

# SEMINARARBEIT

aus dem W-Seminar

## Kerntechnik und Kernchemie

Thema der Seminararbeit:

### **Die biologischen Wirkungen radioaktiver Strahlung**

Verfasser: Schreiber, Felix  
Kursleiter: Weiß, Raphael, StR  
Abgabetermin: 07. November 2023

Bewertung der schriftlichen Arbeit: ..... Punkte in Worten: .....  
Bewertung der Präsentation: ..... Punkte in Worten: .....  
Gesamtbewertung ((3x schriftlich + 1x mündlich) : 2): ..... Punkte  
Abgabe beim Oberstufenkoordinator am: .....

.....  
Unterschrift des Kursleiters

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| 1 Einleitung .....                                    | 1  |
| 2 Dosisgrößen: Einordnung von Strahlungswirkung ..... | 2  |
| 2.1 Energiedosis .....                                | 2  |
| 2.2 Äquivalentdosis .....                             | 2  |
| 2.3 Organdosis .....                                  | 2  |
| 2.4 Effektive Dosis .....                             | 3  |
| 2.5 LET und Bragg-Peak .....                          | 3  |
| 3 Eindringen von Strahlung in den Organismus .....    | 4  |
| 4 Unterscheidung der Auswirkungen .....               | 5  |
| 4.1 Deterministische Strahlenwirkung .....            | 5  |
| 4.2 Stochastische Strahlenwirkung .....               | 5  |
| 4.3 Somatische Strahlenwirkung .....                  | 5  |
| 5 Auswirkungen auf den Menschlichen Körper .....      | 7  |
| 5.1 Bezogen auf den ganzen Körper .....               | 7  |
| 5.2 Strahlenwirkungen auf Organe .....                | 7  |
| 5.3 Strahlenwirkungen auf einzelne Zellen .....       | 7  |
| 6 Hormesis: Mögliche positive Wirkungen .....         | 9  |
| 7 Schlusswort .....                                   | 10 |
| 8 Anhang .....  | 11 |
| Bibliographie .....                                   | 12 |

## 1 Einleitung

Strahlung - Ein sehr simples Wort, auf den ersten Blick. Daraus könnte man den zunächst nicht sonderlich falschen Schluss ziehen, die Thematik dahinter sei ebenso „einfach“. Aber wäre das der Fall, dann würde diese Arbeit nicht existieren. Doch was ist nun diese „Strahlung“? Der Begriff ist sehr vielfältig: elektromagnetische Strahlung wie Licht, Mikrowellenstrahlung in, wie wahrscheinlich schon vermutet, Mikrowellen-Öfen, und natürlich auch die radioaktive Strahlung, um die es in diesem Werk hauptsächlich geht. Entdeckt wurde Radioaktivität bereits vor etwa 128 Jahren, also Ende des 19ten Jahrhunderts durch Henri Becquerel, der durch Zufall darauf stieß und erhielt dafür, zusammen mit dem Curie-Ehepaar, den Physik-Nobelpreis. Damals waren jedoch die Auswirkungen der Strahlung auf biologische Organismen wie den Menschen noch nicht erforscht, was unter anderem in Dingen wie „Uran-Zahnpasta“ resultierte. Mittlerweile ist die Forschung zur Strahlenwirkung etwas fortgeschrittener und somit sind auch Wecker mit Uranfarbe für einen schönen Leuchteffekt glücklicherweise nichts alltägliches mehr. Die Gründe dafür und wie genau Bestrahlung mit radioaktiven Teilchen sich auf diverse Organismen auswirkt ist das Thema dieser Arbeit und damit der folgenden Kapitel.

## 2 Dosisgrößen: Einordnung von Strahlungswirkung

Als Grundlage für das Einordnen unterschiedlicher Strahlungsarten und deren Auswirkungen dienen die so genannten „Dosisgrößen“ (*Dosisgrößen und die Wirkung der Strahlung*; *Medizinphysik-Wiki: Biologische Strahlenwirkung*; Volkmer, Kapitel 5). Diese ermöglichen es, allgemeine Aussagen über die Interaktion zwischen Materie und Strahlung zu treffen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Strahlenwirkung damit darzustellen: Die Energiedosis (Abschnitt 2.1), Äquivalentdosis (Abschnitt 2.2), Organdosis (Abschnitt 2.3) und die effektive Dosis (Abschnitt 2.4). Abschnitt 2.5 beschäftigt sich mit dem linearen Energietransfer (LET) und dem Phänomen des „Bragg-Peak“.

