



universität  
wien

# DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

## Vorhersagbare und zufällige Radioaktivität

verfasst von / submitted by

Tanja Handler

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements  
for the degree of

Magistra rer.nat.

Wien, 2018 / Vienna, 2018

Studienkennzahl lt.Studienblatt/  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

A 190 406 412

Studienrichtung lt.Studienblatt/  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Lehramtsstudium UniStG  
UF Mathematik UniStG  
UF Physik UniStG

Betreut von / Supervisor:

ao.Univ.-Prof.Mag.Dr.Peter Raith

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, am 03.05.2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Radioaktive Strahlungsarten</b>	<b>1</b>
1.1	Ionisierende Strahlung . . . . .	1
1.2	Anregung eines Atom . . . . .	2
1.3	Hüllenstrahlung . . . . .	3
1.4	Nuklide . . . . .	4
1.5	Radioaktive Umwandlungen . . . . .	5
1.6	Natürliche Zerfallsreihen . . . . .	6
1.6.1	Uran-Radium-Reihe . . . . .	7
1.6.2	Thoriumreihe . . . . .	7
1.7	Der Alphazerfall . . . . .	7
1.8	Der Betazerfall . . . . .	9
1.9	Die Gammastrahlung . . . . .	10
1.10	Wechselwirkung mit Materie . . . . .	11
1.10.1	$\gamma$ -Strahlung - Wechselwirkung und Schwächung . . . . .	11
1.10.2	Wechselwirkungen von $\alpha$ -Strahlung mit Materie . . . . .	12
1.10.3	Wechselwirkung von $\beta$ -Strahlung mit Materie . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Das Zerfallsgesetz</b>	<b>14</b>
2.1	Herleitung des Zerfallsgesetzes . . . . .	14
2.1.1	Mathematischer Beweis . . . . .	16
2.2	Zerfallskonstante und Halbwertszeiten bei alternativen Zerfällen	19
2.2.1	Zerfallsalternativen von $^{212}\text{Wismut}$ . . . . .	20
2.3	Die biologische Halbwertszeit . . . . .	21

2.3.1	Anwendung der effektiven Halbwertszeit bei einer Nu- klearmedizinischen Untersuchung . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Abnahme- und Wachstumsprozesse im Mathematikunterricht</b>	<b>23</b>
3.1	Beispiel . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Dosimetrie und Strahlenschutz</b>	<b>26</b>
4.1	Dosisgrößen . . . . .	26
4.1.1	Energiedosis als Beispiel für Dosisgrößen . . . . .	27
4.1.2	Dosisgrößen und Strahlenschutz . . . . .	27
4.2	Effektive Dosis . . . . .	28
4.3	Regeln zur Verringerung der Strahlenexposition in der Praxis .	29
<b>5</b>	<b>Strahlenbiologie</b>	<b>31</b>
5.1	Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlung . . . . .	31
5.2	Deterministische Strahlenschäden . . . . .	33
5.3	Stochastische Schäden . . . . .	34
5.4	Strahlenschäden . . . . .	37
5.5	Strahlenbelastung . . . . .	39
5.5.1	Bestrahlung und Kontamination . . . . .	39
5.5.2	Inkorporation . . . . .	40
5.6	Strahlenkrankheit . . . . .	40
5.7	Belastung durch ionisierende Strahlung im Alltag . . . . .	41
5.7.1	Natürliche Strahlenquellen . . . . .	42
5.7.2	Weitere Strahlenquellen . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Der Super-GAU in Tschernobyl</b>	<b>44</b>
6.1	Beschreibung des Kernkraftwerks in der Stadt Tschernobyl . .	45
6.2	Die Nacht vom 25.April . . . . .	45
6.3	Bekanntgabe und Maßnahmen . . . . .	47
6.4	Die Umgebung von Tschernobyl heute . . . . .	49
6.5	Auswirkungen . . . . .	50
6.6	Gesundheitliche Auswirkungen . . . . .	51

<b>7</b>	<b>Andwendungen radioaktiver Strahlung</b>	<b>53</b>
7.1	MedAustron - Ionentherapie im Kampf gegen den Krebs . . .	53
7.1.1	Die Gewinnung des Partikelstrahls . . . . .	53
7.1.2	Warum Ionentherapie? . . . . .	55
7.1.3	Indikationen . . . . .	56
7.2	Beschleuniger . . . . .	57
7.3	Kernreaktoren . . . . .	58
7.3.1	Allgemeine Informationen . . . . .	58
7.3.2	Aufbau eines Reaktors . . . . .	59
<b>8</b>	<b>Die radioaktive Strahlung als stochastischer Prozess</b>	<b>61</b>
8.1	Allgemein . . . . .	61
8.2	Ideales Zufallsexperiment . . . . .	61
8.3	Ergebnismenge . . . . .	62
8.4	Ereignis . . . . .	62
8.5	Zufallsvariable . . . . .	62
8.6	Die Poisson-Verteilung . . . . .	63
8.6.1	Eigenschaften der Poissonverteilung . . . . .	63
8.6.2	Die Poisson-Verteilung - eine weitere Darstellung in Verbindung mit Radioaktivität . . . . .	64
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>67</b>
9.1	Abstract - Deutsch . . . . .	67
9.2	Abstract - Englisch . . . . .	68
9.3	Abbildungsverzeichnis . . . . .	68
9.4	Formelverzeichnis . . . . .	70
<b>10</b>	<b>Danksagung</b>	<b>73</b>

# Kapitel 1

## Radioaktive Strahlungsarten

### 1.1 Ionisierende Strahlung

Spricht man von radioaktiver Strahlung so wird diese auch häufig als ionisierende Strahlung bezeichnet.

Unter Ionisation versteht man, dass ein oder mehrere Elektronen aus der Atomhülle entfernt werden. Hierfür muss man einem Elektron mindestens soviel Energie zuführen wie seine Bindungsenergie entspricht, damit es die Elektronenhülle verlassen kann. Dies lässt sich vergleichen mit der Situation, dass man beispielsweise etwas aus einem Loch anheben will, dafür benötigt man Hubarbeit als gegengesetzte Kraft zur Erdanziehung, damit dies möglich ist. Dasselbe passiert natürlich auch mit Teilchen bzw. Atomen. Nach einer Ionisation entsteht in der Ursprungsschale des Elektrons dann eine Defektstelle beziehungsweise ein sogenanntes Elektronenloch. Aufgrund dessen ist das Atom dann einfach positiv geladen.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 65)*

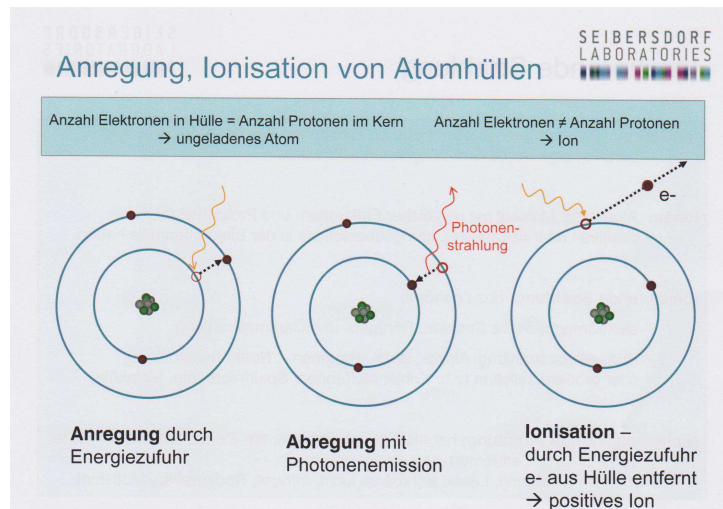


Abbildung 1.1: Ionisation<sup>1</sup>

## 1.2 Anregung eines Atom

Unter Anregung versteht man jenen Vorgang, bei dem ein Elektron durch Energiezufuhr auf etwaige äußere Schalen gehoben wird, insofern auf diesen noch Platz für ein Elektron ist. Dabei wechselt das Elektron also nur seinen Platz in der Elektronenhülle und verlässt diese nicht wie beispielsweise bei der Ionisation.

Die Energie, die dem Elektron zugeführt wird ist also kleiner als die Bindungsenergie. Die hierfür benötigte Energie, damit ein Elektron von einer Schale auf eine andere springen kann, ergibt sich aus der Differenz der Bindungsenergie der beiden betroffenen Schalen.

Für ein Elektron, welches vom Zustand  $n$  in einen Zustand  $m$  gehoben werden will, erhält man:

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 66)

$$E = E_n - E_m . \quad (1.1)$$

Bei der Anregung ändert sich also nur die Position bzw. die Anordnung der

Elektronen in der Hülle. Befinden sich alle Elektronen beispielsweise auf den energetisch niedrigsten Plätzen, dann befindet sich die Elektronenhülle im sogenannten Grundzustand. Dieser entspricht also jenen Zustand minimaler Gesamtenergie. Findet man ein oder mehrere Elektronen nicht auf ihren ursprünglich vorbehalten Plätzen vor, so spricht man vom Anregungszustand. (vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 66)

Zur ionisierenden Strahlung zählen die Röntgen- und Gammastrahlung sowie Alpha-, Beta-, Protonen-, Neutronenstrahlung oder beispielsweise Kohlenstoffionen.

Jene Strahlungsarten, welche nicht über ausreichend Energie verfügen, um Elektronen aus der Hülle von Atomen zu entfernen, werden als nicht ionisierend bezeichnet. Hierzu zählen zum Beispiel UV-Strahlung, sichtbares Licht und Mobilfunk.

(vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 8)

### 1.3 Hüllenstrahlung

Jener Elektronenzustand, bei dem durch Ionisation oder Anregung ein Elektron entfernt wird, enthält nach der Wechselwirkung ein Elektronenloch und die Hülle befindet sich somit in einem energetisch ungünstigen Zustand. Es wird versucht, das Elektronenloch durch Elektronen aus Zuständen mit geringer Bindungsenergie aufzufüllen. Dafür eignen sich besonders Elektronen der äußeren Schalen, wodurch wiederum ein neues Loch im energetisch höheren Zustand entsteht.

Das Elektronenloch wandert immer weiter bis in die äußerste Schale, da der energetisch günstigste Zustand angestrebt wird. Wenn in der äußersten Schale kein Elektron mehr verfügbar ist, so bleibt die Hülle ionisiert und das Atom verbindet sich zum Ladungsausgleich mit anderen Atomen.

Da bei diesem Vorgang also Elektronen von höheren, energetisch günstigeren



Schalen, in freie Plätze auf innere Schalen fallen, wird hier Energie ausgesandt und zwar die Differenz der Bindungsenergien der beiden beteiligten Zustände. Dieses Geschehen wird als Abregung der Atomhülle bezeichnet.

Hierbei wird allerdings unterschieden, ob es sich um einen Übergang zwischen verschiedenen Schalen  $n \neq m$  oder einen innerhalb der Unterschalen einer Schale  $n = m$  handelt.

Die dabei freiwerdende Energiedifferenz kann auf zwei Arten aus dem Atom emittiert werden. Eine Möglichkeit ist die Abstrahlung dieser Energie über Photonenstrahlung, eine andere ist die direkte Übertragung der Energiedifferenz auf weitere Hüllenelektronen.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 66ff)*

## 1.4 Nuklide

Als Nuklid wird eine durch Massezahl und Ordnungszahl bestimmte Atom-Sorte bezeichnet. Die Massezahl bezeichnet die Anzahl der Kernteilchen, also jene der Protonen und Neutronen eines Kerns gemeinsam.

Unter der Ordnungszahl versteht man die Anzahl der Protonen im Atomkern. Stabile Nuklide, also jene die nicht zu einer spontanen Kernumwandlung tendieren, gibt es nur bei ganz bestimmten Protonen-Neutronen Verhältnissen. Jene Nuklide, die jedoch zur spontanen Kernumwandlung neigen, werden als Radionuklide bezeichnet. Hierbei handelt es sich um radioaktive, also instabile Nuklide, wobei bei deren Zerfall radioaktive Strahlung ausgesandt wird.

*(vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 12)*

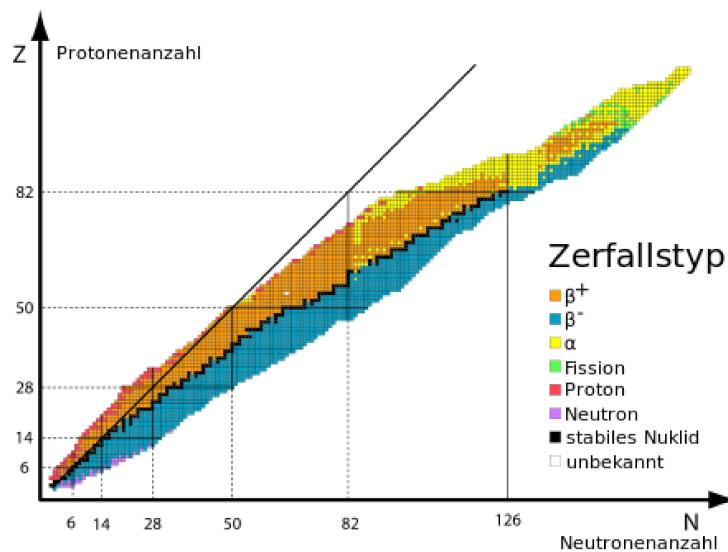


Abbildung 1.2: Nuklidkarte<sup>2</sup>

Zurzeit gibt es ungefähr 2700 bekannte Nuklide, 10% davon sind natürlich vorkommende Nuklide und 90% künstlich erzeugte. Die natürlich vorkommenden unterteilen sich wiederum in langlebige Urnuklide, etwa 40 der natürlich vorkommenden Nuklide gehören den natürlichen Zerfallsreihen an und dann gibt es noch jene, die in der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt werden.

(vgl. *Seibersdorf Academy, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie*, Stand: 09.12.2013, Folie 15)

## 1.5 Radioaktive Umwandlungen

Atomkerne werden als radioaktiv bezeichnet, wenn diese spontan unter der Aussendung von Strahlung von einem instabilen Zustand in einen stabileren übergehen. Dieser Prozess und die zeitliche Abfolge unterliegen einzig und alleine der Statistik und sind für einen Atomkern nicht vorhersagbar.

Wenn eine Kernumwandlung ohne vorherige Einwirkung auf den Atomkern stattfindet, so spricht man von natürlicher oder spontaner Radioaktivität.

Wird beispielsweise durch eine Kernreaktion das energetische Gleichgewicht

der Zerfallsprodukte gestört, so spricht man von künstlicher oder induzierter Radioaktivität.

Insgesamt werden alle Umwandlungen eines Atomkerns eines Mutternuklids in einen Tochterkern, unabhängig ob eine Änderung der Massenzahl stattgefunden hat, als radioaktiv bezeichnet.

