

# Strahlenschutz

**Die radioaktiven Präparate werden NUR vom zuständigen Assistenten in die Apparatur eingesetzt. Die Praktikumssteilnehmer dürfen NICHT selbst mit den Präparaten hantieren!**

## 1 Umgang mit radioaktiven Stoffen

Beim Umgang mit radioaktiven Stoffen sind besondere Schutzvorschriften zu beachten. Gesetzlich sind diese in dem Strahlenschutzgesetz (StrlSchG [1]) in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV [2]) festgelegt. Der Zweck dieser gesetzlichen Regelwerke ist es, den Menschen vor den Wirkungen ionisierender Strahlung zu schützen.

## 2 Strahlungsarten und Aktivität

Beim Zerfall von instabilen Atomkernen einer radioaktiven Substanz tritt meist  $\alpha$ -,  $\beta$ - und/oder  $\gamma$ -Strahlung auf. ( $\alpha$ : schnelle  ${}^4\text{He}$ -Kerne,  $\beta^-/\beta^+$ : Elektronen/Positronen,  $\gamma$ : elektromagnetische Strahlung hoher Energie). Neutronen (n) entstehen z. B. beim Betrieb von Kernreaktoren, aber auch von Teilchenbeschleunigern. Protonen (p), Deuteronen (d) und schwere geladene Teilchen treten ebenfalls beim Betrieb von Teilchenbeschleunigern auf. Die biologische Wirkung dieser Strahlungsarten beruht auf der direkten oder indirekten Ionisation der Zellmoleküle des getroffenen Gewebes. Daher wird dieser Strahlungstyp als **ionisierende Strahlung** bezeichnet. Der Ausdruck *radioaktive Strahlung* ist nur zulässig für Teilchenstrahlung, die aus radioaktiven Atomkernen besteht (z.B. Experimente mit radioaktiven Schwerionenstrahlen an der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI)).

Als Aktivität  $A$  einer radioaktiven Substanz bezeichnet man die Zahl der Zerfälle pro Zeiteinheit.

$$A = \frac{\text{Zerfälle}}{\text{Zeiteinheit}} \quad [A] = 1 \text{ Bq} = \frac{\text{Zerfall}}{\text{Sekunde}} \quad (1)$$

Die Einheit Becquerel (Bq) wird nur für die Größe „Aktivität“ benutzt. Dimensionsgleich ist die Frequenz  $f$  oder  $\nu$ ,  $[f] = [\nu] = \text{Hz}$ , die zur Beschreibung periodischer Vorgänge verwendet wird. Jedoch unterscheiden sich die Bedeutungen erheblich. So gibt die Netto-Zählrate  $r_n = \dot{N}_n$  eines Detektors an, wieviele Wechselwirkungen zwischen der ionisierenden Strahlung und dem Detektor durch das Messsystem detektiert worden sind. Das entspricht NICHT der Aktivität des vermessenen radioaktiven Präparats! Für die Umrechnung einer gemessenen Netto-Zählrate  $r_n$  in die Aktivität  $A$  des vermessenen Präparates muss bei nuklidspezifischer Kalibrierung die totale Nachweiswahrscheinlichkeit  $\epsilon$  des Detektors bekannt sein:

$$A = \frac{r_n}{\epsilon}. \quad (2)$$

In der Gammaskopimetrie kommt durch die messtechnische Beschränkung auf Gamma-Zerfallskanal noch die energieabhängige Emissionswahrscheinlichkeit  $p$  für die untersuchte Photolinie eines Spektrums hinzu:

$$A = \frac{r_n}{\epsilon \cdot p}. \quad (3)$$

---

### 3 Dosismessgrößen

---

Unter dem Begriff der Dosimetrie wird im Strahlenschutz die quantitative Erfassung einer Strahlenexposition im weitesten Sinne und deren Bewertung bezüglich der biologischen Wirksamkeit verstanden. Um Strahlenexpositionen quantitativ zu erfassen, sind einerseits geeignete Messgräte wie auch andererseits entsprechende Definitionen von physikalischen Messgrößen erforderlich.