### 2.1 Energiedosis

Die Energiedosis, angegeben in Gray (Gy), beschreibt die aufgenommene Energie pro Masse (*Dosisgrößen und die Wirkung der Strahlung*):

$$D = \frac{E}{m}$$

Bei Abhängigkeit von der Strahlungsart  $R$  wird mit dem Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$  multipliziert, und bei einbeziehen des Gewebetyps muss zusätzlich mit dem Gewebe-Wichtungsfaktor  $w_T$  skaliert werden.

### 2.2 Äquivalentdosis

Allein mit der Energiedosis (Abschnitt 2.1) lässt sich noch keine Aussage über die Interaktion von Strahlung mit Materie treffen, weswegen man diese mit dem Qualitätsfaktor  $Q$ , abhängig von der Art der Strahlung  $R$ , skalieren muss. Somit ergibt sich die Äquivalentdosis, gemessen in Sievert (Sv):

$$H_R = Q_R * D_R$$

Zu beachten ist, dass auch die Energiedosis ( $D$ ) hier ebenfalls von  $R$  abhängig ist.

### 2.3 Organdosis

Die in Abschnitt 2.2 beschriebene Äquivalentdosis kann noch mit einem vom jeweiligen Organ abhängigen Gewebe-Wichtungsfaktor ( $w_T$ ) multipliziert werden (*StrlSchV - Anlage 18 (zu den §§ 171, 197) - Dosis- und Messgrößen*). Damit kann die Wirkung

einer gewissen Energiedosis auf ein bestimmtes Organ dargestellt werden, auch die Organdosis oder Organ-Äquivalentdosis genannt:

$$H_{T,R} = w_R * D_{T,R}$$

wobei  $w_R$  der jeweilige Strahlungs-Wichtungsfaktor ist. Bei mehreren verschiedenen Strahlungsarten bildet sich die Organdosis aus der Summe aller Organdosen der unterschiedlichen Strahlungsarten:

$$H_T = \sum_R H_{T,R} = \sum_R w_R * D_{T,R}$$

## 2.4 Effektive Dosis

Die so genannte effektive Dosis, oder auch effektive Äquivalentdosis lässt sich durch das Summieren aller Organdosen (Abschnitt 2.3) errechnen. Dadurch wird die Gesamtwirkung auf den menschlichen Organismus näherungsweise modelliert:

$$E = \sum_T w_T * H_T$$

## 2.5 LET und Bragg-Peak

Der LET (lineare Energietransfer)  $L$  beschreibt die Energie  $\Delta E$  entlang des Weges des „Primärstrahls“ über der zurückgelegten Strecke  $\Delta s$ :

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta s}$$

Angegeben wird  $L$  normalerweise in  $\frac{\text{keV}}{\mu\text{m}}$  (Hall und Giaccia, S. 104).

Ein mit dem LET verbundener Effekt, der häufig für medizinische Zwecke angewandt wird, wird als „Bragg-Peak“ bezeichnet. Dieses Phänomen tritt beim Abbremsen des Strahlungsteilchens in Materie auf, wobei ein Großteil der Energie abgegeben wird. Praktische Anwendung findet sich hierbei in der Partikeltherapie: das Teilchen gibt beim Eindringen fast keine Energie ab; erst beim Verlangsamen im Zielpunkt ergibt sich eine höhere Dosis.