Stabile Kerne weisen einen mit der Ordnungszahl wachsenden Neutronenüberschuss auf, besonders gilt dies allerdings für schwere Kerne. Hier muss nämlich die starke elektrische Abstoßung der Protonen im Kern durch die Neutronen kompensiert werden. Wenn dieses Protonen-Neutronen-Verhältnis gestört wird, werden in Folge die Kerne instabil.

Der Grund für einen radioaktiven Zerfall ist also stets ein Überschuss an Bindungsenergie.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 91)*

Folgende Eigenschaften sind charakteristisch für radioaktive Stoffe bzw. Elemente und lassen diese dadurch identifizieren:

- Strahlungsart
- Strahlungsaktivität
- Strahlungsenergie
- Halbwertszeit

*(vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 19)*

## 1.6 Natürliche Zerfallsreihen

Die folgenden Darstellungen zeigen einige natürliche Zerfallsreihen.

### 1.6.1 Uran-Radium-Reihe

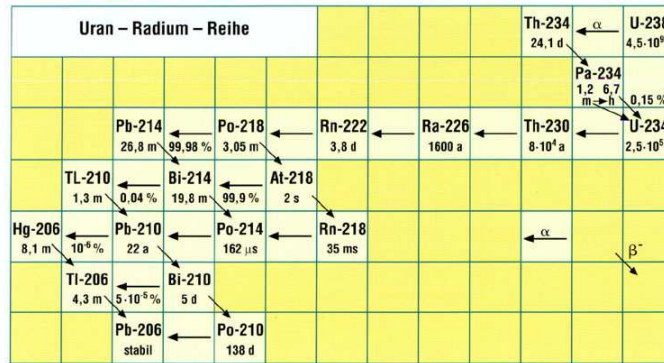


Abb. 2: Uran-Radium-Zerfallsreihe

Abbildung 1.3: Uran-Radium-Reihe<sup>3</sup>

### 1.6.2 Thoriumreihe

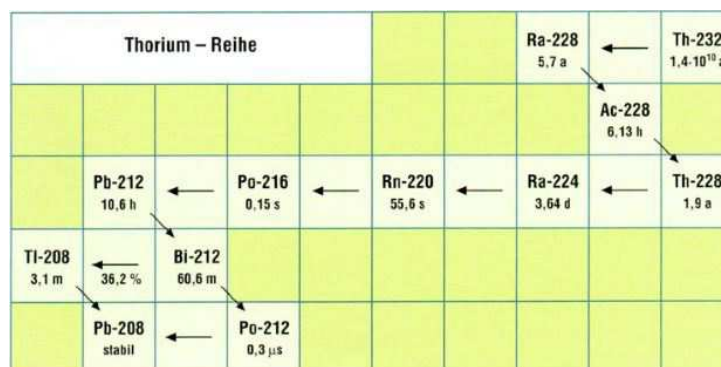


Abbildung 1.4: Thoriumreihe<sup>4</sup>

## 1.7 Der Alphazerfall

Beim  $\alpha$ -Zerfall werden sogenannte  $\alpha$  Teilchen von einer radioaktiven Substanz emittiert.

Bei diesen Teilchen handelt es sich um Heliumkerne, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. In weiterer Folge vermindert sich sowohl die Kernladungszahl als auch die Neutronenzahl je um 2, die Massenzahl insgesamt um 4.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 97)

Die folgende Zerfallsgleichung gilt für  $\alpha$ -Zerfälle:



$\alpha$ -Teilchen weisen die größte Bindungsenergie aller leichten Nuklide auf und daher haben sie eine energetische Sonderposition.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 97)

Wenn man beispielsweise von irgendeinem Alpha-Strahler die Reichweite der emittierten Alpha-Teilchen misst, so erkennt man, dass zumeist die von einem Präparat ausgesendeten Alpha-Teilchen dieselbe Reichweite, also kinetische Energie besitzen.

(vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: Experimentalphysik 4, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 44)

$$E_{\text{kin}} = E_1 - E_2 . \quad (1.3)$$

Die kinetische Energie ergibt sich also aus der Differenz der Anfangsenergie  $E_1$  und jener am Endzustand  $E_2$  und somit hängt die Gesamtenergie  $E_k$  davon ab, ob sich Mutter – oder Tochterkern in einem angeregten oder im Grundzustand befinden.

(vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: Experimentalphysik 4, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 44)

Die Alpha-Strahlung verfügt über eine sehr geringe Reichweite und lässt sich sehr einfach abschirmen, beispielsweise durch ein Blatt Papier oder durch die Haut.

Weiters stellt sie eine sehr gefährliche Strahlung für den Menschen da, da ihre

biologische Wirkung bei Aufnahme in den Körper sehr hoch ist.

(vgl. *Seibersdorf Academy, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 36*)

## 1.8 Der Betazerfall

Beim  $\beta$ -Zerfall entsteht entweder aus einem Neutron ein Proton und eine negative Ladung oder aus einem Proton ein Neutron und eine positive Ladung. Die entstandenen Teilchen werden als Betateilchen bezeichnet.

(vgl. *Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 102*)

Der Betazerfall lässt sich in  $\beta^+$  und  $\beta^-$  Strahlung unterteilen.

(vgl. *Seibersdorf Laboratories, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 21*)

$$\beta^+ : p \Rightarrow n + e^+ + \nu . \quad (1.4)$$

$$\beta^- : n \Rightarrow p + e^- + \bar{\nu} . \quad (1.5)$$

Bei Betazerfällen lässt sich beobachten, dass entweder Elektronen ( $e^-$ ) oder Positronen ( $e^+$ ) frei werden.

$\nu$ .....Neutrino

$\bar{\nu}$ ...Antineutrino

(vgl. *Seibersdorf Laboratories, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 21*)

Insgesamt gibt es ungefähr doppelt so viele  $\beta$ -Strahler wie  $\alpha$ -Strahler.

Aufgrund von einigen experimentellen Beobachtungen des Betazerfalls entstand die sogenannte Neutrino Hypothese, denn sonst wäre es nicht möglich, die Experimente zu erklären.

Um die Erhaltungssätze gewährleisten zu können, muss bei der Betaumwandlung ein weiteres Teilchen entstehen, dass zum Beispiel die fehlende Energie mitnimmt.

Dieses hypothetische Teilchen wurde Neutrino genannt und man war sich sicher, dass es sich dabei um ein neutrales Teilchen handeln muss.

Im Jahr 1930, also lange Zeit zuvor, wurde dieses Teilchen bereits von Pauli postuliert, jedoch galt es noch als experimentell unentdecktes Teilchen.

Pauli gab dem Teilchen damals zu Beginn den Namen “Neutron“, doch kurz danach wurde das Neutron von Chadwick als Baustein eines Atomkerns entdeckt. Dieses Teilchen wies eine größere Masse auf, als das hypothetische Teilchen haben dürfte und somit war klar, dass es sich bei dem Teilchen, welches beim  $\beta$ -Zerfall entsteht, um ein anderes neutrales Teilchen handeln muss, dessen Masse viel geringer ist.

Man nannte es Neutrino, übersetzt “kleines Neutron“. Wie bei allen Elementarteilchen musste es dann in Folge aus Symmetriegründen ein entsprechendes Antiteilchen geben, das sogenannte Antineutrino. Ungefähr 25 Jahre nachdem Pauli das Neutrino und Antineutrino postulierte, wurden diese Teilchen dann auch experimentell nachgewiesen.

(vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: *Experimentalphysik 4*, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 48)

Die Neutrinos, welche beim Betazerfall emittiert werden, sind nur sehr schwer nachzuweisen und spielen auch kaum eine Rolle für die Dosimetrie bzw. auch für den Strahlenschutz. Der Grund dafür liegt daran, dass Neutrinos nur in geringstem Maße mit Materie wechselwirken können.

Wichtig ist jedoch die Wirkung des Neutrinos in der Energiebilanz nicht zu vernachlässigen.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 103)

## 1.9 Die Gammastrahlung

Neben der Alpha- und der Betastrahlung gibt es dann auch noch die sogenannte Gammastrahlung.

Dabei wird Energie in Form von hochenergetischer Photonenstrahlung, den

Gammaquanten, emittiert.

Bei dieser Art der Strahlung ändert sich zwar die Massenzahl nicht, allerdings wird die Energie des Mutterkerns vermindert bzw. die Kernmasse.

Insgesamt lässt sich also sagen, dass die Gammastrahlung durch eine Verminderung der Energie und der Masse des Kerns gekennzeichnet ist.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 114f)

## 1.10 Wechselwirkung mit Materie

### 1.10.1 $\gamma$ -Strahlung - Wechselwirkung und Schwächung

Für die Wechselwirkung eines Photons mit Materie gibt es insgesamt fünf Möglichkeiten, zum Beispiel die Wechselwirkung des Photons mit der Atomhülle oder dem Kern.

In der Medizintechnik kommen hauptsächlich Röntgenstrahlen aus Röntgenröhren zum Einsatz sowie Gammastrahlung, welche von radioaktiven Kernen emittiert wird.

Kommt es zu einer Wechselwirkung dieser Strahlungen mit Materie, so kann die Photonenenergie unter Umständen vollständig absorbiert werden oder die Photonen können auch gestreut werden.

Wechselwirkungsmöglichkeiten sind der Photo-, Compton-, Paarbildungs- und Kernphotoeffekt.

Bei dem Paarbildungseffekt findet die Wechselbeziehung der Photonen mit den elektromagnetischen Feldern der Atomkerne statt.

Gibt es allerdings eine Interaktion der Photonen direkt mit dem Atomkern, so spricht man vom Kernphotoeffekt.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei Photonen um ungeladene Teilchen handelt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese mit Materie wechselwirken, viel geringer, als dass es geladene Teilchen tun.

Dies ist der Grund dafür, dass Photonenstrahlung bzw.  $\gamma$ -Strahlung Materie sehr leicht vollständig durchdringen kann und somit nur minimal durch Ma-



terie geschwächt wird. Diese Art der Strahlung fordert also ein sehr hohes Maß an Strahlenschutzvorkehrungen.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 167f)

Die Reichweite der  $\gamma$ -Strahlung wird exponentiell abfallend dargestellt, daher ist diese unendlich und eine totale Abschirmung unmöglich.

(vgl. Seibersdorf Laboratories, *Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie*, Stand: 09.12.2013, Folie 39)

### 1.10.2 Wechselwirkungen von $\alpha$ -Strahlung mit Materie

$\alpha$ -Teilchen, also Heliumkerne, stoßen bei Wechselwirkung mit Hüllenelektronen zusammen, bis sie vollständig abgebremst werden. Währenddessen erfahren sie nur eine sehr geringe Richtungsänderung.

Prinzipiell gilt:

- Die Reichweite der  $\alpha$ -Strahlung ist absolut gering
- Die Alphastrahlung lässt sich leicht abschirmen, zum Beispiel reicht hierfür schon ein Blatt Papier
- Die biologische Wirkung von Alphastrahlung ist höher als jene der Betastrahlung (große Gefahr bei Aufnahme in den Körper)

(vgl. Seibersdorf Laboratories, *Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie*, Stand: 09.12.2013, Folie 36)

### 1.10.3 Wechselwirkung von $\beta$ -Strahlung mit Materie

Die  $\beta$ -Teilchen werden beim Zusammenstoß mit den Elektronen abgebremst und erfahren dabei eine starke Richtungsablenkung, im Gegensatz zu den

schweren Alphateilchen.

Prinzipiell gilt für die  $\beta$ -Strahlung:

- Die Reichweite dieser Strahlungsart ist begrenzt
- Sie kann zum Beispiel durch ein Metallblech abgeschirmt werden
- Die biologische Wirkung ist nicht so hoch als jene der  $\alpha$ -Strahlung

*(vgl. Seibersdorf Laboratories, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 37)*

# Kapitel 2

## Das Zerfallsgesetz

### 2.1 Herleitung des Zerfallsgesetzes

Der Zerfall von Atomkernen unterliegt statistischen Gesetzen, es lassen sich also keine Aussagen darüber machen, zu welchem Zeitpunkt genau ein Zerfall stattfinden wird.

Jedoch lassen sich Wahrscheinlichkeiten angeben, dass es zu einem radioaktiven Zerfall kommt. Um dies zu beschreiben, wird die Zerfallskonstante  $\lambda$  verwendet.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 131)

Die Zerfallskonstante  $\lambda$  gibt also an, wieviele Kerne in einem bestimmten Zeitintervall zerfallen.

(vgl. <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/zerfallskonstante/18551>)

Um das Zerfallsgesetz herleiten zu können, betrachtet man zunächst eine Gruppe von  $N$  identischen, instabilen Kernen, die alle dieselbe Zerfallswahrscheinlichkeit aufweisen.

Das bedeutet, dass für alle  $N$  identischen Teilchen die Wahrscheinlichkeit gleich groß ist, dass diese spontan in einem gewissen Zeitintervall zerfallen. Solch instabile Kerne kommen in der freien Natur vor oder können durch

Kernreaktionen künstlich erzeugt werden.

(vgl. *Experimentalphysik 4*, Wolfgang Demtröder, 4. Auflage, Springer-Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 39)

Die Abnahme der Anzahl der instabilen Kerne  $dN$  pro Zeiteinheit  $dt$  ist proportional zum Produkt der Zerfallskonstanten  $\lambda$  und der Anzahl der instabilen Kerne im Kollektiv.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N. \quad (2.1)$$

Es handelt sich also um eine Differentialgleichung, wobei  $\lambda$  die Zerfälle pro Zeiteinheit angibt und eine Konstante darstellt.

Die Einheit der Zerfallskonstanten ist stets ein reziproker Zeitwert, wie etwa  $s^{-1}, min^{-1}$ .

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

Durch eine Umformung von (2.1) erhält man:

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

$$\frac{dN}{N \times dt} = -\lambda = const. \quad (2.2)$$

Das bedeutet, dass für eine bestimmte Zerfallsart und ein spezielles Nuklid die relative Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit konstant ist und genauso verhält es sich mit der Abnahme der Kerne in diesem Zeitintervall.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: *Grundlagen der Strahlenphysik*, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

Eine Integration liefert schlussendlich die exponentielle Form des Zerfallsge-

setzes.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

### 2.1.1 Mathematischer Beweis

**Satz.** Sei  $a \in \mathbb{R}$ . Eine differenzierbare Funktion  $x : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  erfüllt  $\dot{x}(t) = a \times x(t) \forall t \in \mathbb{R}$  genau dann, wenn es ein  $c \in \mathbb{R}$  gibt, sodass  $x(t) = c \times e^{at} \forall t \in \mathbb{R}$ .

**Beweis.** Zunächst nehmen wir an, dass  $x(t) = c \times e^{at} \forall t \in \mathbb{R}$ . Dann gilt wegen der Kettenregel  $\dot{x}(t) = c \times e^{at} \times a = x(t) \times a$ .

