erdkruste) und interne Strahlung durch Inhalation und Ingestion natürlicher radioaktiver Stoffe. Interne Strahlungsexposition entsteht z.B. durch Radon, das aus den Wänden von Häusern in die Atemluft entweicht oder durch den Betastrahler  $^{40}\text{K}$ , der mit einem Anteil von 0,02 % im natürlichen Isotopengemisch von Kalium auftritt.

Die zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition ist im Bevölkerungsdurchschnitt geringer als die natürliche Exposition. Sie wird vor allem durch medizinische Diagnostik und Therapie verursacht, wie die folgende Tabelle zeigt.

Tab. 2: Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1988 in mSv

<b>Natürliche Strahlenexposition</b>	<b>2,4</b>
kosmische Strahlung	0,3
terrestrische Strahlung	0,5
Inhalation von Radon in Wohnungen	1,3
inkorporierte radioaktive Stoffe	0,3
<b>Zivilisatorische Strahlenexposition</b>	<b>1,55</b>
medizinische Diagnostik und Therapie	1,5
Rest	0,05
<b>Tschernobyl-Katastrophe</b>	<b>0,04</b>
<b>Gesamte Strahlenexposition</b>	<b>4,0</b>

Dosen im Bereich von 10 Sv bei Ganzkörperexpositionen mit durchdringender Strahlung sind tödlich. Bei ca. 1 Sv treten geringe Veränderungen des Blutbildes auf, bei 1-2 Sv eine deutliche Abnahme der Zahl der Leukozyten und Trombozyten. Dosen > 2 Sv erzeugen schwere Schäden im Blutbild, Kopfschmerzen, Fieber, innere Blutungen, Haarausfall, Durchfall, Erbrechen.

## 5. Schutzvorschriften der Strahlenschutzverordnung (StSchV)

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Umgang mit radioaktiver Strahlung regelt in Deutschland die Strahlenschutzverordnung (StSchV) in der Neufassung aus dem Jahr 2001. Für die Justus-Liebig-Universität existiert darüber hinaus eine Strahlenschutzanweisung des Universitätspräsidenten, die für die spezifischen Belange des I. Physikalischen Instituts durch eine spezielle Zusatzversion ergänzt wird.

Der Umgang mit radioaktiven Stoffen ist genehmigungspflichtig, wenn die in der StSchV genannten Freigrenzen überschritten werden. Bei dem Versuch Gammaskopie des Fortgeschrittenen-Praktikums trifft dies zu für die  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle, die mit einer Aktivität von 21 kBq um den Faktor 2,1 über der Freigrenze liegt. Es dürfen folgende Grenzwerte der effektiven Dosis im Kalenderjahr nicht überschritten werden:

- a) **Beruflich strahlenexponierte Personen:**
  - Personen älter als 18 Jahre 20 mSv
  - Personen unter 18 Jahren 1 mSv
  - Grenzwert für ein ungeborenes Kind für die Dauer der Schwangerschaft bei Strahlenexposition der Mutter 1 mSv
- b) **Einzelpersonen der Bevölkerung** 1 mSv

Für den genehmigungspflichtigen Umgang mit radioaktiver Strahlung sind Strahlenschutzbereiche einzurichten, deren Betreten an Auflagen gebunden ist. Je nach Höhe der Strahlenexposition, die möglicherweise überschritten wird, gibt es drei verschiedene Arten von Bereichen:

- *Sperrbereich* - falls Ortsdosisleistung > 3 mSv/h,
- *Kontrollbereich* - falls effektive Dosis pro Jahr > 6 mSv,
- *Überwachungsbereich* - falls effektive Dosis pro Jahr > 1 mSv.

Bei der Anwendung der radioaktiven Quellen des Versuchs Gammaskopie in Raum 510a werden effektive Jahresdosen > 1 mSv nicht erreicht (siehe Abschnitt 6). Trotzdem wird dieser Raum sicherheitshalber als Überwachungsbereich geführt. Er ist als radioaktiv gekennzeichnet und darf nur für die speziellen Aufgaben betreten werden, die hier durchzuführen sind.