### 3 Eindringen von Strahlung in den Organismus

Um sich auf Materie oder einen Organismus auswirken zu können muss Strahlung in denselben zunächst eindringen (*Dosisgrößen und die Wirkung der Strahlung; Leifiphysik: Biologische Strahlenwirkung; Volkmer, Kapitel 7.5*). Hierbei unterscheidet man zwischen zwei Ausgangssituation: Eindringen von Außen oder von Innen. In Bezug auf den menschlichen Körper kann die Strahlung von Außen durch die Haut eindringen. Dabei ist der Effekt stark von der Art der Strahlung abhängig: während  $\alpha$ -Teilchen nicht in die Haut eindringen können, durchdringt  $\beta$ -Strahlung diese wenige Millimeter.  $\gamma$ - und Neutronen-Strahlung hingegen können tief in den Körper eindringen, wobei sie Prozesse wie Zellteilung u.ä. beeinflussen können. Die Aufnahme von Strahlung von innerhalb wird als „Inkorporation“ bezeichnet: Hierbei wird zwischen „Ingestion“ und „Inhalation“ unterschieden. Bei der Ingestion nimmt man Strahlung bzw. radioaktive Teilchen über die Nahrung auf; bei der Inhalation über die Atemluft und damit über die Lunge. In beiden Fällen ist die Wirkung extremer als bei der reinen äußeren Einwirkung, da hier der Weg zu vitalen Organen verkürzt ist. Außerdem können  $\alpha$ -Teilchen, die energiereicher sind als  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Strahlung, aufgrund des „Bragg-Peaks“ (Abschnitt 2.5) viel mehr Schaden anrichten als von außerhalb.

## 4 Unterscheidung der Auswirkungen

### 4.1 Deterministische Strahlenwirkung

Auswirkungen radioaktiver Strahlung, die erst ab einem gewissen Schwellwert auftreten, werden „deterministisch“ genannt (*Dosisgrößen und die Wirkung der Strahlung*; *Medizinphysik-Wiki: Biologische Strahlenwirkung*; *Leifiphysik: Biologische Strahlenwirkung*; *BFS: Strahlenwirkungen*, „Wie wirkt Strahlung?“). So sind unter diesem Wert keine beobachtbaren Schäden oder sonstige Auswirkungen erkennbar, ab dem Grenzwert steigt die Ausprägung mit der Dosis. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit, dass Schäden entstehen, unabhängig vom Volumen bzw. der Oberfläche, die bestrahlt wird. Beispiele für deterministische Strahlenschäden sind Katarakte (grauer Star) und Hautrötung. Ein typischer Schwellwert für menschliches Gewebe liegt bei etwa 500mSv. Die Auswirkungen sind schon nach relativ kurzer Zeit sichtbar, im Vergleich zu stochastischen (Abschnitt 4.2) oder somatischen Schäden (Abschnitt 4.3).

### 4.2 Stochastische Strahlenwirkung

Wenn Strahlenschäden zufällig, also nicht einem Muster oder irgendwelchen Faktoren folgend auftreten, so spricht man von stochastischer Strahlenwirkung (*Dosisgrößen und die Wirkung der Strahlung*; *Medizinphysik-Wiki: Biologische Strahlenwirkung*; *Leifiphysik: Biologische Strahlenwirkung*; *BFS: Strahlenwirkungen*, „Wie wirkt Strahlung?“). Hier ist im Gegensatz zu den deterministischen Auswirkungen (Abschnitt 4.1) die Wahrscheinlichkeit direkt von der bestrahlten Fläche bzw. vom bestrahlten Volumen abhängig und dazu proportional, jedoch ist die Schwere der Schäden davon unabhängig. Es gibt keinen Schwellwert, und das Auftreten kann um Monate bis Jahre verzögert sein, weswegen man auch von Langzeitschäden spricht. Dazu zählen Krebserkrankungen („Karzinogenese“ und somatische Schäden, Abschnitt 4.3) und vererbte genetische Schäden („hereditär“).

### 4.3 Somatische Strahlenwirkung

Als Unterklasse der stochastischen Strahlenschäden (Abschnitt 4.2) existieren neben den genetisch vererbten Auswirkungen noch die somatischen Strahlenschäden (Volkmer, Kapitel 6.5). Hierbei wird noch einmal in Früh- und Spätschäden unterschieden, wobei die Frühschäden gleichbedeutend mit deterministischen Wirkungen sind

(siehe Abschnitt 4.1). Unter spät auftretende Auswirkungen fallen Krebserkrankungen und Leukämie; und wie schon in Abschnitt 4.2 erwähnt treten diese unabhängig vom bestrahlten Volumen oder einem Schwellwert auf.