Jetzt gelte  $\dot{x}(t) = a \times x(t) \forall t \in \mathbb{R}$ .

Setze  $y(t) = x(t) \times e^{-at}$ . Differenzieren mit der Produkt - und Kettenregel ergibt:

$$\dot{y}(t) = \dot{x}(t) \times e^{-at} + x(t) \times e^{-at} \times (-a) = e^{-at} \times [\dot{x}(t) - a \times x(t)] = 0.$$

Wegen des Mittelwertsatzes gibt es ein  $c \in \mathbb{R}$  mit  $c = y(t) = x(t) \times e^{-at}$ , also  $x(t) = c \times e^{at}$ .  $\square$

In unserem Fall erhält man:

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}. \quad (2.3)$$

Wobei  $N_0$  die Anzahl der aktiven Kerne zum Zeitpunkt  $t=0$  beschreibt.

Eine weitere wichtige physikalische Größe, die man zur Herleitung des Zerfallsgesetzes benötigt, stellt die Aktivität  $A$  dar, welche zahlenmäßig gleich der Abnahme der aktiven Kerne in einem gewissen Zeitintervall entspricht.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda \times N. \quad (2.4)$$

Mithilfe von (2.4) lässt sich also die Aktivität berechnen, welche zahlenmäßig der Abnahme der aktiven Kerne pro Zeiteinheit entspricht, jedoch ein entgegengesetztes Vorzeichen als (2.1) aufweist.

Multipliziert man nun (2.3) mit der Zerfallskonstanten  $\lambda$ , so ergibt sich unter Berücksichtigung einiger vorher beschriebenen Formeln:

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132)

$$A(t) = A_0 \times e^{-\lambda t} . \quad (2.5)$$

Da  $e$  die Basis des natürlichen Logarithmus darstellt, welche sowohl in (2.3) als auch in (2.5) vorkommt, weisen Aktivität  $A$  und die Anzahl der aktiven Mutterkerne die selbe zeitliche Abhängigkeit auf.

Durch beidseitiges Logarithmieren von (2.5) und (2.3) und unter Berücksichtigung, dass Exponential- und natürliche Logarithmusfunktionen Umkehrfunktionen voneinander sind, kommt man infolge zu:

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133)

$$\ln \left( \frac{N(t)}{N_0} \right) = -\lambda \times t . \quad (2.6)$$

sowie

$$\ln \left( \frac{A(t)}{A_0} \right) = -\lambda \times t . \quad (2.7)$$

Will man sich dies graphisch vorstellen, so entspricht der Logarithmus des Verhältnisses von Aktivität  $A(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  zu Aktivität  $A(0)$  zum Zeitpunkt  $t=0$ , einer Gerade mit negativer Steigung.

Als Halbwertszeit  $T_{1/2}$  bzw. als physikalische Halbwertszeit wird jenes Zeitintervall bezeichnet, in der die Aktivität auf die Hälfte der Anfangsaktivität abgenommen hat.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133)

Das heißt, dass sich nach einer Halbwertszeit die Anzahl aller unzerfallenen Kerne exakt halbiert hat.

(vgl. Diehl, Erb, Heise, Kotthaus, Lindner, Schlichting, Schmalhofer, Schön, Schröder, Schulze, Tews, Tillmanns, Winter; Titel: Physik Oberstufe Gesamtband, 1. Auflage, Cornelsen Verlag Berlin, 2011, Seite 376)

Der Zusammenhang zwischen Halbwertszeit  $T_{1/2}$  und Zerfallskonstanten ergibt sich wie folgt:

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} . \quad (2.8)$$

Den Reziprokwert der Zerfallskonstanten  $\lambda$  bezeichnet man als mittlere Lebensdauer  $\tau$  des radioaktiven Zerfalls.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133)

$$\tau = \frac{1}{\lambda} . \quad (2.9)$$

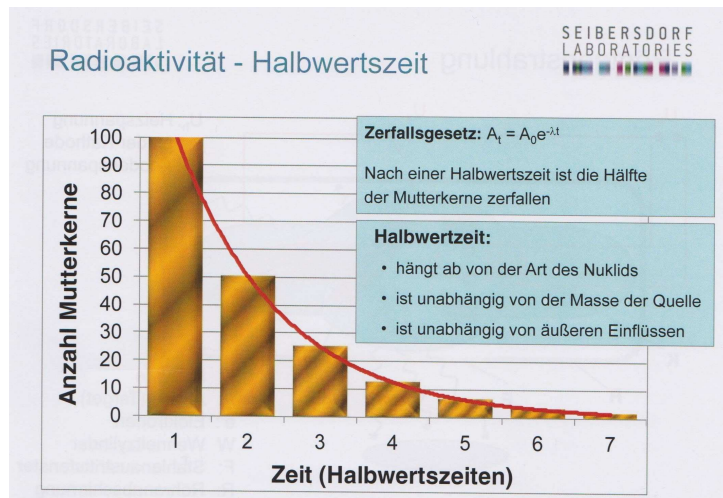


Abbildung 2.1: Halbwertszeit<sup>5</sup>

Es lässt sich erkennen, dass es sich hierbei um eine Exponentialfunktion handelt, genauer um einen exponentiellen Abfall.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133)

## 2.2 Zerfallskonstante und Halbwertszeiten bei alternativen Zerfällen

Existieren für einen radioaktiven Kern mehrere Zerfallsmöglichkeiten, so müssen alle Zerfallskonstanten  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  aller möglichen Zerfallsarten zur einer Gesamtzerfallswahrscheinlichkeit  $\lambda_{\text{tot}}$  aufsummiert werden:

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 136)

$$\lambda_{\text{tot}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (2.10)$$

Somit ergeben sich für die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  laut (2.8) und für die Lebensdauer  $\tau$  laut (2.9) folgende Formeln:



(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 136)

$$T_{1/2} = \ln 2 \times \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots \frac{1}{\lambda_n} \right) = \ln 2 \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}. \quad (2.11)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots \frac{1}{\lambda_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}. \quad (2.12)$$

Es lässt sich erkennen, dass sich bei so einem Fall mit mehreren Zerfallsmöglichkeiten, die mittlere Lebensdauer mit der Kehrwertsumme der partiellen Zerfallswahrscheinlichkeiten berechnen lässt.

In Tabellen und auch auf Nuklidkarten beziehen sich die Halbwertszeiten und mittleren Lebensdauern stets auf die totale Zerfallswahrscheinlichkeit.

Die möglichen Zerfallsalternativen sind für die Ausbeute der Zerfallsprodukte von großer Bedeutung.

Die beschriebenen Alternativzerfälle findet man zum Beispiel in Form von  $\alpha$  und  $\beta^-$ -Zerfällen, selbst konkurrierende  $\beta^+$  und  $\beta^-$ -Zerfälle lassen sich beobachten und als solche identifizieren. Diese erkennt man in einer Nuklidkarte anhand ihrer Markierung, die zugleich blau und rot ist. Beispiele hierfür sind  $^{138}\text{Lanthan}$  sowie  $^{86}\text{Rubidium}$ .

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 136f)

### 2.2.1 Zerfallsalternativen von $^{212}\text{Wismut}$

$^{212}\text{Wismut}$  weist eine Halbwertszeit von 60,6 Minuten auf und zerfällt zu 36% über einen  $\alpha$ -Zerfall und zu 64% über einen  $\beta^-$ -Zerfall. Insgesamt ergeben sich somit zweierlei Zerfallswahrscheinlichkeiten.

Einerseits beträgt die totale Zerfallswahrscheinlichkeit  $\lambda(\text{tot}) = 1,143 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  und die partiellen Zerfallswahrscheinlichkeiten betragen  $\lambda(\alpha) = 0,412 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  sowie  $\lambda(\beta^-) = 0,732 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage,

*Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 137)*

## 2.3 Die biologische Halbwertszeit

In der Medizin und Biologie findet die sogenannte biologische Halbwertszeit ihre Anwendung. Diese wird dann angegeben, wenn eine Ausscheidung oder Verstoffwechselung einer Substanz durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Die mathematische Form der biologischen Halbwertszeit ist gleich jener der physikalischen Halbwertszeit.

Werden radioaktive Produkte oder Substanzen in den Körper aufgenommen, so kommt es zum Zerfall und in weiterer Folge zur Ausscheidung dieser Produkte, welche von der physikalischen Lebensdauer abhängig ist.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 137)*

Falls sich die biologische und die physikalische Halbwertszeit unterscheiden, ergibt sich für die effektive Halbwertszeit:

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138)*

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{\text{phy}}} + \frac{1}{T_{\text{bio}}} . \quad (2.13)$$

Ergeben physikalische und biologische Halbwertszeit denselben Wert, so gilt:

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138)*

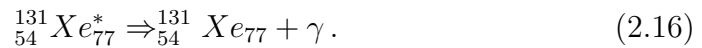
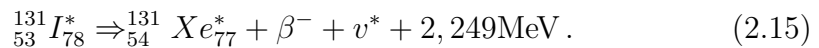
$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{phy}}}{2} = \frac{T_{\text{bio}}}{2} . \quad (2.14)$$

### 2.3.1 Anwendung der effektiven Halbwertszeit bei einer Nuklearmedizinischen Untersuchung

In der Medizin wird zur Therapie einer Schilddrüsenerkrankung  $I_{131}$  verwendet, wobei dieses radioaktive Element in flüssiger Form oder in Form von Kapseln den betroffenen Menschen verabreicht wird.

Das Isotop  $I_{131}$  ist ein  $\beta^-$ -Strahler, wobei beim Zerfall  $Xe_{131}$  entsteht, welches einen Gammastrahler darstellt.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138)



Die physikalische Halbwertszeit von  $I_{131}$  beträgt ungefähr 8 Tage.

Von großer Bedeutung für eine Schilddrüsenthherapie sind vor allem die Beta-Teilchen, da diese auf einer Strecke von ca. 2-3 mm in der Anreicherungszone der Schilddrüse abgebremst werden und an dieser Stelle ihre Energie an das erkrankte Gewebe abgeben.

Die Gammastrahlung verlässt die Schilddrüse zu ungefähr 90% und ist daher ein ernstzunehmender Nebeneffekt. Es gibt bei solch einer Untersuchung also die Gefahr der Kontamination und es muss besonders auf den Strahlenschutz geachtet werden.

Die biologische Halbwertszeit für  $I_{131}$  in Bezug auf die Anwendung bei Schilddrüsenproblemen beträgt ca. 24 Tage, welches einer effektiven Halbwertszeit von 6 Tagen entspricht.

Dieser Wert muss selbstverständlich bei der Berechnung der Dosis und auch in Anbetracht des Strahlenschutzes berücksichtigt werden.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138)

# Kapitel 3

## Abnahme- und Wachstumsprozesse im Mathematikunterricht

Die Halbwertszeit bzw. deren Berechnung spielt auch im Lehrplan eine wichtige Rolle. So beschäftigen sich die Schüler und Schülerinnen im Mathematikunterricht in der Oberstufe manchmal sogar über einen sehr langen Zeitraum hinweg mit Berechnungsbeispiele zur Halbwertszeit und Radioaktivität.

Laut dem aktuellen Lehrplan für die Oberstufe in Mathematik findet man diese Berechnung versteckt im Kapitel Reelle Funktionen, welche unter anderem die Berechnung und Bedeutung von Exponential- und Logarithmusfunktionen umfasst und somit zur Berechnung der Halbwertszeit wie auch für exponentielle Wachstums- und Abnahmeprozesse herangezogen wird. Zeitlich lässt sich dieses Kapitel in der 6.Klasse Oberstufe einordnen.

(vgl. [https://www.bmb.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp\\_neu\\_ahs\\_07\\_11859.pdf](https://www.bmb.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_neu_ahs_07_11859.pdf))

### 3.1 Beispiel

Für den radioaktiven Zerfall gilt folgende Formel:

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

Im Jahr 1898 entdeckte und isolierte Marie Curie Radium, welches eine Halbwertszeit von 1620 Jahren aufweist.

### 1. Berechne die Zerfallskonstante

Um sich  $\lambda$  isolieren zu können, verwendet man vorerst die obige Formel:

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

In Anbetracht, dass die Halbwertszeit von Radium 1620 Jahre beträgt, kann man die obige Formel umwandeln zu:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \times e^{-\lambda \times 1620}.$$

$N_0$  lässt sich auf beiden Seiten der Gleichung wegekürzen und es folgt:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \times 1620}.$$

Durch Logarithmieren auf beiden Seiten erhält man:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln\left(e^{-\lambda \times 1620}\right).$$

Unter Berücksichtigung, dass Exponential- und Logarithmusfunktion Umkehrfunktionen voneinander sind, erhält man:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda \times 1620.$$

Dividiert man schlussendlich noch durch (-1620), so erhält man die Zerfallskonstante:

$$\lambda = \ln\left(\frac{1}{2}\right) \div (-1620) = 0,000428.$$

### 2. Wieviel Gramm Radium sind bei einer Ausgangsmenge von 1g nach 100 Jahren noch vorhanden?

Man verwendet abermals folgende Formel:

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

Nun braucht man nur mehr alle vorhandenen Daten einsetzen, gesucht ist  $N(100)$ .

$$N(100) = 1 \times e^{-0,000428 \times 100} = 0,958.$$

Nach rund 100 Jahren sind dementsprechend noch 0,958 Gramm Radium vorhanden.

**3. Wann wird nur mehr 0,1 Gramm von der Ausgangsmenge übrig sein?**

Hierfür muss folgende Formel nach  $t$  aufgelöst werden:

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

$$0,1 = 1 \times e^{-0,000428 \times t}.$$

$$\frac{\ln(0,1)}{-0,000428} = t = 5380.$$

Nach 5380 Jahren sind vom Radium nur noch 0,1 Gramm vorhanden.

**Quelle Beispiel**

[http://www.mathe-online.at/lernpfade/Exponentielles\\_Wachstum/?kapitel=2](http://www.mathe-online.at/lernpfade/Exponentielles_Wachstum/?kapitel=2)  
<http://members.chello.at/gut.jutta.gerhard/kurs/exp-wachstum.htm>

# Kapitel 4

## Dosimetrie und Strahlenschutz

### 4.1 Dosisgrößen

Prinzipiell wird eine Strahleneinwirkung auf einen Menschen als Energiedosis angegeben, welche der pro Massenelement absorbierten Energie entspricht. Im Strahlenschutz werden vorwiegend zwei Dosisgrößen, welche sich auf die Energiedosis beziehen, verwendet.

Einerseits gibt es hier die sogenannte operative Äquivalentdosis, von der sich die Personen- und Ortsdosis, welche an bestimmten Raumpunkten definiert sind und daher messbare Größen darstellen, abgeleitet.