Die biologische Wirksamkeit ionisierender Strahlung beruht auf der direkten und indirekten Wechselwirkung mit lebendem Gewebe auf molekularer Ebene. Wenn ionisierende Strahlung direkt mit dem Gewebe wechselwirkt, so können z.B. Schäden am Erbgut, der DNS, auftreten. Hierbei kommt es zu Einfach- oder Doppelstrangbrüchen der Chromosomen-Helix. Eine indirekte Wechselwirkung findet über den Umweg der Radiolyse von Wassermolekülen in einer Zelle statt. Dabei bilden sich frei Radikale, die ihrerseits wieder Schäden an der DNS bewirken können. Da die Existenz von freien Radikalen in einer Zelle natürlicherweise zum Lebenszyklus der Zelle gehört, verfügt sie auch über Reparaturmechanismen für solcherart massive Veränderungen an der DNS. Beschädigungen, die durch ionisierende Strahlung entstanden sind, können daher grundsätzlich repariert werden. Inwieweit Folgeschäden durch eine Strahlenexposition zu erwarten sind, hängt von deren Intensität ab.

Die Intensität einer Exposition durch ionisierende Strahlung wird über die physikalische Messgröße der *Dosis* erfasst. Für die Dosis-Wirkungsbeziehung sind in der Vergangenheit verschiedene Modelle diskutiert worden. Dabei wird unter der Wirkung entweder das Risiko verstanden, infolge einer Strahlenexposition an Krebs zu erkranken und/oder zu versterben, oder der Schweregrad eines strahlenbiologischen Effekts bei stärkeren Expositionsintensitäten. Die wesentlichen Erkenntnisse, die zur Aufstellung dieser Modelle geführt haben, beruhen auf den Daten der Opfer von Hiroshima und Nagasaki. Dabei handelt es sich um Dosiswerte, die deutlich über diejenigen liegen, die Einzelpersonen der Bevölkerung oder berufliche exponierte Personen in einem Arbeitsleben akkumulieren. Im Niedrig-Dosisbereich ( $< 100$  mSv) gibt es zu wenige Messdaten, um präzise Aussagen zur Dosis-Wirkungsbeziehung tätigen zu können. Daher wird für den Niedrig-Dosisbereich der konservative Ansatz eines linearen Modells gewählt. Die Geradensteigung des linearen Modells wird *Strahlenrisiko-Koeffizient*  $r_S$  genannt. Ist die erhaltene effektive Dosis  $E$  für eine Person bekannt, kann das Risiko  $R_S$  für das Auftreten einer sogenannten stochastischen Strahlenwirkung (Krebs) berechnet werden über:  $R_S = r_S \cdot E$ . Für die Gesamtbevölkerung wird der Todesfallstrahlenrisiko-Koeffizient mit 5 % pro Sv angegeben. Das Risiko  $R_S$  ist ein zusätzliches Risiko, das zu dem Risiko hinzuaddiert werden muss, an spontan induziertem Krebs zu erkranken und zu sterben.

Im Rahmen solcher Risikobetrachtungen können verschiedene Szenarien, denen Personen ausgesetzt sein können, vergleichend und auf sachlicher Grundlage bewertet werden. Beispielsweise könnten die Todesfallrisiken für das regelmäßige Fliegen, das Autofahren und die berufliche Tätigkeit als strahlenexponierte Person in einem Kernkraftwerk verglichen werden. Diskussionen über die gesundheitlichen Risiken durch eine Strahlenexposition sollten stets auf diese sachliche Weise geführt werden.

---

### 4 Energiedosis

---

Die Energiedosis  $D$  ist definiert als die pro Masseneinheit  $\Delta m$  deponierte Energie  $\Delta W_{abs}$ .

$$D = \frac{\Delta W_{abs}}{\Delta m} \quad [D] = 1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (4)$$

---

## 5 Äquivalentdosis

---

Die biologische Wirksamkeit ionisierender Strahlung hängt von der Energiedosis und der Art der Strahlung ab. Unterschiedliche Strahlenarten und Strahlenenergien haben daher eine quantitativ unterschiedliche biologische Wirksamkeit. Diese wird durch die Einführung des sogenannten Strahlungs-Wichtungsfaktor  $Q$  berücksichtigt. Die Äquivalentdosis  $H$  ergibt sich damit aus:

$$H = Q \cdot D \quad [H] = 1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}. \quad (5)$$

Der Strahlungs-Wichtungsfaktor  $Q$  hängt von der Energie und der Art der Strahlung ab und ist in der folgenden Tabelle in Abhängigkeit der Teilchenart und -energie angegeben. Die Äquivalentdosis ist in der Personendosimetrie, wenn also Dosis am Körper bestimmt wird, gleichbedeutend mit der Organdosis der Haut.