## 5 Auswirkungen auf den Menschlichen Körper

### 5.1 Bezogen auf den ganzen Körper

Im Bezug auf den gesamten Körper gibt es verschiedene Symptome (*Leifiphysik: Biologische Strahlenwirkung*; Volkmer, Kapitel 6.5; *BFS: Strahlenwirkungen*, „Folgen eines Strahlenunfalls“; *EPA: Radiation Basics*, „Radiation Health Effects“): wenn man von deterministischen Schäden spricht (Abschnitt 4.1), hängen die Auswirkungen von der Strahlenmenge ab. Bei einer Dosis von etwa 0,25 Sv sinkt die Zahl der Lymphozyten, das Blutbild verändert sich für kurze Zeit. Ab 1 Sv kommt es zur vorübergehenden Strahlenkrankheit, auch „Strahlenkater“ genannt. In dieser Phase kann es nach ein paar Wochen zu Haarausfall, Hautrötungen und weiteren deterministischen Schäden kommen. Zur schweren Strahlenkrankheit kommt es ab etwa 4 Sv, die in etwa 50% der Fälle bei Nicht-Behandlung zum Tod führt. Dabei verschwinden fast alle Lymphozyten wodurch das Infektionsrisiko mit herkömmlichen Krankheiten steigt. Des Weiteren kann es zu inneren Blutungen, Fieber, Sterilität (Männer) oder Zyklusstörungen (Frauen) kommen. Die letale Dosis liegt bei etwa 7 Sv. Diese Menge Strahlung führt, selbst bei medizinischer Behandlung, in fast allen Fällen zum Tod. Zunächst kommt es wie bei den vorherigen Schwellwerten in den ersten Tagen zu Übelkeit und Erbrechen, dann zu großflächigen Entzündungen in der Schleimhaut, zu Fieber und schnellem verlieren der Kräfte und schließlich zum Tod.

### 5.2 Strahlenwirkungen auf Organe

Die Auswirkungen auf einzelne Organe (Volkmer, Kapitel 6.6) werden mitunter durch spezifische Milieufaktoren und relative Strahlenempfindlichkeit bestimmt: Somit sind Organe wie rotes Knochenmark, Lunge und Keimdrüsen für Strahlung empfindlicher als zum Beispiel die Haut.

### 5.3 Strahlenwirkungen auf einzelne Zellen

Auf der Zellebene (*Medizinphysik-Wiki: Biologische Strahlenwirkung*) lässt sich der Prozess von Strahlenschäden in 4 Phasen unterteilen: die **physikalische**, **physikochemische**, **chemische** und **biologische** Phase. In der physikalischen Phase werden durch Interaktion mit Strahlung Biomoleküle ionisiert, was zur Modifikation oder Zerstörung des Moleküls führt. Bei einer Modifikation kommt es in der physikochemischen

Phase entweder zur Rekombination, oder zur Ausbildung freier Radikale, die dann weitere Prozesse anstoßen. In der chemischen Phase wird durch Wechselwirkungsprozesse unter anderem auch das Zellwasser verändert. Hierbei entstehen wieder freie Radikale und andere Spaltprodukte. Dieser Prozess wird Radiolyse genannt. In der letzten, der biologischen Phase, kommt es schließlich zur Zerstörung von DNS, Proteinen und Aminosäuren, was zu Mutationen oder dem Tod der Zelle führen kann. Die Zelle kann jedoch auch wieder vollständig durch Prozesse wie Glykosylase, Endonuklease, Polymerase und Ligase repariert werden. Das muss keine Folgen nach sich ziehen, kann aber auch zu den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Spätfolgen führen.

## **6 Hormesis: Mögliche positive Wirkungen**

Die als Hormesis (*BFS: Strahlenwirkungen*, „Mögliche positive Wirkungen ionisierender Strahlung - Hormesis“) bezeichneten positiven Wirkungen radioaktiver Strahlung ist ein noch sehr unerforschtes Gebiet der Strahlenwirkungen und zusätzlich sehr umstritten. So wurden in wenigen Fällen positive Auswirkungen von Bestrahlung beobachtet, wie eine Beschleunigung von Wachstums- und Entwicklungsprozessen, Anregung von Reparaturvorgängen auf Zellebene oder die Konditionierung von Zellen auf Radioaktivität. Wie schon gesagt bleibt Hormesis jedoch stark umstritten, da diese positiven Wirkungen nur in Einzelfällen zu beobachten sind und in vergangenen Studien nur sehr selten aufgetreten sind, und wenn dann meistens in künstlichen Umgebungen, wie zum Beispiel das Entnehmen von Lymphozyten um diese im Labor zu testen.

## **7 Schlusswort**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Strahlenwirkungen sehr variabel auftreten können, sich vielfältig auswirken und sehr oft nicht mit Sicherheit vorhersagbar sind. Zwar kann man in Fällen von deterministischen oder Frühschäden sehr genau sagen ab wann und ab welchem Strahlungs-Wert welche Wirkungen auftreten, wenn es jedoch zu stochastischen oder genetischen, vererbbaaren Schäden kommt wird es beinahe unmöglich sichere Vorhersagen zu treffen. Die Schäden, die durch Strahlung entstehen können von einfachen Hautrötungen und Haarausfall bis hin zu Krebserkrankungen und Leukämie reichen können und, zumindest bei Frühschäden, bis zu einem bestimmten Punkt auch noch medizinisch behandelt werden können. Und es könnte zwar auch mögliche positive Auswirkungen geben, diese sind jedoch nicht nachweisbar, geschweige denn erforscht.

## 8 Anhang

Hier im Anhang möchte ich mich noch für die doch sehr kurz geratene Arbeit entschuldigen; man fängt schnell an, die eigene verfügbare Zeit und Konzentration maßlos zu überschätzen. Dazu kommt noch, dass die Motivation um einiges sinkt, wenn man nicht wirklich viel Interesse an einem Thema hat. Da hab in erster Linie nur ich selbst Schuld daran, ich hatte aber von Anfang an schon, also bei der Wahl der Themen, keine wirkliche Idee, in welche thematische Richtung die Seminararbeit gehen sollte, was nicht wenig daran lag, dass ich mir nicht richtig überlegt hatte, ob dieses W-Seminar wirklich das richtige für mich wäre. Trotz allem habe ich mir (beim Exposé viel zu viel) Mühe gegeben, richtig zu recherchieren und keine falschen Fakten mit aufzunehmen und mich so gut es ging an die Vorgaben zu halten.

Die digitale Version der Arbeit finden Sie unter folgendem Link:

<https://github.com/Scriptor25/Seminararbeit>

(Geschrieben wurde die Seminararbeit in Typst (<https://github.com/typst/typst>))

## Bibliographie

- BFS: Strahlenwirkungen.* Bundesamt Für Strahlenschutz, [https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/wirkung\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/wirkung_node.html). Zugegriffen 2. Mai 2023
- Dosisgrößen und die Wirkung der Strahlung.* UM Baden-Württemberg, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/kernenergie/strahlenschutz/informationen-zum-strahlenschutz/radioaktivitaet-und-ionisierende-strahlung/dosisgroessen-und-die-wirkung-der-strahlung>. Zugegriffen 2. Mai 2023
- EPA: Radiation Basics.* United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics>. Zugegriffen 2. Mai 2023
- Hall, Eric J., und Amato J. Giaccia. *Radiobiology for the Radiologist*. 7. Aufl., 2011
- Leifiphysik: Biologische Strahlenwirkung.* Leifiphysik, <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-einfuehrung/grundwissen/biologische-strahlenwirkung>. Zugegriffen 2. Mai 2023
- Medizinphysik-Wiki: Biologische Strahlenwirkung.* Medizinphysik Wiki, <https://medizinphysik.wiki/grundlagen/biologische-grundlagen/>. Zugegriffen 2. Mai 2023
- StrlSchV - Anlage 18 (zu den §§ 171, 197) - Dosis- und Messgrößen.* Bundesamt für Justiz, [https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv\\_2018/anlage\\_18.html](https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/anlage_18.html). Zugriffen 2. November 2023
- Volkmer, M. *Radioaktivität und Strahlenschutz*. 2012

**Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.**

....., den .....  
Ort Datum Unterschrift des Schülers