Zum anderen existieren noch Organdosis und Effektive Dosis, die nicht direkt gemessen werden können, da sich beispielsweise ihr Wert je nach bestrahltem biologischen Gewebe ändert.

Organdosis und Effektive Dosis sind rechnerische Dosisgrößen, die zur Ermittlung des stochastischen Strahlenrisikos, welches im nächsten Kapitel genauer erläutert wird, herangezogen werden.

Alle Dosisgrößen haben gemeinsam, dass sich diese immer auf die Masse eines bestrahlten Volumens beziehen.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 318f)*

### 4.1.1 Energiedosis als Beispiel für Dosisgrößen

Die Energiedosis  $D_{\text{med}}$  ergibt sich aus der Division der mittleren absorbierte Energie  $dE_{\text{abs}}$  und der Masse, an welche die Energie übertragen wird.

Hierbei geht es selbstverständlich um den Fall, dass ionisierende Strahlung auf eine Masse einwirkt.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 319)

$$D_{\text{med}} = \frac{dE_{\text{abs}}}{dm_{\text{med}}} . \quad (4.1)$$

$D_{\text{med}}$  hat die SI-Einheit Joule pro Kilogramm (J/kg).

### 4.1.2 Dosisgrößen und Strahlenschutz

Anhand der Dosisgrößen werden die unterschiedlichen Wirkungen von ionisierender Strahlung beschrieben.

Bei der Beschreibung einer Strahleneinwirkung in Bezug auf Dosisgrößen ist entscheidend, dass die Strahlung verschieden wirkt, je nachdem ob die Energie auf kurzen oder längeren Wegstrecken absorbiert wird.

Zur Beschreibung dieses Verhaltens verwendet man die sogenannte Ionisierungsdichte.

Weiters wird hierbei unterschieden, ob es sich bei der Strahlung um locker ionisierende handelt, wie zum Beispiel Photonen und  $\beta$  - Teilchen oder um dichter ionisierende Strahlung, wie etwa  $\alpha$  - Teilchen.

Da dichter ionisierende Strahlung eine sehr geringe Reichweite hat, wird häufig ihre Bewegungsenergie in einer einzigen Zelle abgegeben und daher weist sie eine höhere Schadensdichte entlang ihres Weges auf.

(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 320f)



Die zweite Möglichkeit die Wirkung von ionisierender Strahlung zu betrachten, ist sie je nach Strahlensensibilität verschiedener Gewebe oder auch Organe einzuteilen unter Berücksichtigung des Gesamtschadens, der für ein Individuum dabei entsteht.

Diese beiden Betrachtungsweisen werden in der internationalen Effektiven Dosis zur Berechnung der Dosisgrößen verwendet.

Die Effektive Dosis gibt also an, wie groß die Gefährdung für eine Veränderung des genetischen Materials durch stochastische Strahleneinwirkung ist.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 321)*

## 4.2 Effektive Dosis

Die Effektive Dosis ersetzt die früher verwendete Effektive Äquivalenzdosis und ist wie die Organdosen nicht unmittelbar messbar. Die Effektive Dosis wird aus Werten von mehreren Organdosen bestimmt. Sie stellt also eine Größe dar, die auf einzelne Bereiche des Körpers bezogen ist und ergibt ein Maß für die stochastische Wirkung von ionisierender Strahlung.

Rein rechnerisch stellt sie eine Summe aus Gewebe-Wichtungsfaktoren multipliziert mit Organdosen in 12 Organen und Geweben dar.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 331)*

Der Gewebe-Wichtungsfaktor ist von großer Bedeutung, da jedes Gewebe unterschiedlich auf ionisierende Strahlung reagiert.

*(vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016, Folie 13)*

Gewebe und Organe	Gewebe-Wichtungsfaktor
Gonaden (Eierstöcke, Hoden)	0,20
Knochenmark	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Brust	0,05
Blase	0,05
Leber	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
Andere Organe	0,05

*(vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016, Folie 13)*

Die Gewebewichtungs-Faktoren wurden aus einer epidemiologischen Studie abgeleitet und es wurde ein Mittelwert unter Berücksichtigung aller Altersklassen und Geschlechter errechnet.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 331)*

### 4.3 Regeln zur Verringerung der Strahlenexposition in der Praxis

Im Strahlenschutz gibt es die sogenannte ALARA-Regel, die besagt, dass man die Strahlenexposition so niedrig wie vernünftigerweise möglich halten soll. Diese Regel lässt sich durch drei Prinzipien ermöglichen:

- Die Aufenthaltsdauer in Strahlenbereichen soll so kurz wie möglich sein.

- Der Abstand zur Strahlenquelle soll so groß wie möglich gehalten werden.
- Man soll für eine gute Abschirmung sorgen, denn die Dosisleistung nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab.

*(vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016, Folie 40 und 41ff)*

# Kapitel 5

## Strahlenbiologie

### 5.1 Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlung

Schon seit sehr vielen Jahren ist die schädigende Wirkung von ionisierender Strahlung auf Lebewesen bekannt.

Erste Erfahrungen in diesem Bereich sind durch H. Becquerel aus dem Jahr 1901 bekannt, welcher ein Radiumpräparat in seiner Westentasche bei sich trug und zwei Wochen später starke Verbrennungen auf seiner Bauchhaut erlitt.

Noch im selben Jahr führte Pierre Curie einen Selbstversuch mit einem radioaktiven Element an seinem Unterarm durch, welcher in Folge zu einem dauerhaften Geschwür führte.

Im Jahre 1902 wurde dann der erste, durch Strahlung ausgelöste Krebs beobachtet und im darauffolgenden Jahr entdeckte man bei Tierversuchen die Schädigung der Blut bildenden Organe.

Im Jahr 1899 erfolgte dann die erste Behandlung von Hautkrebs mittels Röntgenstrahlung, acht Jahre später die erste Behandlung mit Radium.

Zu den ersten entdeckten Auswirkungen ionisierender Strahlung zählen Hautrötungen.

In weitere Folge kam es dann vorwiegend bei Ärzten zu chronischen Entzündungen, schmerzhaften Geschwüren sowie zu dauerhaften Veränderungen der

Haut.

Aufgrund der zu dieser Zeit noch fehlenden Strahlenschutzeinrichtungen hat die Wirkung der ionisierenden Strahlung vor allem Ärzten und strahlenexponierten Personen häufig deren Leben gekostet.

In Hamburg wurde deshalb 1936 ein Denkmal für die Opfer der Radiologie errichtet und es wurden erste Maßnahmen zum Strahlenschutz eingeleitet.

Im Jahre 1927 wurde dann die mutationsauslösende Wirkung ionisierender Strahlung von H.J. Müller entdeckt.

Durch diese Erkenntnis und durch den Fakt, dass es auch zu Erbschäden kommt, mussten also auch kleinere Dosen ionisierender Strahlung betrachtet werden und in eine Beobachtung mit einfließen, weil somit auch die Nachkommenschaft betroffen ist und dies ein populationsgenetisches Problem darstellt. Später wurde dann der Begriff Strahlenschaden definiert, als die Gesamtheit aller krankhaften Reaktionen und auch genetischer Mutationen nach Exposition mit ionisierender Strahlung definiert.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 476ff)*

Prinzipiell unterscheidet man in der Biologie zwischen deterministischen und stochastischen Strahlenschäden.

*(vgl. Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 478)*

Kommt es zu einer Einwirkung von Strahlung auf Körperzellen, so spricht man als Auswirkung von nicht stochastischen Strahlenschäden oder auch deterministischen Strahlenschäden. Dabei handelt es sich um akute Strahlenschäden.

Sind allerdings die Keimzellen betroffen, so spricht man von stochastischen Schäden. Diese betreffen den Zellkern und führen zu Schädigungen des Erbgutes.

*(vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 17)*

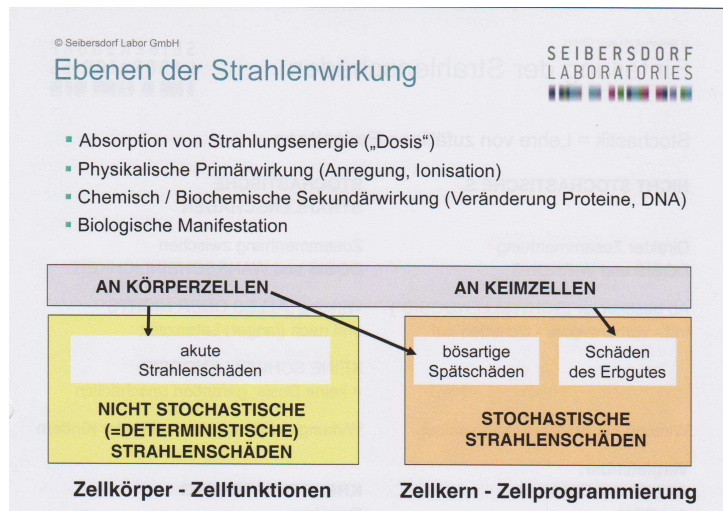


Abbildung 5.1: Arten von Strahlenschäden<sup>6</sup>

## 5.2 Deterministische Strahlenschäden

Bei deterministischen Schäden handelt es sich um Sofortschäden.

Sie treten nach Überschreiten einer definierten Dosisgrenze auf und die Schwere der Schäden nimmt mit der Höhe der Dosis zu.

(vgl. *Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016, Folie 4*)

Bei diesen Schäden gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung. Wird eine bestimmte Dosischwelle überschritten, so wird ein Schaden eintreten.

Es handelt sich also um einen vorhersagbaren Schaden.

(vgl. *Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 4*)

Die untenstehende Tabelle soll einen Überblick hierzu verschaffen.

SEIBERSDORF  
LABORATORIES

**Akute Strahlenkrankheit**  
Deterministische Strahlenschäden nach  
kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung (Sofortdosis)

Symptome, Phasen der Strahlenkrankheit	relevante Dosis (Ganzkörperbestrahlung, Sofortdosis) Zeitverlauf der Strahlenkrankheit		
Frühsymptome (Übelkeit, Erbrechen, Kopfschmerz, Müdigkeit)	1-3 Gy: mehrmals (nach 2-6 Stunden)	3-6 Gy: mehrmals stark (nach 0,5 – 2 h)	ab 6 Gy: häufig & stark (ab 10 min)
Latenzzeit bis Auftreten akuter Symptome	10-20 Tage	3-5 Tage	< 1 Tag (3-5 h)
Akutphase Strahlenkrankheit (betroffene Organe)	1 - 10 Gy <b>Hämatopoetisches Syndrom</b> (Blutbildung, Knochenmark)	5 - 20 Gy <b>Intestinales Syndrom</b> (Magen-Darmtrakt)	ab 20 Gy <b>Zerebrales Syndrom</b> (Gehirn/Nervensystem)
Krankheitsbild, Symptome	Zerfall d. Knochenmarks, Lymphozyten, Blutplättchen ↓ Infektionen, Blutungen	Zerfall Darmschleimhaut, Durchfall, Krämpfe, Kreislaufchock	Hirnodem, Entzündung Zentralnervensystem, Anfälle, Benommenheit
Überlebenszeit (ohne Therapie)	~ 2 Monate	~ 2 Wochen	~ 2 Tage
Prognose (mit Therapie)	gut	schlecht	hoffnungslos

Quellen: Herrmann et al. (2006): Klinische Strahlenbiologie p. 184  
Strahlenschutzkommission (SSK-Berichte), Band 32 (2008), Tab. 5-10

Abbildung 5.2: Symptome bei akuten Strahlenschäden<sup>7</sup>

Eine Folge dieser Schäden ist die sogenannte Strahlenkrankheit, die wiederum unter anderem von der Strahlenempfindlichkeit von Geweben oder auch der Dosis abhängt.

(vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 20)

## 5.3 Stochastische Schäden

Spricht man von stochastischen Schäden so meint man langfristig wahrscheinliche Schäden, welche auch schon bei sehr niedrigen Dosen auftreten können. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Schäden steigt zwar mit der Dosis, jedoch gibt es hier keine definierte Schwelle.

Eine Folgeerkrankung wäre zum Beispiel die Entstehung von Krebs.

(vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 19)

Im Folgenden erkennt man ein Diagramm, welches nochmals den Unterschied zwischen stochastischen- und deterministischen Strahlenschäden darstellt und ein paar weitere Diagramme zur Erklärung.

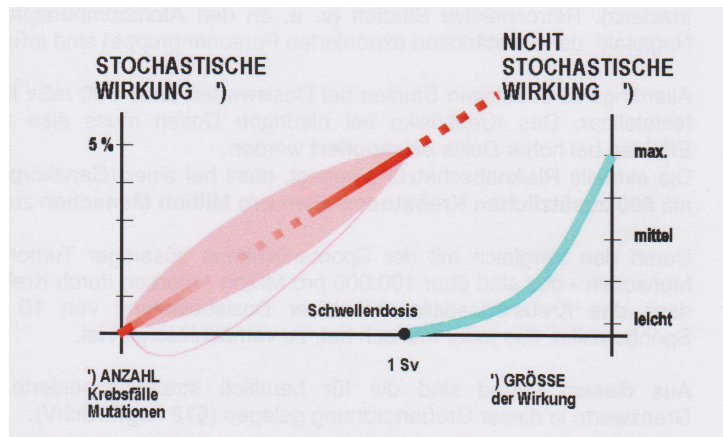


Abbildung 5.3: Wirkung der unterschiedlichen Strahlenschäden<sup>8</sup>

STRAHLENSYNDROME	ZEREBRAL	GASTRO- INTESTINAL	HÄMATOPOETISCH
Bestimmendes Organ	Gehirn	Dünndarm	Knochenmark
Schwellendosis (Sv)	20	5	1
Latenzzeit bis Symptomatik	30 min. – 3 h	3 – 5 Tage	3 Wochen
Symptome	Koma	Durchfälle Flüssigkeitsmangel Schock	Leukozytenmangel ==> Infektionen Blutplättchenmangel ==> Blutungen
Todeszeitpunkt	nach 2 Tagen	nach 2 Wochen	nach 2 Monate
Todesursache	Hirndruck- symptomatik	Kreislaufkollaps bei Blutungen	Infektionen
Prognose	chancenlos	schlecht	gut

Abbildung 5.4: Symptomatik bei akuter Strahlenkrankheit<sup>9</sup>

Mittlere Effektivdosis durch Röntgendiagnostik

SEIBERSDORF LABORATORIES

Untersuchung	Effektivdosis (durchschnittlich)
Zähne - Panoramaröntgen	0,004 – 0,03 mSv
Thoraxorgane	0,02 mSv
Schädel / 2 Ebenen	0,07 mSv
Mammographie	0,3 – 0,7 mSv
Brust-Wirbelsäule (2 Ebenen)	0,7 mSv
Lenden-Wirbelsäule (3 Aufnahmen)	1,3 mSv
CT des Schädels	2,3 mSv
CT des Abdomens/Beckens	10 mSv
Myokard-Szintigramm	5-20 mSv
Ganzkörper – PET	6 mSv