**Tabelle 1:** Strahlungs-Wichtungsfaktor  $Q$  in Abhängigkeit von der Teilchenart und -energie

Art	Energiebereich	$Q$
Photonen	alle Energien	1
Elektronen und Myonen	alle Energien	1
Neutronen	< 10 keV	5
	10 keV bis 100 keV	10
	> 100 keV bis 2 MeV	20
	> 2 MeV bis 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonen (außer Rückstoßprotonen)	> 2 MeV	5
$\alpha$ -Teilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne		20

---

## 6 Umgebungs-Äquivalentdosis

---

Die Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  ist definiert als das Produkt der Energiedosis, die in 10 mm Tiefe einer weichteiläquivalenten ICRU-Kugel gemessen wird, und dem Qualitätsfaktor  $Q$ :

$$H^*(10) = Q \cdot D(10). \quad (6)$$

Die ICRU-Kugel (International Commission on Radiation Units) hat einen Durchmesser von 30 cm und die Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$ . Sie besteht zu 76,2 % aus Sauerstoff, 11,1 % aus Kohlenstoff, 10,1 % aus Wasserstoff und 2,6 % aus Stickstoff (Gewichtsanteile)

Dosismessgeräte, die die Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$  messen, sind entsprechend kalibriert. Das bedeutet, dass jeder Messwert eines solchen Dosismessgerätes dem Ergebnis einer Messung mit der ICRU-Kugel entspricht.

---

## 7 Effektive Dosis

---

Die Effektive Dosis  $E$  ist ein Maß für das mit einer Strahlenexposition verbundene Risiko für das Auftreten einer stochastischen Strahlenwirkung (z.B. Leukämie oder Krebs). Sie ist definiert als Summe der mit den zugehörigen Gewebewichtungsfaktoren  $w_T$  multiplizierten Organdosen  $H_T$  in den relevanten Organen und Geweben [7, 8]:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T. \quad (7)$$

---

## 8 Praktischer Strahlenschutz

---

Tätigkeiten mit radioaktiven Quellen sollen stets nach dem ALARA-Prinzip organisiert werden. ALARA meint: **As Low As Reasonably Achievable**; zu deutsch: So wenig Dosis abbekommen, wie vernünftigerweise machbar. Darüber hinaus sollen folgende 5 Grundregeln im praktischen Umgang mit Quellen beachtet werden:

- Aufenthaltsdauer minimieren,
- Abstand halten,
- Abschirmung verwenden,
- Aktivität begrenzen,
- Aufnahme vermeiden.

Die letzten beiden Merkgelgen spielen für das Praktikum nur eine untergeordnete Rolle, weil die Quellenaktivitäten fest vorgegeben sind, und eine Aufnahme schon dadurch verhindert werden sollte, dass die Studierenden die Quellen nicht handhaben dürfen.

Da die Intensität ionisierender Strahlung mit  $1/(\text{Entfernung})^2$  abnimmt, besteht die einfachste Maßnahme zur Reduktion einer Exposition im **Abstand halten!** Praktisch wird jede ionisierende Strahlung beim Durchgang durch Materie geschwächt oder absorbiert. Dabei wird  $\gamma$ - oder Röntgenstrahlung durch Materialien mit hoher Kernladungszahl wie z. B. Blei bedeutend stärker geschwächt als etwa durch Holz gleicher Dicke.  $\alpha$ -Strahlen haben nur sehr kurze Reichweiten (einige cm in Luft) und lassen sich durch ein Blatt Papier abschirmen. Neutronen lassen sich durch Stöße mit etwa gleich schweren Atomkernen (wasserstoffreiche Materialien) abbremsen, dem entsprechend ist die Verwendung von Blei zur Abschirmung von Neutronen (mit Energie  $\leq 2$  MeV) nicht sinnvoll. In geeigneten Substanzen wie z.B. Kadmium können Neutronen in den Atomkernen eingefangen werden. Viele Substanzen werden jedoch durch die Neutronenbestrahlung selbst radioaktiv!