## 6. Mögliche Strahlenbelastung während der Versuchsdurchführung

Von den drei Gammastrahlern des Praktikumsversuchs weist die <sup>137</sup>Cs-Quelle mit 21 kBq die mit Abstand höchste Aktivität auf (siehe Angaben von Abschnitt 1). Bei der Betrachtung der maximal möglichen Dosisbelastungen während der Versuchsausführung kann man sich daher auf diese Quelle beschränken.

Die Dosisleistung  $\dot{H}(x)$  im Abstand  $x$  zu einer punktförmigen, von Luft umgebenen Gammaquelle der Aktivität  $A$  ist gegeben durch

$$\dot{H}(x) = K\gamma \cdot \frac{A}{x^2}$$

Es wird unterstellt, dass die Abstrahlung isotrop in alle Richtungen erfolgt, woraus die Abnahme der Dosisleistung mit dem Quadrat des Abstands resultiert. Ein möglichst großer Abstand zur Strahlenquelle ist daher eine der wirksamsten Maßnahmen im Strahlenschutz.  $K\gamma$  ist die für den jeweiligen Gammastrahler charakteristische Dosisleistungskonstante. Sie beträgt bei <sup>137</sup>Cs  $8,83 \cdot 10^{-5}$  mSv/h · m<sup>2</sup>/MBq. Mit diesem Wert ergeben sich für die Aktivität von 21 kBq die in Tab. 3 aufgeführten Dosisleistungen.

**Tab. 3: Dosisleistung in verschiedenen Abständen zur <sup>137</sup>Cs-Quelle**

Abstand cm	Dosisleistung µSv/h
1	18.5
5	0.74
10	0.185
100	0.00185
500	0.000185

Die Daten von Tab. 3 sind in Relation zum Dosisgrenzwert der effektiven Jahresdosis von 1 mSv zu sehen, den die Strahlenschutzverordnung für nicht beruflich strahlenexponierte Einzelpersonen der Bevölkerung vorgibt (Abschnitt 5) und weiterhin in Relation zur jährlichen Belastung durch natürliche radioaktive Strahlung (Tab. 2). Demnach wäre das Strahlenrisiko, dem die Praktikanten bei der Versuchsdurchführung ausgesetzt sind, auch ohne zusätzliche Abschirmmaßnahmen zumutbar. Vorbeugend wurde der Messbereich aber trotzdem mit einer 5 cm dicken Wand aus Bleibausteinen abgeschirmt.

Beim Durchgang von Gammastrahlung durch Materie der Dicke  $x$  nimmt die Zahl  $N_0$  der eintreffenden Photonen ab auf die Zahl  $N$ . Für diese Schwächung der Photonenfluenz gilt

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x\right).$$

$\mu/\rho$  ist der vom Material und der Photonenenergie abhängige Massenschwächungskoeffizient. Er beträgt  $0,114 \text{ cm}^2/\text{g}$  für  $662 \text{ keV}$ - Photonen von  $^{137}\text{Cs}$  in Blei. Für die Dichte von Blei gilt  $\rho = 11,34 \text{ g/cm}^3$ . Damit ergibt sich eine relative Schwächung von 1 auf 0,0015. Legt man die Cs-Quelle unmittelbar vor die  $5 \text{ cm}$  dicke Bleiwand, so beträgt die Dosisleistung direkt dahinter  $1,1 \text{ nSv/h}$  (Nanosievert/h).

Alle drei für den Versuch benötigten Quellen werden vor Versuchsbeginn vom Betreuer innerhalb einer Nebenkammer der aufgebauten Bleiabschirmung deponiert. Sie bleiben während der gesamten Versuchsdurchführung innerhalb der Abschirmung. Für die Aufnahme der Gammaspektren muss nur die jeweilige Quelle von der Nebenkammer auf den Quellenhalter des Versuchs gebracht werden. Nach der Registrierung des Spektrums ist die Quelle wieder in die Nebenkammer der Abschirmung zurückzulegen. Die Quellen dürfen während des Versuchs nicht ohne Aufsicht bleiben.