Quelle: © „Orientierungshilfe Radiologie“ 4. Aufl. 2011; Bundesfachgruppe Radiologie der Österreichischen Ärztekammer und der Österreichischen Röntgengesellschaft.  
<http://orientierungshilfe.vbdo.at/strahlenschutz/>

Abbildung 5.5: Effektivdosis beim Einsatz von Röntgenstrahlung<sup>10</sup>



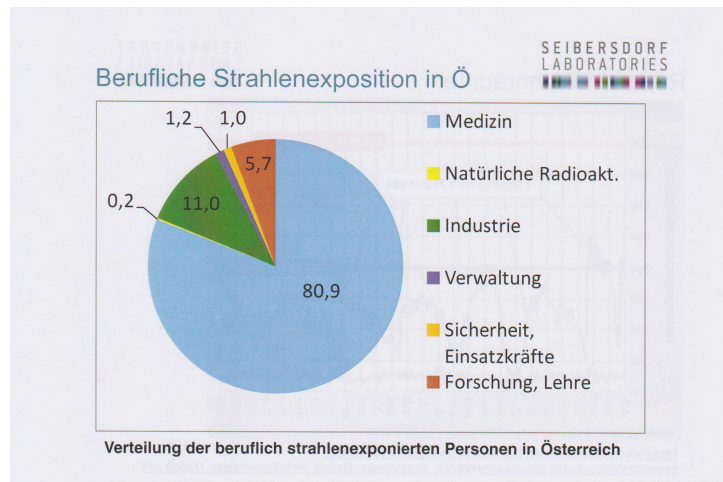


Abbildung 5.6: Berufliche Strahlenexposition in Österreich<sup>11</sup>

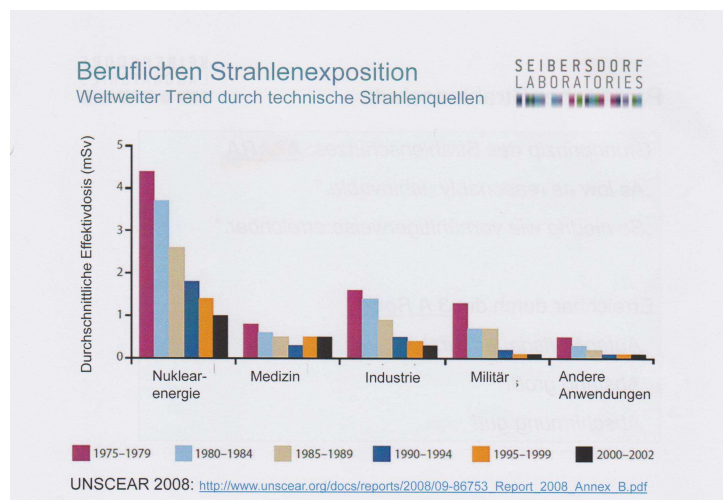


Abbildung 5.7: Berufliche Strahlenexposition weltweit<sup>12</sup>

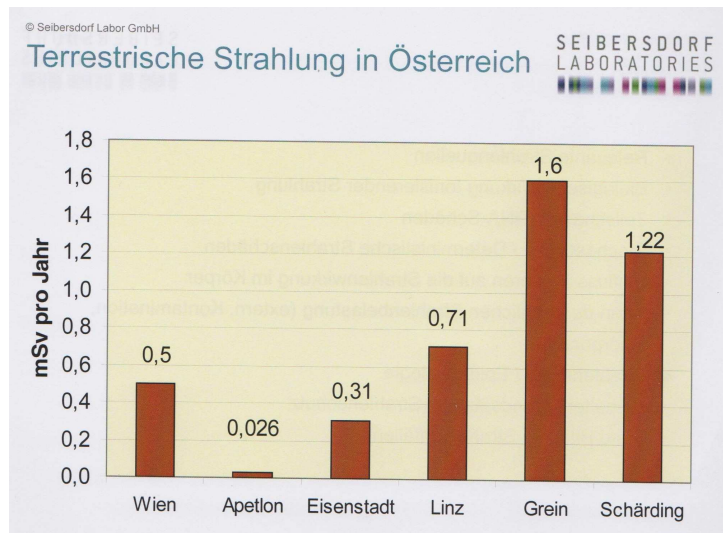


Abbildung 5.8: Terrestrische Strahlung in Österreich<sup>13</sup>

## 5.4 Strahlenschäden

Durch die Einwirkung von ionisierender Strahlung kommt es zur Bildung von Radikalen, dabei handelt es sich um ungeladene Atome mit einem freien Elektron, die auf Grund dessen sehr reaktionsfreudig ist. Weiters kommt es zu Bindungsbrüchen in den Atomen sowie zur Bildung von Ionen.

Eine indirekte Schädigung des Menschen, dessen Zellen ja zu fast 80% aus Wasser bestehen, erfolgt auch durch die Radiolyse von Wasser, welche bei Strahleneinwirkung entsteht. Hier werden die Wassermoleküle ionisiert und freie Radikale gebildet.

Als Folgeerscheinungen können Schäden an der DNS auftreten, welche zum Zelltod oder zu einem Zelldefekt führen können.

Beim Zelltod unterscheidet man drei verschiedene Arten.

Es gibt den sogenannten reproduktiven Zelltod, wobei die Fähigkeit zur Zellteilung eingeschränkt wird.

Bei der Nekrose, einer anderen Form des Zelltods werden die Zellmembranen geschädigt und in Folge undicht. Der Inhalt der Zellen tritt somit aus und führt zu einer Entzündungsreaktion.

(vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 7f, 10f)

Bei Mutationen, also Schäden der DNA, kommt es zu Schädigungen an den Basen sowie zu Brüchen in den Einzel- oder Doppelsträngen.

Wird eine Mutation fixiert, dann bleibt sie in der DNA, also im Erbgut, enthalten. Bei den Basenschädigungen kommt es beispielsweise zu falsch eingebauten Basen oder eine Base wird vergessen und es entsteht eine Lücke im Strang.

(vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 12f)

Es folgen zwei Diagramme, welche die unterschiedlichen Wirkungen einer Ganzkörper- und einer Teilkörperbestrahlung in Abhängigkeit der Energiedosis und die Empfindlichkeit von Geweben bei hohen Dosen darstellen.

(vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 23, 25)

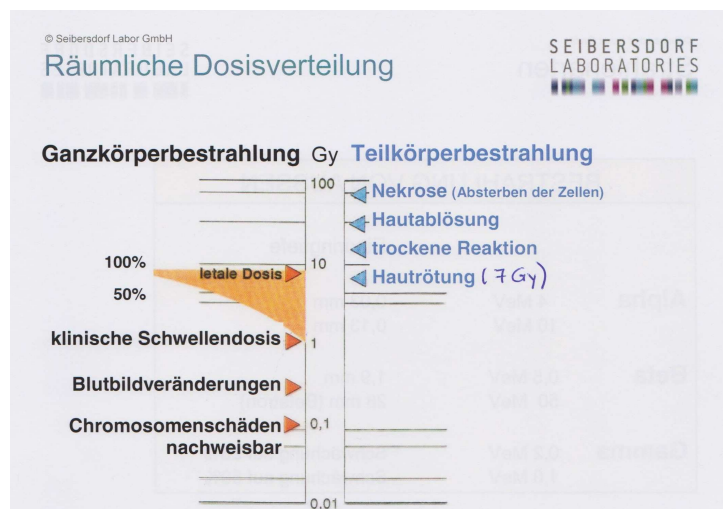


Abbildung 5.9: Räumliche Dosisverteilung<sup>14</sup>



Abbildung 5.10: Strahlenempfindlichkeit von Geweben<sup>15</sup>

## 5.5 Strahlenbelastung

Zu den drei Hauptursachen für Strahlenbelastung zählen Kontamination, Inkorporation sowie die Bestrahlung von aussen.

(vgl. Seibersdorf Academy, *Strahlenbiologie*, Stand: 14.10.2014, Folie 29)

### 5.5.1 Bestrahlung und Kontamination

Die Bestrahlung von aussen erfolgt hauptsächlich durch Gammastrahlung, da Alpha- und Betastrahlung über eine sehr geringe Reichweite verfügen und sich bereits durch Kleidung abschirmen lassen.

Eine Kontamination kann durch alle drei Arten der radioaktiven Strahlung erfolgen und stellt eine Belastung der Haut dar. Die Gefahr hierbei besteht darin, dass es zu einer Verschleppung kommt und infolge zu einer Inkorporation. Um eine Kontamination zu vermeiden, sollte man Strahler keinesfalls berühren und stets Schutzkleidung tragen.

(vgl. Seibersdorf Academy, *Strahlenbiologie*, Stand: 14.10.2014, Folie 30f)

### 5.5.2 Inkorporation

Bei der Inkorporation handelt es sich um die Aufnahme von Alpha- oder Betastrahlung in den Körper, wobei es in Folge zu einer Organbelastung kommt.

Inkorporation stellt die gefährlichste Form der Strahlenbelastung dar und erfordert daher besondere Vorsichtsmaßnahmen.

Deshalb sollte in radioaktiven Zonen nicht gegessen oder getrunken werden. (vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 32)

Radionuklid	Organ
Be-7	Gesamtkörper
K-40	Blut, Muskel
C-14	Fett
Sr-90	Knochen
J-131	Schilddrüse
Au-198	Verdauungstrakt
Rn-222	Lunge
Am-241	Niere
Ra-226	Knochen
Pu-239	Knochen

Anlage 5, Tab.A,  
StSchVO

Abbildung 5.11: Kritische Organe bei Inkorporation<sup>1</sup>

## 5.6 Strahlenkrankheit

Bei der Strahlenkrankheit handelt es sich um einen deterministischen Strahlenschaden, welcher also dosisabhängig ist.

Ab einer Dosis von ungefähr 1Sv kommt es zu Veränderungen im Blutbild, wobei die Anzahl der roten und weißen Blutkörperchen und Blutplättchen abnimmt. In Folge kommt es dann zur Anämie, einer Immunschwäche und Infekten.

Das sogenannte Gastrointestinalen Syndrome tritt bei einer Dosis von ca. 5

Sv auf, dabei kommt es vorwiegend zu Durchfällen, welche durch den Flüssigkeitsverlust zu starken Kreislaufproblemen führen.

Bei Dosisleistungen ab 20Sv kommt es zu schweren zerebralen Schädigungen, welche innerhalb von 1 bis 2 Tagen sicher zum Tod führen und sich durch Bewusstseinsverlust sowie Krämpfe bemerkbar machen.

Die Prognose für zerebrale Schädigungen sind sehr schlecht.

Der Zeitraum bis zum Auftreten der Symptome ist dosisabhängig und kann Tage bis hin zu mehreren Wochen betragen.

Direkt nach der Belastung treten nur Frühsymptome auf, welche sich durch starke Übelkeit und häufiges Erbrechen äußern.

*(vgl. Dr. Andreas Ziegler, Auswirkungen von ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper, 2013, erstellt für Austrian Research Centers Gmbh-ARC, Seite 9 allg.)*

## 5.7 Belastung durch ionisierende Strahlung im Alltag

Den wenigsten Menschen ist bewusst, dass sie tagtäglich ionisierender Strahlung ausgesetzt sind.

Sowohl die terrestrische Strahlung vom Erdboden, welche von radioaktiven Gestein ausgesandt wird, als auch die kosmische Strahlung aus dem Weltall umgeben die Bevölkerung stets.

Ionisierender Strahlung ist man zusätzlich auch bei einer Röntgenaufnahme ausgesetzt sowie bei einem Flug.

Auch bei der Nahrung spielt ionisierende Strahlung eine Bedeutung, da vermehrt Kalium in Düngemittel verwendet wird und der Anteil des Nuklids  $^{40}\text{K}$  in Lebensmittel größer wird.

Viele Personen sind auch durch ihre Arbeit mit ionisierender Strahlung in Kontakt.

Der größte Anteil der zivilisatorischen Belastung geht jedoch auf das Konto von medizinischen Untersuchungen, wie etwa das Zahnröntgen, CT Aufnahmen oder Krebsbehandlungen, wo sehr hohe Dosen zur Anwendung kommen.

*(vgl. Diehl, Erb, Heise, Kotthaus, Lindner, Schlichting, Schmalhofer, Schön, Schröder, Schulze, Tews, Tillmanns, Winter; Titel: Physik Oberstufe; 1. Auflage, Cornelius Verlag Berlin, 2011, Seite 384f)*

### 5.7.1 Natürliche Strahlenquellen

Bei den natürlichen Strahlenquellen handelt es sich um die kosmische und die terrestrische Strahlung. Diese kommen dadurch zustande, dass die im Weltall eintreffende kosmische Strahlung aus Teilchen mit hoher Geschwindigkeit und aus energiereichen Gammaquanten besteht. Bei diesen geladenen Teilchen handelt es sich zum größten Teil um Protonen, welche vom Magnetfeld der Erde zu den Polen hin abgelenkt werden und durch die Atmosphäre dann teils wieder absorbiert werden. Mit zunehmender Höhe steigt die Effektivdosis, welcher wir durch die kosmische Höhenstrahlung ausgesetzt sind.

Die terrestrische Strahlung wurde bereits am Beginn anhand der natürlich vorkommenden Nuklide erläutert, hier folgt also nur eine kurze Erweiterung dieser Erkenntnisse.

Da sich im Erdboden auch radioaktive Gesteine befinden, gelangt die terrestrische Strahlung an die Oberfläche. Diese kann regional natürlich sehr unterschiedlich sein, da sich die Bodenzusammensetzung vielerorts stark unterscheidet.

Durch die vermehrte Verwendung von Kalium bei Düngemittel erhöht sich beispielsweise der  $^{40}\text{K}$ -Anteil durch die Nahrungsaufnahme in unserem Körper. *(vgl. Diehl, Erb, Heise, Kotthaus, Lindner, Schlichting, Schmalhofer, Schön, Schröder, Schulze, Tews, Tillmanns, Winter; Titel: Physik Oberstufe; 1. Auflage, Cornelius Verlag Berlin, 2011, Seite 384)*

### 5.7.2 Weitere Strahlenquellen

Dieses Kapitel handelt von den sogenannte zivilisatorischen Strahlenquellen, da diese einen viel größeren Beitrag leisten in Bezug auf die Strahlenbelastung, als etwa die natürlichen Strahlenquellen.

Weiters sind die zivilisatorischen Belastungen stark von den individuellen Lebensgegebenheiten, wie etwa der beruflichen Tätigkeit einer Person, abhängig.

Der größte Teil dieser Form der Belastungen entfällt allerdings auf medizinische Untersuchungen.