---

## 9 Natürliche und zivilisatorische Strahlenbelastung, gesetzliche Grenzwerte

---

Die natürliche Strahlenbelastung durch ionisierende Strahlung betrug 2004 ca. 2 mSv/a (Effektive Jahresdosis). Dies ist ein Mittelwert, der über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland gebildet wurde. Sie setzt sich wie folgt zusammen (in mSv/a).

Zusätzlich zur natürlichen beträgt die mittlere zivilisatorische Strahlenbelastung in Deutschland weitere etwa 2 mSv/Jahr, mehr als 90% davon aus medizinischen Anwendungen! Die Effektive Dosis (bei Standard-Patienten mit ca. 70 kg Körpergewicht) liegt bei weniger als 10  $\mu$ Sv für eine Zahnaufnahme bis zu 20 mSv für eine Untersuchung der Schlagader. Eine Computertomografie des Kopfes resultiert in etwa 2 ... 4 mSv, des Bauchraumes in etwa 10 ... 25 mSv [5]. Aber z. B. auch Flugreisen tragen mit 4  $\mu$ Sv/Flugstunde zur zivilisatorischen Strahlenbelastung bei. Die letale Dosis beträgt ca. 6 Sv.

### Dosisgrenzwerte für Ganzkörperbestrahlung:

Für die allgemeine Bevölkerung darf die zusätzliche Strahlenbelastung durch Anlagen in der Umgebung nicht mehr als 1 mSv pro Kalenderjahr betragen (Daueraufenthalt!).

**Tabelle 2:** Dosisgrenzwerte für Ganzkörperbestrahlung.

Bezeichnung/Einstufung	Effektive Dosisleistung
Personen der Bevölkerung	$\leq 1$ mSv/a
beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B	$\leq 6$ mSv/a
beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A	$\leq 20$ mSv/a
einmalig max. 50 mSv, danach innerhalb von 5 Jahren nicht mehr als 100 mSv	

Die angegebenen Dosisleistungen sind *zusätzlich* zur Umgebungsstrahlung anzusetzen.

---

## 10 Klassifizierung von Strahlenschutzbereichen

---

Den Dosisgrenzwerten für Ganzkörperbestrahlung entsprechend werden Strahlenschutzbereiche definiert, siehe Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Einteilung der Strahlenschutzbereiche.

Bezeichnung	Dosisleistung	Anmerkung
Überwachungsbereich	> 1 mSv/a (Effektive Dosis)	bei 2000 h/a Jahresarbeitszeit
Kontrollbereich	> 6 mSv/a (Effektive Dosis)	bei 2000 h/a Jahresarbeitszeit $\hat{=}$ 3 $\mu$ Sv/h Ganzkörperbestrahlung
Sperrbereich	> 3 mSv/h (Ortsdosis)	= 3000 $\mu$ Sv/h

Die in den Praktikumsräumen vorliegende Dosisleistung ist so gering, dass eine Überwachung nicht erforderlich ist. Auch die maximal zu erwartende Dosis für die Betreuer erfordert keine Einstufung als beruflich strahlenexponierte Person.

---

### Literatur

---

- [1] *Strahlenschutzgesetz vom 27.6.2017*, Bundesgesetzblatt (BGBl. I S. 1966; zuletzt durch Artikel 3b des Gesetzes vom 28.April 2020 (BGBl. I S. 960) geändert) <https://www.gesetze-im-internet.de/strlsg/>
- [2] *Strahlenschutzverordnung vom 29.11.2018*, Bundesgesetzblatt (BGBl. I S. 2034, 2036; durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert) [https://www.gesetze-im-internet.de/strlsv\\_2018/](https://www.gesetze-im-internet.de/strlsv_2018/)
- [3] *Grundlagen des Strahlenschutzes*; E. Sauter, Thieming-Taschenbücher, Band 95/96 (1982)
- [4] *Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz*; W. Petzold, B. G. Teubner Stuttgart (1983)
- [5] *Strahlung und Strahlenschutz*; Bundesamt für Strahlenschutz, [www.bfs.de](http://www.bfs.de) (2004)
- [6] allg. Praktikumliteratur (Lehrbuchsammlung der Physikalischen Bibliothek)
- [7] *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*; H. Krieger, Springer Spektrum, 2019.
- [8] *Grundzüge des Strahlenschutzes*; H.-G. Vogt, H. Schultz, Hanser-Verlag, 2011.