Bei einigen medizinischen Behandlungen wird ein vielfacher Anteil der natürlichen Strahlung aufgenommen. So ist man bei einer Röntgenuntersuchung ungefähr 1mSv ausgesetzt, bei CT-Aufnahmen sind es schon 10mSv. In der Krebstherapie kommen besonders hohe Dosen zur Anwendung, wenn mit radioaktiven Medikamenten oder mit radioaktiver Strahlung gearbeitet wird. Weitere Quellen bezüglich zivilisatorischen Belastungen stellen Kernkraftwerke zur Erzeugung von elektrischer Energie sowie Kohlekraftwerke dar.

Beim Abbau von Kohle bleibt meist Uranerz in geringen Mengen vorhanden, welches dann bei der Verbrennung in die Atmosphäre gelangt.

Sowohl Kernkraftwerk als auch Kohlekraftwerke müssen Strahlenschutzrichtlinien einhalten.

*(vgl. Diehl, Erb, Heise, Kotthaus, Lindner, Schlichting, Schmalhofer, Schön, Schröder, Schulze, Tews, Tillmanns, Winter; Titel: Physik Oberstufe; 1. Auflage, Cornelius Verlag Berlin, 2011, Seite 385)*



## Kapitel 6

# Der Super-GAU in Tschernobyl



Abbildung 6.1: Tschernobyl<sup>16</sup>

Der Reaktorunfall in Tschernobyl, welcher sich im Jahre 1986 ereignet hat, gilt als der folgenschwerste Unfall den es je gegeben hat in Bezug auf die Nutzung von Kernenergie.

*(vgl. eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karena, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite17)*

## 6.1 Beschreibung des Kernkraftwerks in der Stadt Tschernobyl

Das Kernkraftwerk Lenin, in welchem sich im Jahr 1986 die furchtbare Katastrophe ereignet, befand sich in der Stadt Tschernobyl, welche ungefähr 100 km von Kiew entfernt liegt.

In jenem Jahr, in welchen sich der Unfall ereignete, bestand das Kraftwerk aus 4 Reaktorblöcken und der Bau zweier weiterer Blöcke war bereits in Planung. Die vier Blöcke wurden allesamt zwischen 1977 und 1983 in Betrieb genommen.

Der Grund für den Bau der Kraftwerke war hauptsächlich die Herstellung von Strom aber natürlich auch die Herstellung von Plutonium, welches für Kernwaffen verwendet werden sollte.

In der Nähe des Kernkraftwerkes existierte eine kleine Stadt namens Pripjat, in der die Mitarbeiter des Kraftwerks und deren Familien untergebracht waren.

1986 lebten ungefähr 50.000 Personen in der Stadt Pripjat, welche im übrigen auch als eine der modernsten Städte der damaligen UdSSR galt. Pripjat selbst wurde von einem kleinen Fluss durchquert, von welchem auch das benötigte Kühlwasser für den Reaktor stammte.

*(vgl. eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karna, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite17f)*

## 6.2 Die Nacht vom 25.April

Für die Diensthabenden des Kraftwerks Lenin, welche vom 25. auf den 26.April für den Nachtdienst eingeteilt waren, stand ein Belastungstest des Reaktors

am Programm.

Dieser Belastungstest habe angeblich schon am 24. April mit dem Herunterfahren des Reaktors, begonnen.

Über die genaue Ursache des Unfalls, welcher sich spät Nachts ereignet, gibt es viele Theorien.

Gegen 1 Uhr morgens trat im Kernkraftwerk im Zuge der Testvorbereitungen ein unvorhergesehenes Problem auf.

Die Temperatur im Reaktor stieg plötzlich auf einen enorm hohen Wert an, obwohl eigentlich mit dem Herunterfahren des Reaktors das Gegenteil erwünscht war. In weiterer Folge kam es dann zu mehreren Explosionen, wobei der obere Teil des Gebäudes komplett weg-gesprengt wurde.

Die Feuerwehrleute, welche gerufen wurden um die Brände zu beseitigen, waren sich der Gefahr, welche sie umgibt, nicht bewusst.

Aufgrund der wirklich sehr hohen Strahlung, welche dort zu diesem Zeitpunkt herrschte, versagten die meisten der Strahlungsmessgeräte oder wurden zerstört.

Einige Wochen nach dem Vorfall in dem Reaktor sind die meisten Feuerwehrmänner, welche beim Löschen der Brände im Reaktor beteiligt waren, an den Folgen der Strahlung, also aufgrund akuter Strahlenkrankheit, verstorben. Ein wesentlicher Kritikpunkt am Vorgehen der Politik bezüglich dieses Themas ist, dass die umliegende Bevölkerung von diesem Vorfall und der Gefahr, welcher sie damals ausgesetzt waren, nicht informiert wurde.

Es war zwar bekannt, dass es im Kraftwerk gebrannt hat, allerdings wurden der Bevölkerung keine weiteren Details erklärt, auch nicht, dass sie tatsächlich in Lebensgefahr schweben.

Am 01. Mai fand traditionell eine große Feier anlässlich des Tags der Arbeit in Kiew statt. Auch zu diesem Zeitpunkt ließ man die Bevölkerung bezüglich der sie umgebenden Gefahr im Unwissen, obwohl bereits Soldaten hier in Schutzausrüstung in der Nähe Tschernobyls präsent waren.

Die Evakuierung der Stadt Pripjat begann am 27. April, wobei die EinwohnerInnen gebeten wurden, nur das Notwendigste mit sich zu nehmen und ihre Haustiere zurückzulassen, da sie bald wieder in ihre Häuser und Wohnungen zurückkehren können.

In den darauffolgenden Wochen begann das Militär dann alle zurückgebliebenen Tiere zu erschießen.

Am 02.Mai, also einen Tag nach dem feierlichen Tag der Arbeit, wurde die Evakuierung dann auf alle im Umkreis von 30km vom Kernkraftwerk lebenden Menschen ausgeweitet.

Die Löscharbeiten im Kraftwerk stellten sich als sehr schwierig heraus, einerseits weil die Graphitblöcke, welche die Brennstäbe beinhalteten, weiter brannten und andererseits, weil man nur durch die gesprengte Decke Löscharbeiten durchführen konnte. Dort herrschte allerdings eine extrem hohe Strahlungsaktivität.

Die Hubschrauber, welche mit Sand und Blei gefüllte Säcke zur Brandbekämpfung in den Reaktor abwarfen, waren mit einer viel zu geringen Bleiabschirmung ausgestattet.

Es wurden Soldaten und Reservisten aus ganz Tschernobyl eingesetzt, um bei den Lösch- und Aufräumarbeiten mitzuhelfen. Leider waren auch diese kaum darüber informiert, was sie am Unfallort erwartet und in welche Gefahr sie sich begeben.

*(vgl. eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karena, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite 18f,20f)*

## 6.3 Bekanntgabe und Maßnahmen

Im Westen Europas wusste die Bevölkerung sehr lange Zeit nicht über den Vorfall in Tschernobyl Bescheid.

Die ersten Personen, welche die radioaktive Wolke über Europa entdeckten, waren MitarbeiterInnen eines schwedischen Atomkraftwerks. Dort wurden stark erhöhte Strahlenwerte gemessen, vorerst dachte man, dass diese auf den eigenen Reaktor zurückzuführen sind. Ihre Recherche brachte sie dann allerdings zu dem Ergebnis, dass radioaktive Partikel von Richtung Süden nach Europa getragen wurden.

Am Abend des 28. Aprils wurde dann erstmals offiziell bestätigt, dass es im Kraftwerk Lenin zu einem Unfall gekommen ist und auch einige Opfer zu beklagen sind.

Diese Nachrichten breiteten sich natürlich sehr schnell aus und noch am selben Abend erschienen Berichte darüber im europäischen Fernsehen.

Am darauffolgenden Tag erschienen die ersten Zeitungsberichte über den Vorfall.

Michael Gorbatschow gab am 14. Mai sein erstes Interview über die Geschehnisse in Tschernobyl, mehr als 14 Tage nachdem der Unfall passiert war. Erst durch diese Stellungnahme wurde den meisten Menschen aus der Sowjetunion das Ausmaß der Katastrophe bewusst.

Bis dahin wurden allerdings schon in einigen Ländern, wie Österreich, Deutschland und der Schweiz, Sicherheitsmaßnahmen in Bezug auf den Verzehr einiger Lebensmittel eingeleitet. Für einige Produkte wie Obst, Gemüse und Pilze wurden Einführungsstopps verhängt und nach einem beträchtlichen Niederschlag wurde der Sand auf den Kinderspielplätzen ausgetauscht.

*(vgl. eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karna, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite21f)*

Des weiteren begann man Pläne für einen Sarkophag zu entwerfen, um den Austritt der radioaktiven Strahlung aus Reaktor 4 zu vermindern. Dabei soll es sich um eine Bleiummantlung handeln, wofür allerdings das Dach des explodierten Reaktors sauber sein müsste.

Ein Problem stellten hierbei die Trümmer, welche als Folge der Explosionen am Dach zu finden waren, dar. Um diese zu beseitigen verwendete man zuerst Roboter, diese hielten aber der vorherrschenden Strahlung nicht stand und somit begann man junge Männer anzuwerben und dafür einzusetzen. Man versprach ihnen im Gegenzug etliche Prämien und Auszeichnungen.

Die Männer säuberten also die Dachfläche per Hand, dabei wurde folgendermaßen vorgegangen: Jeder der Männer durfte maximal eine Minute am Dach Aufräumarbeiten durchführen, dann wurde er bereits von jemand an-

ders abgelöst, da die Strahlung dort so groß war, dass sie sonst an akuter Strahlenkrankheit gestorben wären. Dieselben 600.000 Männer und Frauen, die das Dach säuberten, errichteten anschließend auch den Sarkophag über den Reaktor 4.

Zwar wurde die Umgebung des Ortes als verbotene Zone deklariert, jedoch wurde die Stromerzeugung in den anderen 3 Reaktorblöcken noch Ende 1986 wieder aufgenommen.

*(vgl. eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karna, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite22f)*

## 6.4 Die Umgebung von Tschernobyl heute

Um Tschernobyl gibt es eine 30km große Sperrzone, die vom Militär bewacht wird. Es existieren außerhalb dieser verbotenen Zone noch weitere Gebiete, die gesperrt werden mussten. Die Bevölkerung musste umgesiedelt werden. Die Sperrzone schreckt jedoch viele Menschen nicht davon ab in ihre ursprünglichen Häuser und Wohnungen zurück zu kehren. Vor allem ältere Menschen kehren in ihre Heimat zurück und auch viele Personen, die in ihren neuen Wohnorten als "verstrahlt" diskriminiert werden.

Auch Flüchtlinge aus Krisengebieten, für welche die radioaktive Strahlung weniger als Gefahr angesehen wird als der Krieg in ihrer Heimat, begeben sich in die Sperrzone.

Einige andere Gebiete, welche vorerst auch als verbotene Zone galten, wurden durch Änderungen der Strahlengrenzwerte um gestuft und waren somit plötzlich wieder bewohnbar.

Hier müssen die Menschen allerdings sehr viele Verbote beachten, denn man darf dort weder Pilze sammeln noch Fische fangen oder eigens angebautes Gemüse verzehren, um nur einige der unzähligen Verbote genannt zu haben. Für Westeuropa wäre diese Situation nicht so tragisch wie für die Menschen in der Ukraine, die sich größtenteils selbst versorgen mussten.

Im Jahre 2000 wurde der letzte Reaktor zur Stromerzeugung in Tschernobyl geschlossen und somit gab es in dieser Gegend auch keinen Arbeitgeber mehr. (vgl. *eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karna, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite23f*)

## 6.5 Auswirkungen

Die Größe der radioaktiven Belastung rund um Tschernobyl variiert von Region zu Region und ist auch von der vorherrschenden Bodenbeschaffung der Gebiete abhängig und nicht nur von der damaligen Windrichtung.

Beim Reaktorunfall wurden vor allem zwei radioaktive Isotope in großen Mengen freigesetzt,  $Jod_{131}$  und  $Cs_{137}$ .

Hierbei ist zu beachten, dass Jod eine nicht so bedeutenden Rolle spielt wie das Cäsium, da dies eine viel längere Halbwertszeit aufweist und somit für die Statistiken zur längerfristigen Strahlenbelastung durch den Reaktorunfall herangezogen wird.

(vgl. *eBook Super Collection - Austria, Kalmbach Karna, AN:487167, Tschernobyl und Frankreich: die Debatte um die Auswirkungen des Reaktorunfalls im Kontext der französischen Atompolitik und Elitenkulturen, Peter Lang Verlag, 2011, printed on 5.4.2016 via Universität Wien, Seite27*)

Der Reaktorunfall in Tschernobyl beschleunigte den Ausstieg vieler westlicher Länder aus der Atomenergie.

In Europa, genauer in Österreich und Dänemark, hat man bereits vor dem Unfall im Kraftwerk Lenin, die Gewinnung von elektrischer Energie aus Atomenergie gestoppt. Nach dem Unfall in der Ukraine stiegen dann auch weitere Länder wie Deutschland oder Italien aus der Atomenergie aus, der Osten jedoch verfolgte hier eine andere Entwicklung und es wurde nach wie vor an der Atomenergie festgehalten.

Für die Europäische Union war es natürlich ein Problem, dass die neuen

Mitgliedsstaaten aus dem Osten auf Atomenergie setzten, gerade auch deshalb, weil viele Kraftwerke im Osten Europas die Sicherheitsstandards der westlichen Länder nicht erfüllen konnten.

Somit wurde bei Beitrittsverhandlungen zur EU bereits verlangt, Hochrisiko-Reaktoren abzuschalten.

Insgesamt waren aus globaler Sicht im Sommer 2009 noch 435 Atomkraftwerke in 31 Ländern in Betrieb, weitere 137 waren zu dieser Zeit in Planung. Hierbei ist jedoch zu erläutern, dass ein Atomkraftwerk, welches sich in Planung befindet, nicht automatisch auch gebaut wird.

Die sechs größten Atombetreiber stellen die USA, Frankreich, Japan, Deutschland, Südkorea und Russland dar. Weltweit werden ungefähr 14% des Strombedarf aus Atomenergie gewonnen.

*(vgl. Leseprobe; Mez, Gerhold, de Haan; Titel: Atomkraft als Risiko, Analysen und Konsequenzen nach Tschernobyl; Peter Lang GmbH - Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2010, Seite 15f)*



Abbildung 6.2: Reaktorblock 4 <sup>17</sup>

## 6.6 Gesundheitliche Auswirkungen

Laut Ärzten aus der Tschernobyl-Region hat sich seit dem Unfall die Anzahl der Krebserkrankungen stark erhöht, es gibt mehr Schilddrüsenerkrankungen



und eine erhöhte Säuglingssterblichkeit. Besonders betroffen sind hiervon die Männer, welche bei den Aufräumarbeiten am Reaktor mitgeholfen haben, sowie deren Kinder.

Als Tschernobyl-Tote zählen allerdings nur Personen, die aufgrund des Unfalls an akuter Strahlenkrankheit oder an Krebs sowie Leukämie verstorben sind. Alle anderen Verstorbenen zu dieser Zeit, welche also nicht durch eine der drei oben genannten Erkrankungen ums Leben gekommen sind, gelten nicht als tot durch die Folgen des Reaktorunfalls.

*(vgl. Leseprobe; Mez, Gerhold, de Haan; Titel: Atomkraft als Risiko, Analysen und Konsequenzen nach Tschernobyl; Peter Lang GmbH - Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2010, Seite 75f)*

Im Jahr 2005 wurde von der Weltgesundheitsorganisation und der IAEA berichtet, dass weniger als 50 Personen durch den Unfall in Tschernobyl verstorben sind.

In den Jahren nach dem Unfall wurden viele Verbote ausgesprochen, vor allem betraf dies den Verzehr gewisser Lebensmittel. Da aber sehr viele Personen in der Ukraine in Armut lebten, war es ihnen egal, ob ihre Lebensmittel nun kontaminiert waren oder nicht.

Eine ordentliche Folgenforschung bezüglich Tschernobyl war auch deshalb nicht möglich, weil diese viel Geld gekostet hätte und somit die Unterstützung des Staates gebraucht hätte.

Die am häufigsten betroffenen Staaten durch den Unfall waren Belarus, die Ukraine und Russland.

*(vgl. Leseprobe; Mez, Gerhold, de Haan; Titel: Atomkraft als Risiko, Analysen und Konsequenzen nach Tschernobyl; Peter Lang GmbH - Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2010, Seite 76)*

# Kapitel 7

## Andwendungen radioaktiver Strahlung

### 7.1 MedAustron - Ionentherapie im Kampf gegen den Krebs

Das Unternehmen MedAustron hat seinen Sitz in 2700 Wiener Neustadt im Herzen Niederösterreichs und ist eines der weltweit 6 verfügbaren Zentren für Ionentherapie. Dabei handelt es sich um eine Form der Strahlentherapie, bei der Kohlenstoffionen und Wasserstoffprotonen anstelle von Röntgenstrahlung, welche beispielsweise bei einer herkömmlichen Strahlentherapie zum Einsatz kommt, verwendet werden.

(vgl. <https://www.medastron.at/de/home> sowie <https://www.medastron.at/de/ionentherapie>; 12.12.2017)

#### 7.1.1 Die Gewinnung des Partikelstrahls

Um solch einen Teilchenstrahl produzieren zu können, wurde ein Teilchenbeschleuniger, bestehend aus einem Linearbeschleuniger und einem Synchrotron in Kooperation mit vielen internationalen Firmen sowie dem CERN, produziert.

Mittels dem Beschleuniger kann dann der Strahl, entweder ein Wasserstoff-

protonenstrahl oder ein Kohlenstoffionenstrahl, produziert werden. Werden Protonen verwendet, so können Energien bis zu 800MeV erzeugt werden, bei Verwendung von Kohlenstoffionen sind bis zu 400MeV möglich, wobei dieser eine größere biologische Wirkung erzielt.  
(vgl. <https://www.medaustron.at/de/teilchenbeschleuniger>)

Der Beschleuniger verfügt über mehrere Quellen, den Ursprung des Strahls sozusagen, der dann infolge im Linearbeschleuniger durch elektrische Wechselfelder, sogenannte Drift Tubes, beschleunigt wird.

Anschließend werden die Teilchen in das Synchrotron injiziert, das einen Umfang von 80 Metern aufweist und die Teilchen auf ungefähr 2/3 der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, bevor diese dann auf den Patienten in einem der Behandlungsräume treffen.

Durch ca. 300 Magneten erfolgt die Fokussierung und Führung des Teilchenstrahls in den Vakuumröhren.

(vgl. <https://www.medaustron.at/de/teilchenbeschleuniger>)

Es gibt insgesamt vier Behandlungsräume, wobei einer hiervon nur für die nicht-klinische Forschung bereit steht. In jedem Raum befindet sich ein einzigartiger Positionsroboter, durch welchen es möglich ist, die Patienten äußerst extrem zu positionieren.

(vgl. <https://www.medaustron.at/de/bestrahlungsraume>)

Seit Dezember 2016 werden im Ionentherapiezentrum MedAustron Krebspatienten behandelt.



Abbildung 7.1: Synchrotronbeschleuniger<sup>18</sup>

### 7.1.2 Warum Ionentherapie?

Bei einer herkömmlichen Strahlentherapie ist eines der wesentlichen Nachteile, dass das dem Krebs umliegende, gesunde Gewebe, auch zerstört wird, nicht so bei der Ionentherapie oder Partikeltherapie.

Diese Form der Strahlentherapie ist viel schonender für das umliegende Gewebe.

Prinzipiell wird das Gewebe vor dem Tumor gut und jenes hinter dem Tumor fast vollständig geschont, dazu finden Sie eine Abbildung weiter unterhalb. Die Energie wird also sehr genau auf die Tumorzellen abgegeben.

Aus diesen Gründen eignet sich die Ionentherapie vor allem für Tumore, die sich in der Nähe von strahlenempfindlichen Organen, wie Rückenmark oder Gehirn befinden.

Besonders erfolgreich hat sich diese Form der Therapie für Kinder und Jugendliche erwiesen, da Gewebe im Wachstum besonders sensibel auf Strahleneinwirkung reagiert. Wesentlich ist auch, dass die Schonung des gesunden Gewebes und eine Senkung des Zweitkrebsrisikos im Zentrum der Forschung bei MedAustron stehen.

(vgl. <https://www.medaustron.at/de/ionentherapie>)

Die Vorteile der Therapie lassen sich auch anhand des folgenden Diagramms erkennen:

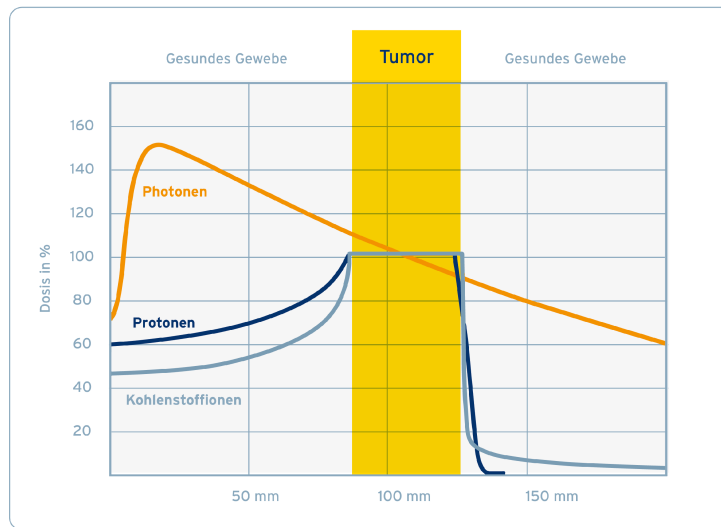


Abbildung 7.2: Dosisverteilung<sup>19</sup>

Dieses Diagramm zeigt die Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Dosis, angegeben in Prozent. Es lässt sich gut erkennen, dass die Energie hier sehr genau auf den Tumor abgegeben wird und das gesunde Gewebe möglichst geschont wird, im Gegensatz zum Einsatz von Photonen.  
(vgl. <https://www.medaustro.at/de/bestrahlungsraume>)

### 7.1.3 Indikationen

Die Ionentherapie findet Anwendung vor allem bei Tumoren, bei denen die normale Form der Strahlentherapie nicht ausreichend wirksam ist bzw. falls der Tumor von strahlenempfindlichen Gewebe umgeben ist.

Mehr als 150.000 Menschen weltweit wurden mit dieser Form der Therapie bereits behandelt und dies mit ausgezeichneten Ergebnissen.

Es folgen eine Auswahl an Tumoren, bei denen solch eine Therapie angewandt werden kann:

- Schädelbasis- und Kopftumore
- Hirntumore

- Sarkome, vor allem in der Nähe des Rückenmarks
- Einige HNO-Tumore
- Tumore in der Beckenregion

(vgl. <https://www.medaustro.at/de/indikationen>)

## 7.2 Beschleuniger

Vor allem für die Behandlung von Tumoren werden Teilchenbeschleuniger eingesetzt. So wird beispielsweise in vielen Kliniken ein Betatron verwendet. (vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: *Experimentalphysik 4*, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 216)

Mithilfe des Betatrons werden Elektronen auf sehr hohe Energien beschleunigt, wobei im Gegensatz zum herkömmlichen Zyklotron der Bahnradius der Teilchen sich während der Beschleunigung nicht ändert. (vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: *Experimentalphysik 4*, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 69)

Während der Behandlung wird dann der Patient so positioniert, sodass nur die Tumorregion die maximale Bestrahlungsdosis erhält und das gesunde Gewebe größtenteils geschont wird.

Da Beschleunigeranlagen natürlich eine große finanzielle Belastung mit sich bringen, wird diese Form der Strahlentherapie meist nur bei sehr komplizierten Tumorformen eingesetzt, wenn keine andere Alternative besteht.

Ein Beispiel hierfür ist etwa die Bestrahlung von Augenkrebs, da man hier nur sehr kleine Gebiete bestrahlen will und der Rest des Auges unbedingt geschont werden sollte, um es nicht zu zerstören.

(vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: *Experimentalphysik 4*, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 216f)

## 7.3 Kernreaktoren



Abbildung 7.3: Kernreaktor Isar in Deutschland <sup>20</sup>

### 7.3.1 Allgemeine Informationen

Obwohl weitgehend mit der Abschaltung der meisten Kernreaktoren begonnen wurde, sind nach wie vor noch einige im Betrieb bzw. werden neue erbaut. Viele Länder vertreten die Meinung, dass auf Kernenergie nicht vollständig verzichtet werden kann, weil dadurch das  $CO_2$  - Problem reduziert werden kann und Kernreaktoren dauerhaft einsetzbar sind, somit die Grundlast der Energieversorgung gut abdecken können.

Hierzu ein paar Fakten:

Bei der Spaltung eines Urankerns wird eine Energie von ungefähr 200MeV frei, hingegen werden bei der Verbrennung von einem C-Atom zu einem  $CO_2$ -Atom nur 13,5eV frei. Vergleicht man diese beiden Fakten miteinander, dann lässt sich erkennen, dass aus der Spaltung von einem Kilogramm Uran genauso viel Energie gewonnen wird, wie bei der Verbrennung von 750t Kohle, bei der nebenbei 2770t  $CO_2$  entstehen.

Ein großer Nachteil der Nutzung von Kernenergie ist selbstverständlich die Lagerung, da einige Spaltprodukte sehr langlebig sind und somit geeignete Lagerungsstätten gefunden werden müssen.

Weiters muss die Gefährdung der umgebenden Population im Falle eines Unfalls oder einer Naturkatastrophe, wie bereits in Fukushima, berücksichtigt werden.

(vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: *Experimentalphysik 4*, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 217)

### 7.3.2 Aufbau eines Reaktors

Grundlegend wird zwischen homogenen und heterogenen Reaktoren unterschieden, wobei bei homogenen Spaltstoff und Moderator vermischt sind und bei heterogenen liegt eine räumliche Trennung von Uranbereich und Moderator vor. Heutzutage sind hauptsächlich heterogene Reaktoren in Betrieb.

Jener Teil eines Reaktors, in dem die Kernspaltung erfolgt, wird als Reaktorkern bezeichnet.

Prinzipiell besteht ein Reaktor immer aus Brennstäben, Steuerstäben und einem Moderator, wobei hinzuzufügen ist, dass es graphitmoderierte und auch wassermoderierte Reaktoren gibt.

Weiters unterscheidet man zwischen Druckwasser- und Siedewasser-Reaktoren, wobei erstere aus zwei Wasserkreisläufen bestehen und der Siedewasserreaktor aus nur einem.

(vgl. Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: *Experimentalphysik 4*, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 220)

In Reaktoren verwendet man  $U_{235}$ , welches allerdings nur einen sehr geringen Anteil am natürlichen Uran ausmacht. Daher hat man begonnen,  $U_{235}$  anzureichern, dies passiert durch ein spezielles Verfahren wobei Urandioxid zu einer Art Pellets gepresst wird, mit welchem die sogenannten Brennstäbe gefüllt werden. Mehrere Brennstäbe werden dann zu einem Brennelement



zusammengefügt.

Bei der Spaltung werden Neutronen frei, welche abgebremst werden müssen, damit die Wahrscheinlichkeit für weitere Reaktionen erhöht wird.

Die passiert meist durch Wasser, welches in der Fachsprache als Moderator bezeichnet wird.

Zusätzlich werden die Brennelemente von einem sogenannten Reflektor umgeben, der verhindern soll, dass viele Neutronen den Reaktionsbereich verlassen, ohne Kettenreaktionen ausgelöst zu haben.

Mithilfe der Steuerstäbe kann die Kettenreaktion überprüft werden, notfalls also auch gestoppt werden. Dabei handelt es sich um neutroneneinfangende Materialien, wie etwa Bor.

Damit die entstehende Energie dann genutzt werden kann, verwendet man normalerweise Wasser.

*(vgl. Diehl, Erb, Heise, Kotthaus, Lindner, Schlichting, Schmalhofer, Schön, Schröder, Schulze, Tews, Tillmanns, Winter; Titel: Physik Oberstufe Gesamtband, 1. Auflage, Cornelsen Verlag Berlin, 2011, Seite 402ff)*

# Kapitel 8

## Die radioaktive Strahlung als stochastischer Prozess

### 8.1 Allgemein

In diesem Kapitel werden einige Begriffe aus der Stochastik erklärt und der Zusammenhang zwischen einer bestimmten Verteilung und der radioaktiven Strahlung erläutert.

### 8.2 Ideales Zufallsexperiment

Man spricht von einem idealen Zufallsexperiment, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Es wird unter genau festgelegten Bedingungen durchgeführt
- Die Anzahl der möglichen Ergebnisse ist im Vorfeld bekannt
- Der Vorgang kann unter denselben Versuchsbedingungen beliebig oft wiederholt werden

Ein Beispiel für ein solches Experiment wäre das mehrmalige Werfen eines Würfels.

*(vgl. Henze Norbert; Titel: Stochastik für Einsteiger, 10. Auflage, Springer)*

*Spektrum, 2013, Seite 1)*

### 8.3 Ergebnismenge

Die Anzahl der möglichen Ausgänge eines Zufallsexperiments wird als Ergebnismenge oder Grundraum  $\Omega$  bezeichnet, mathematisch stellt  $\Omega$  eine Menge dar.

Betrachtet man das Ziehen einer Karte aus 32 Karten, die man gedanklich durchnummeriert, so wäre  $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, 32\}$ .

Handelt es sich um eine endliche Ergebnismenge  $\Omega$  mit  $s$  Elementen, so schreibt man  $\Omega := \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_s\}$

*(vgl. Henze Norbert; Titel: Stochastik für Einsteiger, 10. Auflage, Springer Spektrum, 2013, Seite 2f)*

### 8.4 Ereignis

Jede Teilmenge vom Grundraum  $\Omega$  wird als Ereignis bezeichnet. Ereignisse werden meist mit Buchstaben aus dem vorderen Alphabet bezeichnet, wie etwa A oder A1, B oder C2, um nur einige zu nennen.

*(vgl. Henze Norbert; Titel: Stochastik für Einsteiger, 10. Auflage, Springer Spektrum, 2013, Seite 5)*

Es gibt auch Ereignisse, bei denen man keine Wahrscheinlichkeit messen kann. Als zulässige Ereignisse wählt man dann eine passende  $\sigma$ -Algebra aus.

### 8.5 Zufallsvariable

Die Zufallsvariable stellt ein Merkmal eines stochastischen Vorgangs dar. Wenn  $\Omega$  einen Grundraum darstellt, so heißt jede Abbildung

$$N : \Omega \longrightarrow \mathbb{R} \tag{8.1}$$

eine Zufallsvariable, falls für jedes  $\alpha \in \mathbb{R}$  die Menge  $\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq \alpha\}$  in der  $\sigma$ -Algebra liegt. Sehen wir  $\Omega$  als Menge der möglichen Ergebnisse, so kann man eine Zufallsvariable  $X$  als eine Vorschrift ansehen, wobei jedem Ergebnis  $\omega$  eine reelle Zahl zugeordnet wird, man schreibt dann  $X(\omega)$ .

Nimmt man als Beispiel ein Glücksspiel, dann wäre  $\Omega$  die Menge aller möglichen Ergebnisse und jedem Ergebnis bzw. Ausgang  $\omega$  wird ein Preis  $X(\omega)$  zugeordnet.

Weist  $X(\omega)$  einen negativen Wert auf, so spricht man von einem Verlust.

(vgl. Henze Norbert; Titel: *Stochastik für Einsteiger*, 10. Auflage, Springer Spektrum, 2013, Seite 10)

## 8.6 Die Poisson-Verteilung

Die Poisson-Verteilung stellt einen wichtigen Begriff in der Stochastik dar und leitet sich aus der Approximation der Binomialverteilung bei großem  $n$  und kleinem  $p$  ab.

Die Zufallsvariable  $X$  besitzt eine Poisson-Verteilung mit dem Parameter  $\lambda > 0$ , falls

$$P(X = k) = e^{-\lambda} \times \frac{\lambda^k}{k!} \dots \text{mit } k=0,1,2,\dots \quad (8.2)$$

Die Poisson-Verteilung wird auch manchmal als Gesetz seltener Ereignisse bezeichnet.

(vgl. Henze Norbert; Titel: *Stochastik für Einsteiger*, 10. Auflage, Springer Spektrum, 2013, Seite 197f)

Es gibt zwar eine gewisse Berechtigung diese Verteilung als "Gesetz seltener Ereignisse" zu bezeichnen, jedoch ist dieser Name nicht ideal, weil es sich auch um sehr häufigen Ereignisse handeln kann.

### 8.6.1 Eigenschaften der Poissonverteilung

Die Poisson-Verteilung kommt dann zum Einsatz, wenn eine große Anzahl an möglichen Ereignissen betrachtet wird, jedes einzelne davon aber relativ

unwahrscheinlich ist.

Hierzu zählen etwa der Zerfall von Atomen, das Detektieren von Elektronen oder die Anzahl an Gewitter innerhalb eines gewissen Zeitraums.

(vgl. Henze Norbert; Titel: *Stochastik für Einsteiger*, 10. Auflage, Springer Spektrum, 2013, Seite 201)

Die Poissonverteilung kann für folgende Ereignisse herangezogen werden:

- Für die Anzahl der Telefongespräche, die in einem bestimmten Zeitintervall beispielsweise in einem Unternehmen eintreffen
- Für die Anzahl der Kunden an einem Bankschalter pro Zeitintervall
- Für die Anzahl von zerfallenden Atomkernen in einem bestimmten Zeitintervall

(vgl. <https://paw.n.physik.uni-wuerzburg.de/reusch/fehler/wisem0102/vorlesung7.pdf>)

### Beispiel

Man betrachte eine Kreuzung an der pro Woche durchschnittlich zwei Verkehrsunfälle stattfinden. Diese Häufigkeit wird mittels einer Poissonverteilung mit  $\mu=2$  beschrieben.

Es soll die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass eine Woche lang kein Unfall stattfindet.

Nun setzt man die entsprechenden Werte für  $\mu$  und  $k$  ein.

$$P(0) = e^{-2} \times \frac{2^0}{0!} = 0,135. \quad (8.3)$$

(vgl. <https://paw.n.physik.uni-wuerzburg.de/reusch/fehler/wisem0102/vorlesung7.pdf>)

### 8.6.2 Die Poisson-Verteilung - eine weitere Darstellung in Verbindung mit Radioaktivität

Bei der Poisson-Verteilung handelt es sich um eine mathematische Vereinfachung der Binomialverteilung unter der Voraussetzung, dass  $p$  klein und konstant ist.

In Verbindung mit Radioaktivität bedeutet dies, dass der Beobachtungszeitraum kürzer ist als die Halbwertszeit eines Atoms oder der Quelle.

Somit bleibt die Anzahl der instabilen Kerne ungefähr konstant während des Beobachtungszeitraumes und die Wahrscheinlichkeit einen Zerfall zu detektieren bzw. zu registrieren ist klein.

Falls der Beobachtungszeitraum beispielsweise nicht kürzer gewählt wird als die Halbwertszeit des Atoms, so verwendet man eine modifizierte Art der Poisson-Verteilung, die Gaußverteilung.

Die Poisson-Verteilung wird in dieser Literatur beschrieben durch folgende Formel:

$$P(x) = \frac{(pn)^x \times e^{-pn}}{x!} . \quad (8.4)$$

Da  $pn = \bar{x}$  gilt, ergibt sich aus (8.4) folgendes:

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x \times e^{-\bar{x}}}{x!} . \quad (8.5)$$

Hier wird noch einmal die Vereinfachung der Binomialverteilung deutlich, denn anstatt der zwei Parameter  $n$  und  $p$ , die man bei der Binomialverteilung benötigt, braucht es bei der Poisson-Verteilung nur mehr einen einzigen Parameter, welcher das Produkt aus  $n$  und  $p$  darstellt.

Weiß man also den Mittelwert, kann man die Amplitude rekonstruieren und zwar für alle Argumente, was sich als sehr hilfreich erweist.

In der Nuklearforschung ist diese Tatsache eine große Hilfe, wenn beispielsweise der Mittelwert noch irgendwie gemessen oder vermutet werden kann, aber es zu den einzelnen, individuellen Wahrscheinlichkeiten keine Vermutung gibt.

Die Varianz der Poisson-Verteilung wird durch

$$\sigma^2 = p \times n = \bar{x} . \quad (8.6)$$

berechnet.

Die Standardabweichung ergibt sich aus:

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}} . \quad (8.7)$$

*(Kapitel 8.6.2, vgl. Knoll, Glenn Frederick Knoll, Titel: Radiation Detection and Measurements, 4.Auflage, Hamilton Printing Company, Copyright John Wiley & Sons, Vereinigte Staaten von Amerika, 2010 ,Seite 70, 73f)*

# Kapitel 9

## Anhang

### 9.1 Abstract - Deutsch

Radioaktive Strahlung spielt im Alltag aller Menschen eine große Rolle, den meisten ist das allerdings gar nicht bewusst. Doch gerade der Unfall in Tschernobyl hat uns gelehrt, welche Schäden die unsichtbare Strahlung hervorrufen kann.

Ich habe vor ungefähr 2 Jahren begonnen in einem Ionentherapiezentrum zu arbeiten. Hier werden Krebspatienten durch einen Ionenstrahl, der mittels Synchrotronbeschleuniger erzeugt wird, bestrahlt.

Täglich beschäftige ich mich also beruflich mit Radioaktivität und in meiner Diplomarbeit wollte ich mich intensiver mit diesem Thema beschäftigen, mit den unterschiedlichen Strahlungsarten und wie man sich dafür bestmöglich schützen kann.

Weiters wird der Unfall in Tschernobyl 1986 erläutert und auf die Wechselwirkung dieser Strahlung mit Materie eingegangen.

Das Ziel meiner Arbeit ist es, die Vor- und Nachteile der radioaktiven Strahlung herauszuarbeiten und Menschen auch darauf aufmerksam zu machen, dass sie stets von ihr umgeben sind, auch wenn man sie nicht sehen kann.



## 9.2 Abstract - Englisch

Even though most people are not aware of it, nuclear radiation has an impact on everyone's daily live. The Chernobyl disaster taught us how destructive this invisible force can be and what damage it can cause.

I have been working in a center for Ion therapy where cancer patients are treated using ionized particles produced in a synchrotron for the last two years which is why I chose the topic of nuclear radiation and how to protect oneself against the different kinds of radiation for my diploma thesis.

Furthermore I will go into detail on the 1986 Chernobyl disaster and the interaction of nuclear radiation with matter.

The goal of this diploma thesis is to detail the pros and cons of nuclear radiation and draw awareness to the fact that even though we cannot see it we are always surrounded by it.

## 9.3 Abbildungsverzeichnis

*Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.*

<sup>1</sup>...Seibersdorf Laboratories, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013,Folie 6

<sup>2</sup>..Seibersdorf Laboratories, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013,Folie 14 oder Originalquelle:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/db/Isotopentabelle\\_Segre.svg/2000px-Isotopentabelle\\_Segre.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/db/Isotopentabelle_Segre.svg/2000px-Isotopentabelle_Segre.svg.png)

<sup>3</sup>...<http://at-web.physik.uni-wuppertal.de/kampert/KP/Uran-Radium-Reihe.jpg>

<sup>4</sup>...<http://at-web.physik.uni-wuppertal.de/kampert/KP/Actinium-Thorium-Reihen.jpg>

<sup>5</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen der Physik ionisierender Strahlung für Anwendungen in der Industrie, Stand: 09.12.2013, Folie 25

<sup>6</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 1

<sup>7</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016, Folie 26

<sup>8</sup>...vgl. Dr. Ziegler Andreas, Auswirkungen ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper, Stand 2013, Seite 3 allg.

<sup>9</sup>...vgl. Dr. Ziegler Andreas, Auswirkungen ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper, Stand 2013, Seite 9 allg.

<sup>10</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016. Folie 35

<sup>11</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016. Folie 36

<sup>12</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie, Stand: 19.01.2016. Folie 38

<sup>13</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 4

<sup>14</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 23

<sup>15</sup>...vgl. Seibersdorf Academy, Strahlenbiologie, Stand: 14.10.2014, Folie 25

<sup>16</sup>...Von Holek - Eigenes Werk (derived from Blank map europe.svg: ), CC

BY-SA 2.5 pl,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3882704>

<sup>17</sup>...Von Arne Mueseler / [www.arne-mueseler.de](http://www.arne-mueseler.de), CC BY-SA 3.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32845924>

<sup>18</sup>...Copyright Thomas Kästenbauer

<sup>19</sup>...Copyright MedAustron

<sup>20</sup>...Von E.ON Kernkraft GmbH - E.ON Kernkraft GmbH, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3772291>

## 9.4 Formelverzeichnis

(1.1)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 66, Formel 2.9

(1.2)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 97, Formel 3.1

(1.3)...Demtröder, Wolfgang Demtröder, Titel: Experimentalphysik 4, 4. Auflage, Springer Verlag, Kaiserslautern, 2014, Seite 44

(2.1)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132, Formel 4.8

(2.2)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132, Formel 4.9

(2.3)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132, Formel 4.10

(2.4)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132, Formel 4.11

(2.5)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 132, Formel 4.12

(2.6)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133, Formel 4.13

(2.7)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133, Formel 4.13

(2.8)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133, Formel 4.14

(2.9)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 133, Formel 4.15

(2.10)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 136, Formel 4.22

(2.11)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 136, Formel 4.23

(2.12)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 136, Formel 4.24

(2.13)....Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138, Formel 4.25

(2.14)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik,4.Auflage,Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138, Formel 4.26

(2.15)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138, Formel 4.27

(2.16)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138, Formel 4.27

(2.17)...Krieger, Hanno Krieger, Titel: Grundlagen der Strahlenphysik, 4. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Ingolstadt, 2012, Seite 138, Formel 11.3

(8.2)...Henze Norbert; Titel: Stochastik für Einsteiger, 10. Auflage, Springer Spektrum, 2013, Seite 197, 24.1

(8.3)... <https://paw.n.physik.uni-wuerzburg.de/reusch/fehler/wisem0102/vorlesung7.pdf>

(8.4)...Knoll, Glenn Frederick Knoll, Titel: Radiation Detection and Measurements, 4. Auflage, Hamilton Printing Company, Copyright John Wiley & Sons, Vereinigte Staaten von Amerika, 2010, Seite 73, Formel 3.23

(8.5)...Knoll, Glenn Frederick Knoll, Titel: Radiation Detection and Measurements, 4. Auflage, Hamilton Printing Company, Copyright John Wiley & Sons, Vereinigte Staaten von Amerika, 2010, Seite 74, Formel 3.24

(8.6)...Knoll, Glenn Frederick Knoll, Titel: Radiation Detection and Measurements, 4. Auflage, Hamilton Printing Company, Copyright John Wiley & Sons, Vereinigte Staaten von Amerika, 2010, Seite 74, Formel 3.28

(8.7)...Knoll, Glenn Frederick Knoll, Titel: Radiation Detection and Measurements, 4. Auflage, Hamilton Printing Company, Copyright John Wiley & Sons, Vereinigte Staaten von Amerika, 2010, Seite 74, Formel 3.29

# Kapitel 10

## Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei allen bedanken, die mich während des Verfassens meiner Diplomarbeit tatkräftig unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer, der immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mich mit seiner fachlichen Kompetenz unterstützt hat.

Weiters möchte ich mich bei Seibersdorf Laboratories für die Bereitstellung vieler Unterlagen bedanken.

Darüber hinaus will ich mich bei einigen meiner Arbeitskollegen und Arbeitskolleginnen bedanken, die mich immer wieder motiviert haben weiter zu machen und mir stets zur Seite gestanden sind, sei es bei Problemen mit LaTeX oder bei der Beschaffung von Literatur.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben.