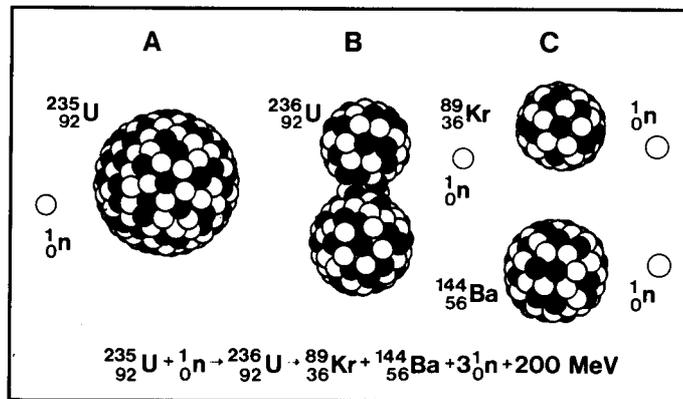


# Radioaktivität (Ionisierende Strahlung)



## Ein Leitprogramm

Verfasst von:

Rainer Ender, Michael Fix,  
Roger Iten, Marcel Pilloud, Caroline Rusch,  
Anna Stampanoni-Panariello, Daniel Zurmühle

Betreuung: Martin Zraggen

Herausgegeben durch Hans Peter Dreyer

© Die Rechte für die Nutzung dieses Leitprogramms liegen bei der ETH  
Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich

Lehrerinnen und Lehrer in der Schweiz können dieses Lernmaterial für den  
Gebrauch in ihrer Klasse kopieren.

Anderweitige Nutzungsrechte, auch auszugsweise,  
sind auf schriftliche Anfrage erhältlich durch:  
Prof. Dr. K. Frey, ETH Institut für Verhaltenswissenschaft,  
Turnerstr. 1, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich

## Einführung

Bei einer oberflächlichen Betrachtung scheint jede Materie verschieden zu sein, was Farbe, Form, Geschmack, Festigkeit und Aggregatzustand betrifft. Eis, Dampf und Regen sind zum Beispiel drei mögliche Erscheinungen des Wassers.

Der griechische Philosoph Demokrit (ca. 460-370 v. Chr.) erklärte diese Tatsache mit folgendem Modell. Obwohl die Materie uns als Kontinuum erscheint, besteht sie aus winzigen Teilchen. Die verschiedenen Eigenschaften der Körper hängen von der gegenseitigen Anordnung dieser Teilchen im Körper ab und von den Bindungen, die sie zueinander haben. Demokrit war der Vorläufer des modernen Atomwissenschaftlers. Er dachte also, dass alle Körper aus winzigen, endlichen Teilchen aufgebaut sind. Diese Teilchen seien, wie er sagte, unteilbar, auf Griechisch  $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  (átomos). So entstand die Bezeichnung Atom.

Heute wissen wir, dass Atome selbst teilbar sind. Sie bestehen aus noch kleineren Bausteinen. Einige Atomkerne sind instabil und zerfallen in andere Atomkerne. Bei diesen Zerfällen werden oft Teilchen und in vielen Fällen elektromagnetische Strahlung emittiert. Dieser Effekt ist bekannt als Radioaktivität. Die Untersuchung der Radioaktivität und ihre Anwendung in der Forschung und in anderen Gebieten (z. B. in der Medizin) ist ein wichtiger Aspekt der modernen Physik.

Folgende Kapitel geben eine Einführung in die Radioaktivität. Mit diesem Grundwissen werden Sie die positiven aber auch die negativen Aspekte der Entwicklung dieses Gebiets der Physik besser beurteilen können.

## Kommentar bei der Umsetzung auf das Internet

Die beiden ersten Kapitel sind sehr breit abgefasst. Viele der dort dargebotenen Informationen sind den Schülerinnen und Schülern aus verschiedenen Quellen bereits bekannt. Die Schulpraxis hat gezeigt, dass nach einer kurzen Repetition direkt mit dem Kapitel 3 begonnen werden kann, wenn Zeit gespart werden muss.

Wenn eine Kollegin oder ein Kollege sich die Mühe nimmt, eine kompaktere Fassung zu formulieren, sind wir dankbar, wenn wir darüber informiert werden. Eventuell werden wir diese Fassung auf dem Internet weitergeben.

Altdorf und Zürich, August 1996:  
Dreyer

M. Zraggen und H. P.



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Einführung .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                                 | <b>1</b>  |
| <b>1. Die kleine Welt .....</b>                                 | <b>3</b>  |
| 1.1 Grössenordnungen .....                                      | 4         |
| 1.1 Grössenordnungen .....                                      | 4         |
| 1.2 Atome und Kerne: wie weiss man von ihrer Existenz? .....    | 6         |
| 1.3 Aufbau des Kerns .....                                      | 9         |
| 1.4 Die vier Kräfte der Natur .....                             | 10        |
| 1.5 Die Elemente .....  | 11        |
| 1.6 Die Isotope .....   | 12        |
| 1.7 Die Bindungsenergie .....                                   | 13        |
| Lernkontrolle .....   | 18        |
| Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 1 .....                    | 19        |
| <b>2. Radioaktivität = Ionisierende Strahlung .....</b>         | <b>21</b> |
| 2.1 Einleitung .....  | 23        |
| 2.2 Strahlenarten .....   | 24        |
| 2.3 Aktivität .....   | 29        |
| 2.4 Halbwertszeit $T_{1/2}$ .....                               | 34        |
| 2.5 Nuklidkarte .....   | 36        |
| 2.6 Zerfallsreihen .....  | 38        |
| 2.7 Anwendungen der Kerntechnik .....                           | 40        |
| Lernkontrolle .....   | 41        |
| Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 2 .....                    | 42        |
| Additum .....   | 45        |
| <b>3. Messung radioaktiver Strahlung und Dosimetrie .....</b>   | <b>53</b> |
| 3.1 Das Geiger-Müller-Zählrohr .....                            | 54        |
| Lernkontrolle .....   | 72        |
| Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 3 .....                    | 73        |
| Ergebnisse zu den Experimenten .....                            | 76        |
| Additum .....   | 77        |
| <b>4. Die biologische Wirkung radioaktiver Strahlung .....</b>  | <b>80</b> |
| 4.1 Biologische Grundkenntnisse .....                           | 81        |
| 4.1 Biologische Grundkenntnisse .....                           | 81        |
| 4.2 Biologische Wirkungen in einer Zelle .....                  | 82        |
| 4.3 Stochastische und nicht-stochastische Effekte .....         | 84        |
| 4.4 Dosis-Wirkungsbeziehung .....                               | 85        |
| 4.5 Und was geschieht mit mir? .....                            | 87        |
| 4.6 Strahlenbelastung in der Natur und durch Zivilisation ..... | 88        |
| 4.7 Strahlenschutz .....  | 91        |
| <b>Additum: Die C-14 oder Radiokarbon-Methode .....</b>         | <b>95</b> |

|  |            |
|--|------------|
| 1. Erd- und Menschheitsgeschichte.....                             | 97         |
| 2. Die Radiokarbon- oder C-14-Methode.....                         | 98         |
| 3. Die Messmethoden.....   | 104        |
| 4. Das Messresultat.....   | 110        |
| 5. Ein Beispiel: Der Bundesbrief.....                              | 112        |
| Mediothek für den Schüler.....                                     | 119        |
| Lösungen zu den Aufgaben im Additum.....                           | 120        |
| Lernkontrolle für den Schüler.....                                 | 121        |
| Lösungen zu den Kontrollfragen.....                                | 122        |
| Kapitel-Test für den Tutor.....                                    | 123        |
| <b>Anhang.....</b>   | <b>125</b> |
| Anhang 1: Mediothek für die Schüler.....                           | 125        |
| Anhang 2: Experimentier- und anderes Material für die Schüler..... | 126        |
| Anhang 3: Vom Autor benutzte Quellen.....                          | 127        |
| Anhang 4: Kapiteltests für den Tutor.....                          | 130        |

# 1. Die kleine Welt

## Übersicht

Die belebte und die unbelebte Materie setzt sich aus kleinsten Bausteinen zusammen, den sogenannten Atomen. Zwei oder mehrere **Atome** können sich zusammensetzen und **Moleküle** bilden. Eine riesige Anzahl von gruppierten Molekülen bildet die Objekte, die wir sehen, z. B. ein Stück Gold oder Wasser. Sind die Atome aber wirklich die kleinsten Bauteile oder bestehen sie aus noch kleineren „Unterbausteinen„? Wieso sind **Elemente** wie Gold, Silber, Uran, Sauerstoff und Wasserstoff so verschieden voneinander?

Dieses Kapitel verschafft Ihnen einen Einblick in die faszinierende kleine Welt der Atome und der anderen Bausteine der Natur.

## Vorgehen

Sie sollten zuerst das ganze Kapitel durchlesen. Es besteht aus 7 Abschnitten.

Im Text befinden sich kleine Aufgaben und Fragen. Damit können Sie Ihr Verständnis überprüfen. Wenn Sie die Aufgaben mit der Überschrift „Lernkontrolle„ richtig gelöst haben, dann können Sie sich zum Kapiteltest melden.

### Lernziele

1. Sie wissen, wie Atome aufgebaut sind.
2. Sie erfahren, was Elemente und ihre Isotope sind.

## 1.1 Grössenordnungen

In der folgenden Tabelle sind die Bezeichnungen von **Vielfachen** einer Grundeinheit gegeben. Ferner wird uns ein Beispiel nützlich sein, um die Grösse der makroskopischen bzw. mikroskopischen Welt zu veranschaulichen.

|          |       |            |   |                             |
|----------|-------|------------|---|-----------------------------|
| <b>E</b> | Exa   | $10^{18}$  | = | 1'000'000'000'000'000'000   |
| <b>P</b> | Peta  | $10^{15}$  | = | 1'000'000'000'000'000       |
| <b>T</b> | Tera  | $10^{12}$  | = | 1'000'000'000'000           |
| <b>G</b> | Giga  | $10^9$     | = | 1'000'000'000               |
| <b>M</b> | Mega  | $10^6$     | = | 1'000'000                   |
| <b>k</b> | Kilo  | $10^3$     | = | 1'000                       |
|          |       |            |   | 1                           |
| <b>m</b> | Milli | $10^{-3}$  | = | 1/1'000                     |
| <b>μ</b> | Mikro | $10^{-6}$  | = | 1/1'000'000                 |
| <b>n</b> | Nano  | $10^{-9}$  | = | 1/1'000'000'000             |
| <b>p</b> | Pico  | $10^{-12}$ | = | 1/1'000'000'000'000         |
| <b>f</b> | Femto | $10^{-15}$ | = | 1/1'000'000'000'000'000     |
| <b>a</b> | Atto  | $10^{-18}$ | = | 1/1'000'000'000'000'000'000 |

**Tabelle 1.1 (Niederer 1990, 3)**

### Beispiel 1.1

Wir nehmen als Grundeinheit den Meter. 2000 Meter, d.h.  $2 \cdot 10^3$  Meter sind zwei **Kilometer** (Bezeichnung: **km**). 0.001 Meter, d. h.  $1 \cdot 10^{-3}$  Meter oder einfach  $10^{-3}$  Meter ist ein **Millimeter** (Bezeichnung: **mm**).

### Beispiel 1.2

Grössenordnungen (Grundeinheit Meter)

|           |  |
|-----------|--|
| $10^{25}$ | Abstand der entferntesten Objekte im Weltall |
| $10^{24}$ |  |
| $10^{23}$ |  |
| $10^{22}$ | Abstand des Andromeda-Nebels.                |
| $10^{21}$ |  |
| $10^{20}$ | Durchmesser unserer Galaxie (Milchstrasse)   |
| $10^{19}$ |  |

---

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| $10^{18}$  |                                    |
| $10^{17}$  |                                    |
| $10^{16}$  | Abstand des nächstgelegenen Sterns |
| $10^{15}$  |                                    |
| $10^{14}$  |                                    |
| $10^{13}$  | Grösse des Sonnensystems           |
| $10^{12}$  |                                    |
| $10^{11}$  | Abstand Erde-Sonne                 |
| $10^{10}$  |                                    |
| $10^9$     | Sonnendurchmesser                  |
| $10^8$     | Jupiter-Durchmesser                |
| $10^7$     | Erddurchmesser                     |
| $10^6$     |                                    |
| $10^5$     |                                    |
| $10^4$     | Everest                            |
| $10^3$     |                                    |
| $10^2$     | Wolkenkratzer                      |
| 10         | Haus                               |
| 1          | Mensch                             |
| $10^{-1}$  | Maus                               |
| $10^{-2}$  | Kirsche                            |
| $10^{-3}$  | Floh                               |
| $10^{-4}$  | Sandkörnchen                       |
| $10^{-5}$  | Blutzelle                          |
| $10^{-6}$  |                                    |
| $10^{-7}$  |                                    |
| $10^{-8}$  | Makromolekül                       |
| $10^{-9}$  | Zuckermolekül                      |
| $10^{-10}$ | Atom                               |
| $10^{-11}$ |                                    |
| $10^{-12}$ |                                    |
| $10^{-13}$ |                                    |
| $10^{-14}$ | Atomkern                           |

**Tabelle 1.2 (Manuzio, Passatore 1981, 11)**

### Aufgabe 1.1

Die Grundeinheit der Leistung ist das **Watt** (W). Eine gewöhnliche Glühbirne setzt 60 W um. In einer Stadt mit 100'000 Einwohnern werden am Abend 3 Lampen pro Einwohner eingeschaltet. Wieviel Watt werden dann umgesetzt?

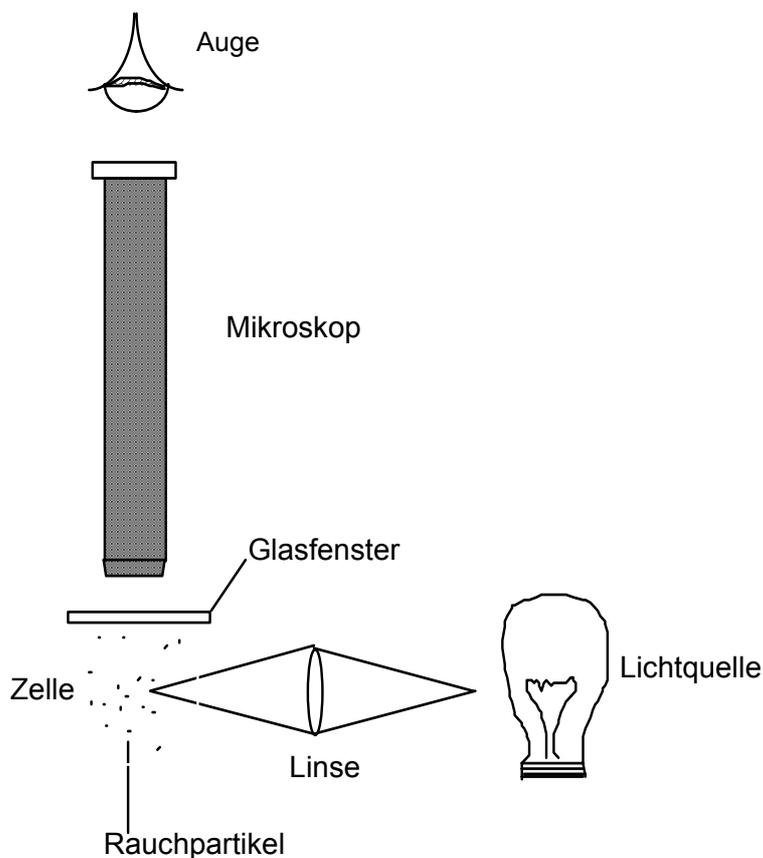
## 1.2 Atome und Kerne: wie weiss man von ihrer Existenz?

Es gibt zahlreiche Experimente, die zeigen, dass die Materie aus **Atomen** besteht. Die Atome sind sehr oft zusammengebunden und bilden **Moleküle**. Es gibt auch weitere Experimente, die zeigen, dass sogar die Atome aus noch kleineren Teilchen bestehen. Heisst das etwa, dass die Materie sich immer wieder in kleinere und noch kleinere Bausteine zerlegen lässt? Diese letzte Frage ist zur Zeit noch nicht ganz abgeklärt.

Die Molekularstruktur der Flüssigkeiten und die Bewegung der Moleküle wird unter anderem durch die **Brownsche Molekularbewegung** bestätigt. Dieses Phänomen wurde zufällig 1829 vom Botaniker Brown entdeckt. Die Brownsche Molekularbewegung kann mit Hilfe von sehr kleinen aber noch mit dem Mikroskop sichtbaren, in einer Flüssigkeit (oder in einem Gas) schwebenden Partikeln beobachtet werden.

### Experiment 1.1

Die Apparatur ist in Abbildung 1.1 gezeigt. Rauchpartikel einer Zigarette werden in eine mit einem Gas gefüllte Zelle eingeführt. Die Zelle wird von der Seite belichtet. Mit Hilfe eines Mikroskops kann man die Brownsche-Bewegung der Rauchpartikel in der Zelle verfolgen.



**Abbildung 1.1: Brownsche Molekularbewegung**

**Resultat:** Man beobachtet, dass die Rauchpartikel eine Zickzack-Bewegung durchführen. Diese Bewegung ist um so heftiger, je kleiner die Partikel sind.

**Erklärung:** Die Stösse der Gasmoleküle auf eine ausgedehnte Fläche sind so häufig, dass sie als ein konstanter Druck auf die Fläche resultieren. Auf kleine Rauchpartikel hingegen sind diese Stösse weniger häufig, so dass sie zufällig auf der einen oder der anderen Seite der Partikel überwiegend vorkommen. Die Rauchpartikel werden somit mal in die eine, mal in die andere Richtung geschleudert.

Man beachte, dass die Rauchpartikel viel schwerer und viel grösser sind als die Gasmoleküle. Die Rauchpartikel können zum Beispiel  $10^{10}$  mal schwerer sein als ein Gasmolekül. Trotz dieses grossen Gewichtsunterschieds hat jedes Rauchpartikel im Durchschnitt die gleiche kinetische Translationsenergie wie ein Gasmolekül. Da aber die Masse der Rauchpartikel sehr viel grösser ist als die der Gasmoleküle, ist ihre entsprechende Geschwindigkeit viel kleiner als die der Gasmoleküle, so dass man ihre Bewegungen mit blossen Auge verfolgen kann.

**Man kann also sagen, dass die Brownsche Bewegung ein vergrössertes und verlangsamtes Bild der Gasmolekülbewegung ist.**

Mit dem **Rastertunnelmikroskop** kann man die Atome „sehen“. Für die Erfindung des Rastertunnelmikroskops wurden die Wissenschaftler Heinrich Rohrer und Gerd Binnig mit dem Physik-Nobelpreis 1986 ausgezeichnet.

Heute wissen wir, dass die Atome selbst eine innere Struktur besitzen. Jedes Atom besteht aus einem **Kern** umgeben von einer **Atomhülle**.

Die **Atomhülle** besteht aus negativ geladenen Teilchen, den **Elektronen**. Sie hat einen Radius von der Grössenordnung  $10^{-10}$  m. Die Elektronen tragen die **kleinste negative Ladung**. Sie hat den Wert  $e \approx 1.6 \cdot 10^{-19}$  C .

Der **Atomkern** ist positiv geladen; sein Radius ist von der Grössenordnung  $10^{-15}$  m.

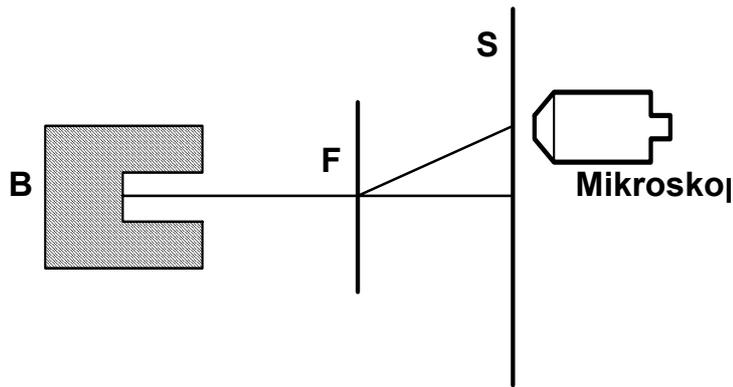
Ein Beweis für die Existenz der Atomkerne wurde zum ersten Mal 1913 vom Physiker Ernest Rutherford gegeben.

### **Experiment 1.2 (Rutherford)**

Das Experiment ist in Abbildung 1.2 gezeigt.

Aus einigen radioaktiven Stoffen, wie z. B. Radium oder Thorium werden  $\alpha$ -Teilchen (He-4-Kerne) emittiert. Diese Teilchen besitzen die Ladung  $2e$ . In einem Bleiklotz B befindet sich eine radioaktive Substanz, die  $\alpha$ -Teilchen emittiert. Aus einer Öffnung im Bleiklotz strömt ein dünner  $\alpha$ -Teilchenstrahl aus. Die emittierten  $\alpha$ -Teilchen treffen auf eine  $10^{-7}$  m dicke Goldfolie F. (Damals wusste man schon, dass der Atomradius ungefähr den Wert  $10^{-10}$  m hat. Deshalb konnte man ausrechnen, dass die Goldfolie aus ca. 1000 Atomschichten bestand). Die gestreuten  $\alpha$ -Teilchen werden nachgewiesen mit Hilfe eines fluoreszierenden Schirms S. Jedes  $\alpha$ -Teilchen löst im Leuchtstoffschirm einen Lichtblitz aus. Diese Blitze werden mit einem Mikroskop sichtbar gemacht.

Dieser Schirm blitzt auf, wenn er von einem  $\alpha$ -Teilchen getroffen wird.



**Abbildung 1.2: Experiment von Rutherford**

**Resultat:** Der grösste Teil der  $\alpha$ -Teilchen wird nicht wesentlich gestreut. Das heisst, sie passieren die Goldfolie praktisch ungestört.

**Nur ein  $\alpha$ -Teilchen auf hunderttausend wird bezüglich seiner Flugrichtung wesentlich gestreut.**

Wenn man die Dicke der Goldfolie verdoppelt, dann verdoppelt sich auch die Anzahl der stark gestreuten  $\alpha$ -Teilchen. Dies bedeutet, dass die Streuung eines  $\alpha$ -Teilchens die Folge seiner Wechselwirkung mit einem einzigen Goldatom ist. (Eine doppelt so grosse Dicke der Goldfolie bedeutet nämlich doppelt so viele Goldatome.)

**Erklärung:** Die stark gestreuten  $\alpha$ -Teilchen sind für die Interpretation des Experimentes sehr wichtig. Da die Masse der  $\alpha$ -Teilchen viel grösser ist als die der Elektronen, sind die starken Streuungen nicht der Wechselwirkung mit den Elektronen zuzuschreiben. (Die Bewegung eines Steins wird nicht von Sandkörnchen gestört!). Die starken Streuungen sind also der Wechselwirkung mit einem anderen, positiv geladenen Teil des Goldatoms zuzuschreiben.

Die Tatsache, dass die meisten  $\alpha$ -Teilchen nur sehr schwach (oder gar nicht) und dass nur sehr wenige davon stark gestreut werden, weist darauf hin, dass die Goldfolie für die  $\alpha$ -Teilchen folgendermassen aussieht: **Die Goldfolie ist fast überall leer und die Materie ist in sehr kleinen Körnchen konzentriert.** Die Grösse dieser Körnchen ist sehr klein bezüglich ihrer Abstände zueinander.

Wie kann man die Grösse der Körnchen abschätzen?

Dieses Experiment ergibt, dass mit einer Goldfolie, die eine Dicke von 1000 Atomschichten hat, 1  $\alpha$ -Teilchen auf 100'000 stark gestreut wird. D.h. bei 1000 Atomschichten wird 1 von  $10^5$   $\alpha$ -Teilchen stark gestreut, bei 1 Atomschicht also 1 von  $10^8$   $\alpha$ -Teilchen. Wenn  $10^8$   $\alpha$ -Teilchen auf ein Goldatom treffen, wird durchschnittlich 1  $\alpha$ -Teilchen stark gestreut. Ein Goldatom hat den ungefähren Durchmesser  $d \approx 10^{-10}$  m. Seine Querschnittfläche ist also  $d^2 \pi / 4 \approx 10^{-20}$  m<sup>2</sup>. Von  $10^8$   $\alpha$ -Teilchen trifft nur 1  $\alpha$ -Teilchen den Kern. Also muss die Querschnittsfläche A des Goldkerns ca.  $A = 10^{-20}$  m<sup>2</sup>  $\cdot 10^{-8} = 10^{-28}$  m<sup>2</sup> gross sein. Daraus ergibt sich als Kerndurchmesser  $d = \sqrt{4A / \pi} \approx 10^{-14}$  m, was eine sehr gute Schätzung ist.

Da das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist, muss der Kern die gleiche, aber entgegengesetzte Ladung wie diejenige der Elektronenwolke haben.

Das Experiment von Rutherford zeigt also, dass das Atom aus einem positiv geladenen Kern besteht, mit einem Durchmesser von der Grössenordnung  $10^{-14}$  m, umhüllt von einer Elektronenwolke, deren Durchmesser ca.  $10^{-10}$  m gross ist.

### Aufgabe 1.2

Beschreiben Sie die innere Struktur des Atoms.

### 1.3 Aufbau des Kerns

Wenn wir noch im Kleineren „schauen,, dann „sehen,, wir, dass Atomkerne selbst aus zwei Sorten von verschiedenen, noch kleineren Teilchen bestehen: den **Protonen** und den **Neutronen**. Protonen und Neutronen bilden also den Kern, lateinisch nucleus, und heissen deshalb **Nukleonen**. Im Folgenden werden wir die Nukleonen genauer beschreiben.

**Protonen:** Sie tragen die **kleinste positive Ladung**,  $e \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Ein neutrales Atom besteht aus einer gleichen Anzahl von Protonen und Elektronen. Seine totale Ladung ist also 0. Die **Masse** des Protons ist ca.  $1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Viel öfter wird aber die Masse der Nukleonen als Vielfaches der Masse des Elektrons angegeben.

**Neutronen:** Sie sind elektrisch neutral, d.h. sie tragen keine Ladung. Die Neutronen halten den Kern zusammen: sie verhindern nämlich, dass der Kern, infolge der abstossenden Kraft zwischen den positiv geladenen Protonen, auseinanderfällt. Die **Masse** des Neutrons ist fast gleich wie die des Protons.

In der folgenden Tabelle 1.3 sind einige Eigenschaften der beschriebenen Teilchen angegeben.

| Teilchen | Symbol | Masse [kg]             | Ladung  |
|----------|--------|------------------------|---------|
| Proton   | p      | $1.673 \cdot 10^{-27}$ | Positiv |
| Neutron  | n      | $1.675 \cdot 10^{-27}$ | Null    |
| Elektron | e      | $9.11 \cdot 10^{-31}$  | Negativ |

**Tabelle 1.3**

### Aufgabe 1.3

Drücken Sie die Masse des Protons und des Neutrons im Verhältnis zur Masse des Elektrons aus.

Proton und Neutron haben ungefähr die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt nur 1/1836 der Masse des Protons, so dass man diesen Betrag bei der Betrachtung von Atommassen vernachlässigen kann. **Die gesamte Masse des Atoms ist also im Kern konzentriert.** Die **Materiedichte des Kerns** hat den Wert von etwa  $10^{17} \text{ kg/m}^3$ . (Die Dichte des Wassers hat den Wert  $10^3 \text{ kg/m}^3$ ). Die

einzigsten makroskopischen Objekte mit einer so grossen Dichte sind die Neutronensterne.

## 1.4 Die vier Kräfte der Natur

Bis jetzt kennt man in der Natur vier grundlegende Kräfte (Wechselwirkungen): die **Gravitations-**, die **elektromagnetische**, die **schwache** und die **starke** Kraft. Wir alle kennen die Gravitationskraft und die elektromagnetische Kraft.

### Beispiel 1.3

Ein von einer bestimmten Höhe losgelassener Gegenstand fällt auf den Boden. Das ist eine Folge der Gravitationskraft.

### Beispiel 1.4

Zwei Magnete ziehen sich an oder stossen sich ab, je nachdem, ob es sich um entgegengesetzte oder gleiche magnetische Pole handelt. Das gleiche gilt für elektrisch positiv bzw. negativ geladene Objekte. Das ist eine Folge der elektromagnetischen Kraft.

Die **Gravitations-** und die **elektromagnetische** Kraft sind beide **langreichweitig**, d. h. ihre Wirkung lässt sich auch bei sehr grossen Abständen spüren.

Die **schwache** Kraft ist verantwortlich für den  $\beta$ -Zerfall, der im Kapitel 2 „Radioaktivität“, genauer beschrieben wird. Ihre Wirkung verschwindet aber bei Abständen von Kerngrösse.

Die **starke** Wechselwirkung resultiert als anziehende Kraft zwischen allen Nukleonen: Neutron-Neutron, Proton-Proton und Neutron-Proton. Sie macht es möglich, dass mehrere Protonen, trotz der elektrostatischen Abstossung (gleiche Ladung), und Neutronen eng zusammen existieren und einen Kern bilden. Die Stärke dieser Kraft ist sehr gross, ihr Wirkungsradius jedoch sehr klein (Kerndurchmesser). D.h., sie wirkt nur, wenn die Nukleonen sehr nahe beieinander sind. Die starke Kraft ist ca. 100mal stärker als die elektromagnetische Kraft.

Die subatomare Physik ist ein kompliziertes Wechselspiel von drei Wechselwirkungen: der starken, der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung (Frauenfelder, Henley 1979, .13).

Wenn man die vier Kräfte in der **Reihenfolge zunehmender Stärke** einordnet, so sind dies die Gravitation, die schwache, die elektromagnetische und die starke Wechselwirkung.

Die Einordnung der vier Kräfte in der **Reihenfolge der zunehmenden Reichweite** ist: die schwache, die starke, die elektromagnetische Wechselwirkung und die Gravitationskraft. Zusammengefasst also:

| Kraft              | Quelle              | Reichweite           | Beispiel                         |
|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|
| Gravitation        | Masse               | •                    | Die Gewichtskraft                |
| Elektromagnetische | elektrische Ladung  | •                    | Kräfte zwischen Ladungen im Atom |
| Schwache           | subatomare Teilchen | $<10^{-16}$ m        | $\beta$ -Zerfall                 |
| Starke             | Nukleon             | $\approx 10^{-15}$ m | Zusammenhalt der Atomkerne       |

Tabelle 1.4

### Aufgabe 1.4

Vergleichen Sie die elektrische Anziehungskraft zwischen einem Proton und einem Elektron im Abstand  $r$  mit der Gravitationskraft zwischen diesen Teilchen.

### 1. Literaturstudium

Lesen Sie im Buch von Höfling „Physik“, Band II, Teil 3 den Paragraph 8.5.5: „Die Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen“.

### 1.5 Die Elemente

Ein Stoff, der aus gleichartigen **Atomen** besteht, heisst **Element**. Beispiele für Elemente sind Wasserstoff, Sauerstoff, Uran und Eisen. Wasser ist hingegen kein Element. Denn Wasser besteht aus **Molekülen**, die ein Atom Sauerstoff und zwei Atome Wasserstoff enthalten: Das chemische Symbol ist **H<sub>2</sub>O**. Alle Elemente werden in das sogenannte **Periodensystem der Elemente (Mendelejew Tafel)** eingetragen. Einige existieren in der Natur, andere sind sehr instabil und werden in den Laboratorien erzeugt. Die Elemente werden im Periodensystem nach zunehmender **Ordnungszahl** eingeordnet. Die Ordnungszahl **Z** ist die Anzahl Protonen, die das Atom eines bestimmten Elements enthält. Andere wichtige Zahlen, die die Atome eines bestimmten Elements charakterisieren, sind die Anzahl **Neutronen N** und die Anzahl **Nukleonen A**. A ist die Summe von Z und N. Zusammengefasst ist also:

|                                      |   |                                 |
|--------------------------------------|---|---------------------------------|
| <b>Z: Protonenzahl, Ordnungszahl</b> | = | Anzahl Protonen                 |
| <b>N: Neutronenzahl</b>              | = | Anzahl Neutronen                |
| <b>A: Massenzahl</b>                 | = | Anzahl Nukleonen <b>A=Z+N</b> . |

Für einen Kern mit gegebenen Zahlen A, N, Z verwendet man heute das Symbol X-A, wobei X das chemische Symbol des betrachteten Elements ist. Jede so bezeichnete Kernsorte heisst Nuklid.

**Beispiel 1.5**

|       |             |       |      |       |
|-------|-------------|-------|------|-------|
| C-14  | Kohlenstoff | A=14  | Z=6  | N=8   |
| Fe-56 | Eisen       | A=56  | Z=26 | N=30  |
| U-235 | Uran        | A=235 | Z=92 | N=143 |
| U-238 | Uran        | A=238 | Z=92 | N=146 |

**Definition 1.1**

Ein **Mol** ist die Stoffmenge, in der so viele Teilchen (Atome oder Moleküle) enthalten sind wie Atome in 12 g des Kohlenstoffnuklids C-12. Die Stoffmenge 1 Mol enthält  $6.022045 \cdot 10^{23}$  Teilchen.  $N_A = 6.022045 \cdot 10^{23} \cdot \text{mol}^{-1}$  ist die **Avogadro Zahl**.

**Definition 1.2**

Die **atomare Masseneinheit u** ist der 12. Teil der Masse des Nuklids C-12.

**Definition 1.3**

Unter der **relativen Atommasse** versteht man den Quotienten  $m_{\text{Atom}}/u$ . Die relative Atommasse, in Gramm ausgedrückt, ist die Molmasse (= Masse eines Mols des betrachteten Stoffes).

**Beispiel 1.6**

1 Mol U-238 hat die Masse 238g.

**Aufgabe 1.5**

Wieviel Kilogramm sind 1 u?

**Aufgabe 1.6**

Ein Mensch mit der Masse 70 kg enthält etwa 140 g Kalium, das zu 0,012% aus dem radioaktiven K-40 besteht. Wieviel K-40-Kerne sind also im Körper dieses Menschen vorhanden?

**1.6 Die Isotope**

Die Kerne der meisten Elemente treten in mehreren Arten auf, die sich in der Anzahl der Neutronen, also in N, unterscheiden. (Die Protonenzahl Z bleibt für ein gegebenes Element immer gleich). Diese verschiedenen Sorten eines Elements nennt man Isotope. Isotop bedeutet „an derselben Stelle“. Damit soll ausgedrückt werden, dass alle Elemente mit gleicher Ordnungszahl, aber unterschiedlicher Massenzahl an derselben Stelle des Periodensystems auftreten. Isotope unterscheiden sich nicht in ihren chemischen, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften.

### Beispiel 1.7

das Element Wasserstoff hat drei Isotope:

**H-1** gewöhnlicher Wasserstoff:  $N=0$

**H-2** schwerer Wasserstoff (**Deuterium**):  $N=1$

**H-3** überschwerer Wasserstoff (**Tritium**):  $N=2$

Natürlicher Wasserstoff besteht aus 99.986% gewöhnlichem Wasserstoff, 0.014% Deuterium und aus einer sehr kleinen Menge Tritium.

**Die Isotopenzusammensetzung der natürlichen Elemente ist nahezu konstant.** Die Messung der geringen Abweichungen von Isotopenverhältnissen hat mannigfache Anwendungen in vielen Bereichen der Naturwissenschaften. Zum Beispiel das Messen des C-14/C-12 Verhältnisses kann für die **Altersbestimmung** angewendet werden (**C-14 Methode**).

### Aufgabe 1.7

Das Element Chlor besteht zu 75.8% aus dem Isotop Cl-35 und zu 24.2% aus dem Isotop Cl-37. Wie gross ist die gemittelte relative Atommasse des Chlors?

## 1.7 Die Bindungsenergie

### Definition 1.4

Die Energie, die notwendig ist, um die Teile eines stabilen Systems voneinander zu trennen, heisst **Bindungsenergie** und wird als  $E_B$  bezeichnet.

Folgendes Beispiel soll dies erläutern.

### Beispiel 1.8

Um zwei Magnetstückchen zu trennen, die infolge der magnetischen Kraft aneinander gebunden sind, muss man eine gewisse Arbeit leisten. Am Anfang sind die Magnetstückchen gebunden, und am Schluss sind sie frei. Wir können die zugefügte Energie als Bindungsenergie der zwei Magnetstückchen bezeichnen.

Im Atomkern wirken zwei verschiedene Kräfte: die elektromagnetische Abstossung zwischen den Protonen und die starke Wechselwirkung, die alle Nukleonen aneinander bindet.

**Definition 1.5**

Die **Bindungsenergie eines Kerns** ist die Arbeit, die notwendig ist, um alle Kernteile voneinander zu trennen. Oder äquivalent: Die Bindungsenergie eines Atomkerns ist die Energie, die freigesetzt würde, wenn man aus freien Nukleonen einen Kern bilden würde.

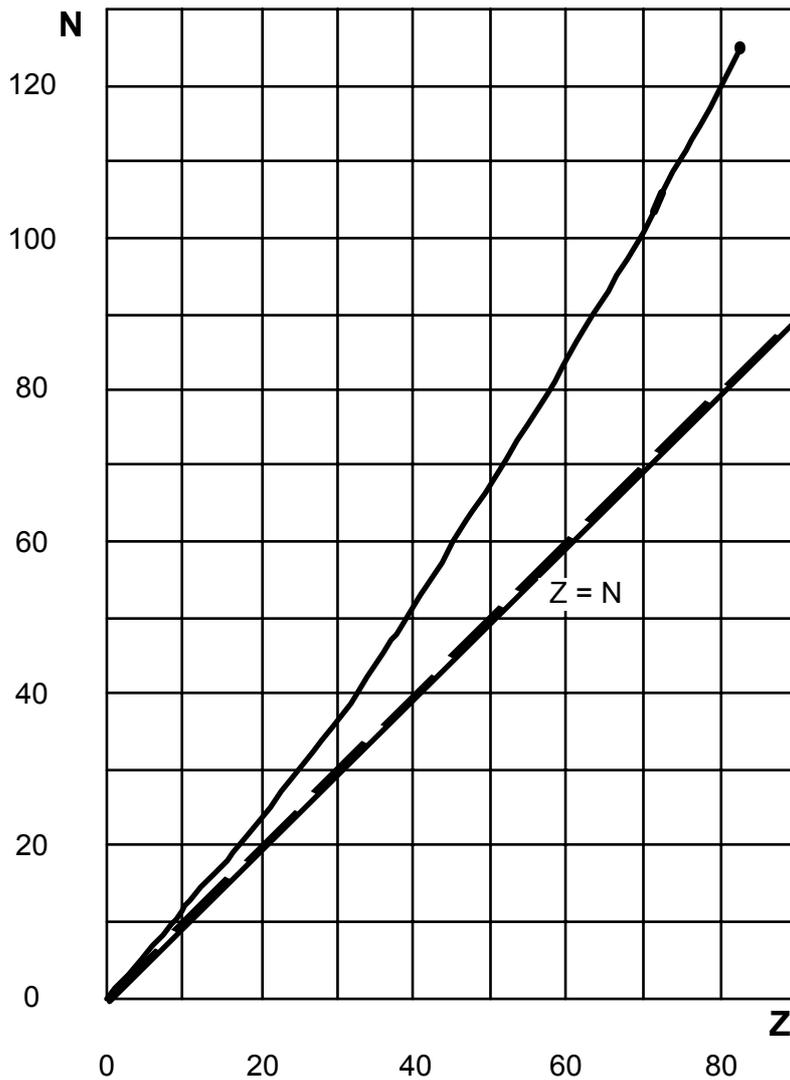
Die Bindungsenergie des Kernes ist viel grösser als die Arbeit, die notwendig ist, um ein Elektron von einem Atom zu trennen.

Oft benützt man auch die **Bindungsenergie pro Nukleon**. Sie ist definiert als das Verhältnis der Bindungsenergie des Kerns zur Anzahl seiner Nukleonen.

**Aufgabe 1.8**

Die Entweichgeschwindigkeit auf der Erdoberfläche beträgt  $v_e=11.2$  km/s. Wie gross ist die Bindungsenergie eines 70 kg schweren Menschen?

Eine grosse Bindungsenergie zu haben, bedeutet für ein System, sehr stabil zu sein. Man braucht nämlich viel Energie, um es auseinander zu nehmen. Ein fallendes Objekt sucht sich immer die tiefst mögliche Lage aus, wo die Bindungsenergie für das System Objekt-Erde am grössten ist. Auch die Nukleonen gruppieren sich möglichst zu einer Konfiguration mit hoher Bindungsenergie, wo sie stärker gebunden sind. Die Bindungsenergie eines Kerns hängt von der Protonenzahl  $Z$  und der Neutronenzahl  $N$  ab. Es gibt energetisch günstige Kombinationen von  $(N, Z)$ , für welche  $E_B$  hoch ist, und ungünstige, wo  $E_B$  niedrig ist. Im  $N$ - $Z$ -Diagramm (Abbildung 1.3) befinden sich die stabileren Nukleonen, d. h. die Nukleonen mit hoher Bindungsenergie, auf einer Kurve. Diese Kurve liegt zuerst bei der Geraden  $N=Z$  und weicht dann davon ab in Richtung grösserer Neutronenzahl. Man nennt diese Kurve und ihre Umgebung auch **Stabilitätstal**, weil dort die stabilen Kerne liegen. Das schwerste, noch ganz stabile Nuklid ist Bi-209 (Wismut). Darüber hinaus kennt man heute Kerne bis etwa zur Massenzahl  $A=270$  ( $Z$  bis 109). Wesentlich schwerere Kerne kann es nicht geben, weil die zusammenhaltende Kernkraft nur kurze Reichweite hat, während die auseinandertreibende elektromagnetische Abstossung langreichweitig ist.



**Abbildung 1.3: Stabilitätstal**

**Ausnahme:** Der Neutronenstern bildet eine exotische Ausnahme. Was diesen übergrossen „Kern„ zusammenhält ist die Gravitationskraft. Sie ist zwar  $10^{40}$ mal schwächer als die Kernkraft, aber langreichweitig, und bei einer Masse von etwa  $10^{57}$  Nukleonen (d.h.  $A=10^{57}$ ) übertrifft sie alle anderen Kräfte (Niederer 1990, 2.5).

### Wie kann man die Bindungsenergie messen?

Wenn man die Masse aller Nukleonen eines Kerns addiert, so bekommt man einen Wert, der immer grösser ist als die Masse des Kerns. Diese Massendifferenz ist charakteristisch für jeden Kern. Sie wird **Massendefekt** genannt. Man kann diese Diskrepanz wie folgt verstehen: Nach **Einstein** lässt sich die Energie in Masse ausdrücken und umgekehrt. Die Gleichung lautet:

$$E = m \cdot c^2 \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} E = \text{Energie} \\ m = \text{Masse} \\ c = \text{Lichtgeschwindigkeit.} \end{array}$$

Nehmen wir an, man füge einem Kern eine Energiemenge zu, die gleich seiner Bindungsenergie ist, dann werden seine Nukleonen wieder frei. Aus der Äquivalenz von Masse und Energie entspricht dies einer Zunahme der Masse  $\Delta m = \Delta E / c^2$ . Bilden umgekehrt zwei isolierte Nukleonen einen Kern, so wird die entsprechende Bindungsenergie  $E_B$  freigesetzt. Dies entspricht nach Einstein einem Massenschwund  $\Delta m = \Delta E / c^2$ .

In Abbildung 1.4 ist die Bindungsenergie **pro Nukleon** für stabilere Kerne gezeigt. (1eV (Elektron-Volt) ist ein Mass für die Energie in der Atom- und Kernphysik:  $1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{J}$ . Also:  $1\text{MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13}\text{J}$ ). Diese Energie ist am grössten für Kerne mit Massenzahl um 60 (Fe: Eisen). Für schwerere Kerne nimmt die Bindungsenergie pro Nukleon ab. Der Grund ist, dass die zusammenhaltende Kraft unter den Nukleonen (die starke Wechselwirkung) eine sehr kurze Reichweite hat, während die abstossende Kraft unter den Protonen (elektromagnetische Kraft) langreichweitig ist. Deshalb spürt ein Proton die Abstossung aller anderen Protonen, auch der weit entferntesten, aber nur die Anziehung der unmittelbar nahen Nukleonen.

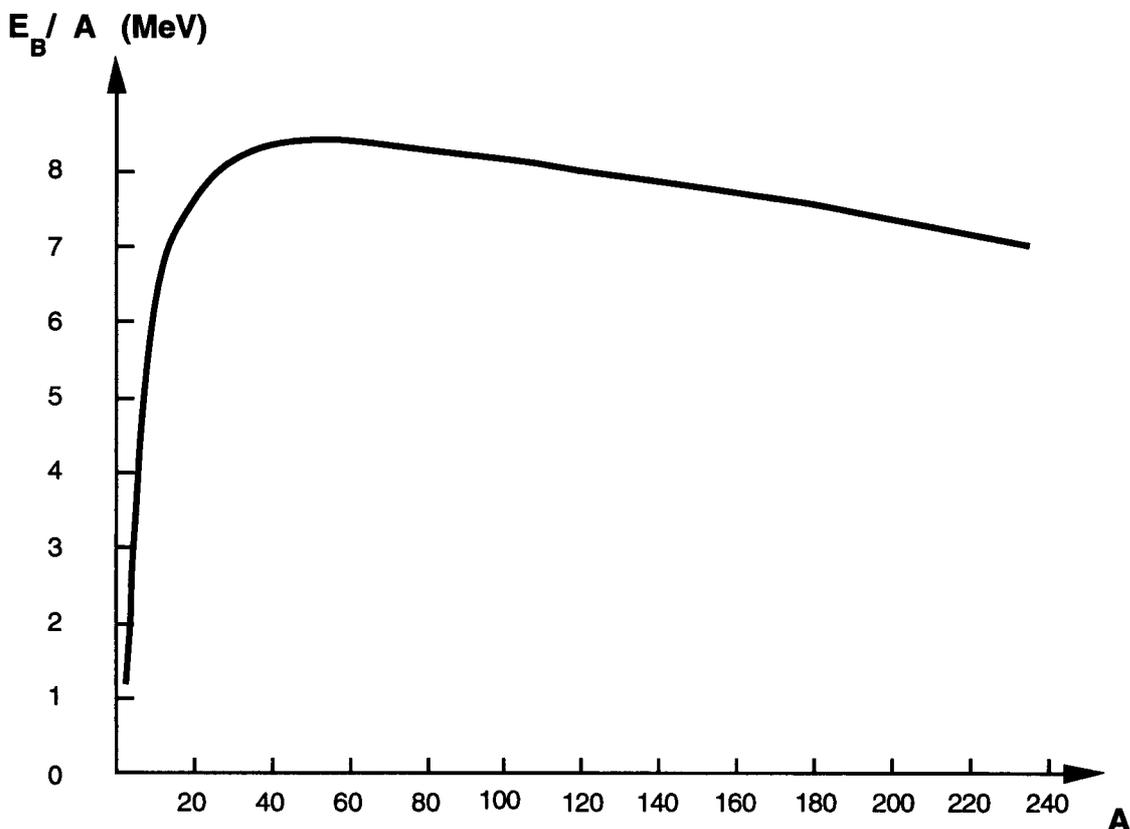


Abbildung 1.4: Bindungsenergie pro Nukleon

### Beispiel 1.9

Wir berechnen die Bindungsenergie von Ne-20 (Neon). Die Nukleonenzahl  $A$  ist 20. Aus Abbildung 1.4 lesen wir ab, dass die Bindungsenergie pro Nukleon für  $A=20$  ca. 7.5 MeV beträgt. Somit hat Ne-20 eine totale Bindungsenergie  $E_B = 20 \cdot 7.5 \text{ MeV} = 150 \text{ MeV}$

**Aufgabe 1.9**

Kernspaltung: Nehmen Sie an, ein Kern der Massenzahl  $A=240$  werde in zwei Kernbruchstücke mit je  $A_1=120$  gespalten. Bestimmen Sie mit Hilfe von Abbildung 1.4 die dabei frei werdende Energie.

## Lernkontrolle

Folgende Aufgaben sind individuell zu lösen. Damit können Sie Ihr Wissen überprüfen.

### Aufgabe 1.10

Welche Angaben stimmen?

a)  $2 \text{ mg/mm}^3 = 2 \text{ kg/m}^3$

b)  $0.42 \text{ mN/mm}^2 = 420 \text{ mbar}$

### Aufgabe 1.11

Was hat Rutherford mit seinem Experiment bewiesen?

### Aufgabe 1.12

Wie gross ist die Massendichte der Atomkerne?

### Aufgabe 1.13

Welche Wechselwirkung hält die Atome zusammen?

Wenn Sie alle Fragen korrekt beantwortet haben, dann können Sie sich beim Tutor zum Kapiteltest melden.

## Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 1

### Aufgabe 1.1

$$100'000 \cdot 3 \cdot 60 \text{ W} = 18'000'000 \text{ W} = 18 \text{ MW (Megawatt)}.$$

### Aufgabe 1.2

Jedes Atom besteht aus einem Kern, umgeben von einer Atomhülle. Der Atomkern ist positiv geladen. Die Atomhülle besteht aus negativ geladenen Teilchen, den Elektronen. Da das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist, hat der Kern die gleiche, aber entgegengesetzte Ladung wie die Atomhülle.

### Aufgabe 1.3

Die Masse des Protons ist 1836mal die Masse des Elektrons. Die Masse des Neutrons ist 1839mal die Masse des Elektrons.

### Aufgabe 1.4

$$\text{Gravitationskraft} = G \cdot \frac{\text{Elektronenmasse} \cdot \text{Kernmasse}}{r^2}$$

$$\text{Coulombkraft} = \frac{\text{Elektronenladung} \cdot \text{Kernladung}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\text{Also: Gravitationskraft} = 4.4 \cdot 10^{-40} \cdot \text{Coulombkraft}.$$

### Aufgabe 1.5

12g von C-12 enthalten  $6.02 \cdot 10^{23}$  Atome.

$$1 \text{ u} = 1\text{g} \cdot \text{mol}^{-1} / N_A = 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1} / 6.022 \cdot 10^{23} \cdot \text{mol}^{-1} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

### Aufgabe 1.6

$$\frac{140\text{g} \cdot 0.012\%}{40\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot N_A = \frac{140\text{g} \cdot 0.012\%}{40\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2.5 \cdot 10^{20}$$

### Aufgabe 1.7

$$75.8\% \cdot 35 + 24.2\% \cdot 37 = 35.5$$

### Aufgabe 1.8

$$E_B = \frac{1}{2} M \cdot v_e^2 = 4.4 \text{ GJ}.$$

**Aufgabe 1.9**

$E_B/A = 7 \text{ MeV}$  für  $A=240$  und  $E_B/A = 8 \text{ MeV}$  für  $A=120$

$$\Delta E_B = E_{B,\text{neu}} - E_{B,\text{alt}} = 2 \cdot 120 \cdot 8 \text{ MeV} - 240 \cdot 7 \text{ MeV} = 240 \text{ MeV} \approx 2 \cdot 10^2 \text{ MeV}$$

**Aufgabe 1.10**

a ist richtig.

b ist falsch:  $0.42 \frac{\text{mN}}{\text{mm}^2} = 420 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 420 \text{ Pa} = 420 \cdot 10^{-5} \text{ bar} = 4200 \mu\text{bar}$  .

**Aufgabe 1.11**

Das Experiment von Rutherford zeigt, dass die Atome selbst eine innere Struktur besitzen. Sie bestehen aus einem positiv geladenen Kern, in dem praktisch die ganze Masse des Atoms konzentriert ist, und einer negativ geladenen Elektronenwolke. Mit diesem Experiment konnte man auch die Grösse des Kerns abschätzen, ca.  $10^{-14} \text{ m}$ .

**Aufgabe 1.12**

Sie beträgt etwa  $10^{17} \text{ kg/m}^3$ .

**Aufgabe 1.13**

Die starke Wechselwirkung.

## 2. Radioaktivität = Ionisierende Strahlung

### Übersicht

Vor bald 100 Jahren entdeckte Becquerel bis dahin unbekannte Strahlen. Diese neuen „radioaktiven„ Strahlen wurden intensiv erforscht und die gewonnenen Erkenntnisse in der Kerntechnologie vielfältig umgesetzt. Die anfänglich euphorische Zustimmung musste einer allgemeinen Skepsis weichen. Heute ist der Begriff „Radioaktivität„ in aller Munde. Die Diskussion ist im Gange. Die Meinungen sind geteilt und oft festgefahren. Steigen Sie ein, diskutieren Sie mit! Dieses Kapitel bietet Ihnen den physikalischen Hintergrund dazu.

Nachdem Sie das Kapitel durchgearbeitet haben, werden Sie die wichtigsten Strahlenarten beschreiben können. Hier lernen Sie die wichtigsten Grössen und Hilfsmittel zur Charakterisierung der radioaktiven Strahlung kennen.

Einfache praktische Anwendungen runden das Kapitel ab.

### Vorgehen

Studieren Sie zuerst die Lernziele. Nachdem Sie sich die wesentlichen Ziele gemerkt haben, steigen Sie ins Kapitel ein.

Den grössten Teil des Kapitels bearbeiten Sie alleine. Bei einem Experiment und einer Lernaufgabe arbeiten Sie mit Partnern zusammen.

Auch in diesem Kapitel werden Sie zum Literaturstudium aufgefordert. Gehen Sie, wenn Sie so weit sind, zur Handbibliothek. Der Lehrer hat Ihnen dort alle Bücher bereitgestellt.

Im Text befinden sich einige Aufgaben. Hier können Sie Ihr Verständnis und Ihre Fähigkeiten testen. Die Lösungen zu diesen Aufgaben finden Sie am Ende des Kapitels.

Die Lernkontrolle beim Kapitelende vermittelt Ihnen die letzte Sicherheit. Die Lösungen dazu stehen auf der folgenden Seite. Wenn Sie 3 dieser 4 Kontrollfragen richtig beantwortet haben, melden Sie sich beim Lehrer zum Kapiteltest.

Viel Spass!

**Lernziele**

1. Sie können die drei wichtigsten Zerfallsarten nennen und den Aufbau der dabei ausgesandten Teilchen beschreiben.
2. Sie können in wenigen Sätzen die Begriffe „Aktivität,“ und „Halbwertszeit,“ mit eigenen Worten beschreiben. Denn dies sind zwei besonders bedeutende Grössen. Sie wissen, wie sich die Aktivität einer Probe zeitlich verändert und können diese Kenntnisse bei einfachen Berechnungsaufgaben anwenden.
3. Sie haben den Umgang mit der Nuklidkarte intensiv geübt. Aufbau und Anwendungsbeispiele sind Ihnen geläufig. Beim Lösen verschiedener Aufgaben stellen Sie Ihre Kenntnisse unter Beweis.

## 2.1 Einleitung

„Radioaktivität„ ist in aller Munde. Doch was versteht man darunter?

Das Duden Fremdwörterbuch schreibt dazu:

**Radioaktivität:** Eigenschaft der Atomkerne gewisser Isotope, sich ohne äussere Einflüsse umzuwandeln und dabei bestimmte Strahlen auszusenden.

Nun ein bisschen mehr dazu.

### 2.1.1 Die Entdeckung der Radioaktivität

**Becquerel** entdeckte 1896, dass Uransalze auch bei vollkommener Dunkelheit eine Photoplatte durch seine lichtdichte Verpackung hindurch zu schwärzen vermochten. Becquerel schloss, dass die Schwärzung nur durch eine vom Uransalz stammende Strahlung verursacht werden konnte. Er nannte diese Strahlung dann auch „**Uranstrahlung**„.

Kurz darauf fand das Ehepaar **Curie**, dass weitere Minerale zum Teil noch wesentlich stärker strahlten. Alle diese Materialien brauchten nicht zuerst zum Strahlen angeregt zu werden. Sie **strahlten spontan und selbständig**. Pierre und Marie Curie prägten für dieses „aktive„ Strahlen den Begriff „**Radioaktivität**„.

*Sind Sie speziell an Becquerels Biographie interessiert? Einen kurzen und interessanten Artikel finden Sie in: Schenk, E.: „Mein Name ist Becquerel„ auf den Seiten 30ff.*

Heute kennt man rund **1500 verschiedene Nuklide**. Lediglich **249** davon sind **stabil** (nicht radioaktiv). Der **Rest** sind **instabile Radionuklide** (radioaktive Nuklide). Diese erstrecken sich über alle Elemente. D. h. es gibt kein Element, das nicht mindestens ein radioaktives Isotop besässe.

### 2.1.2 Woher stammt die ionisierende Strahlung?

Um diese Frage beantworten zu können, wurden viele Versuche durchgeführt. Dazu wurden u.a.:

- die verschiedensten Substanzen (chemische Verbindungen) untersucht,
- die Proben extremen Temperaturen ausgesetzt,
- die Proben extremen Drücken ausgesetzt

und vieles mehr.

All diese Versuche beeinflussen die Elektronenhülle der untersuchten Atome. Doch die Strahlung wurde durch diese Veränderungen nicht beeinflusst. Einzig die Anzahl der vorhandenen radioaktiven Kerne war für die Intensität (Stärke) der Strahlung ausschlaggebend.

Schlussfolgerung: Die Strahlung wird nicht aus der Atomhülle emittiert. Die Strahlung muss **aus dem Kern** stammen.

### 2.1.3 Natürliche Strahlung, künstliche Strahlung

Von den ca. 1500 heute bekannten Nukliden kommen rund 500 **in der Natur seit Milliarden Jahren** vor. 249 davon sind stabil, der Rest ist radioaktiv. Die Strahlung, die beim Zerfall dieser Radionuklide ausgesandt wird, nennen wir **natürliche ionisierende Strahlung**.

Die restlichen rund 1000 Nuklide gibt es jedoch erst wieder, **seit** dem sich der Mensch mit **Kernforschung und Kerntechnik** auseinandersetzt. Dies sind rund 100 Jahre. Diese Nuklide sind künstlich entstanden. Sie alle sind radioaktiv. Die Strahlung dieser Gruppe Radionuklide wird **künstliche ionisierende Strahlung** genannt.

Warum heisst es oben „erst wieder seit rund 100 Jahren,“? Was war denn vorher?

Die **künstlichen Nuklide** sind eigentlich gar nicht neu. Sie gab es schon früher einmal. In der **Zwischenzeit** waren sie jedoch auf der Erde **ausgestorben**. Diese künstlich erzeugten Nuklide sind nämlich alle radioaktiv. Doch ihre Lebensdauer ist kurz. Das heisst, sie haben die vielen Milliarden Jahre, die seit ihrer Entstehung vergangen waren, nicht überlebt. Darum fand man sie auch nicht mehr in der Natur. Jetzt gibt es sie wieder.

Doch nicht nur der Mensch erzeugt solche Radionuklide. Auch heute werden noch derartige Nuklide im Universum erzeugt. Die Theorie sagt nämlich, dass alle im Universum vorkommenden Elemente, die eine höhere Atommasse als Eisen aufweisen, in Supernovaen (explodierende Sterne grosser Masse) entstanden sein müssen.

#### Aufgabe 2.1

Aus welchem Teil des Atoms stammen die radioaktiven Strahlen?

### 2.2 Strahlenarten

Es gibt verschiedene Arten radioaktiver Strahlen. Diese lassen sich in mehrere Gruppen einteilen. In diesem Abschnitt werden Sie die drei wichtigsten Strahlenarten kennen lernen.

Rutherford entdeckte schon 1898, dass es mindestens 2 Arten radioaktiver Strahlen geben muss (Segrè 1981, 61). Er nannte diese  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen. Später wurden als weitere Sorte die  $\gamma$ -Strahlen entdeckt.

Man führte verschiedene Experimente mit diesen Strahlen durch. U. a. untersuchte man auch deren elektrisches und magnetisches Verhalten (Abbildung 2.1). Hier die Ergebnisse:

- $\alpha$ -Strahlen sind doppelt geladene Heliumkerne.
- $\beta$ -Strahlen lassen sich leicht durch Magnetfelder ablenken. Sie verhalten sich wie Elektronen.
- $\gamma$ -Strahlen passieren die magnetischen und elektrischen Felder unbeeinflusst. Sie verhalten sich wie Lichtstrahlen.

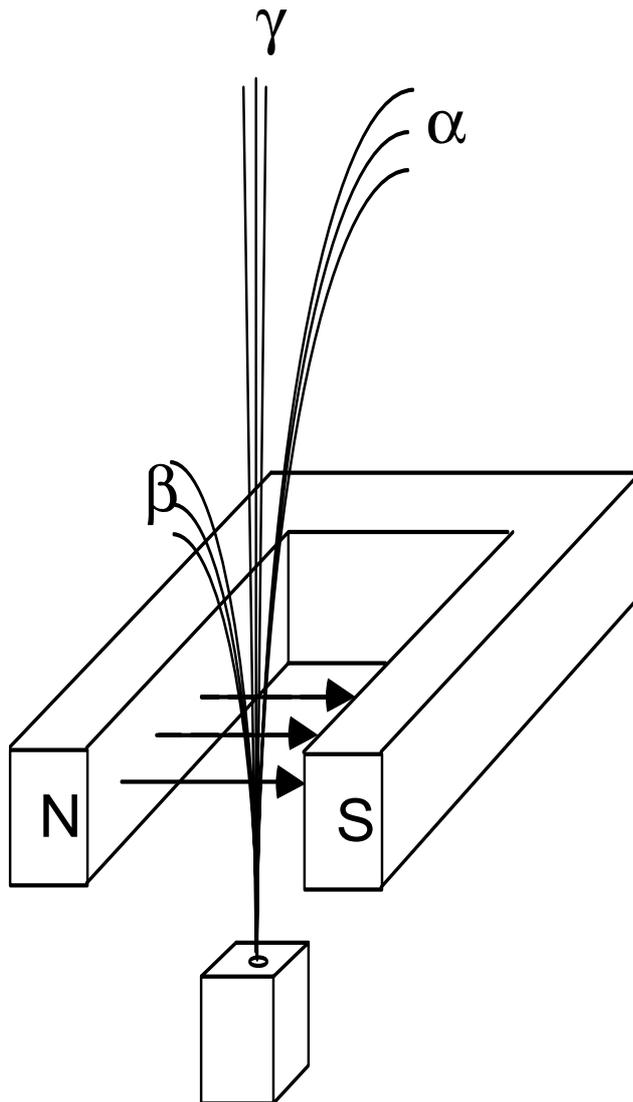


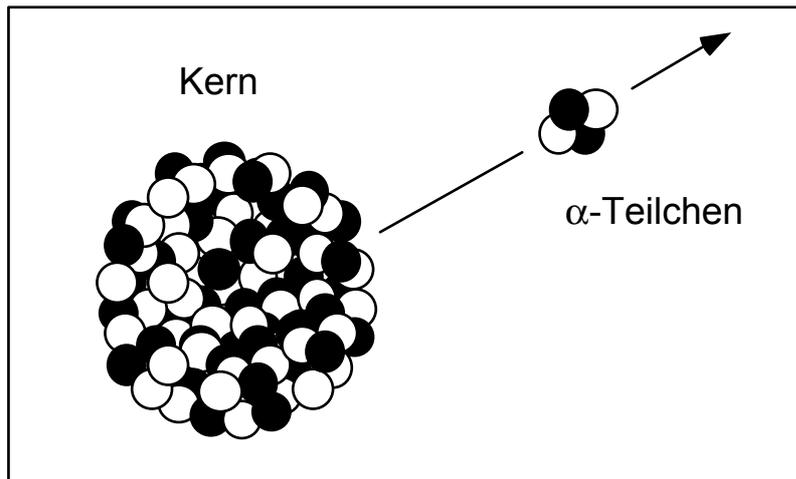
Abbildung 2.1: Ablenkung der  $\alpha$ -,  $\beta$  - und  $\gamma$  -Strahlen im Magnetfeld.

### 2.2.1 Der Alpha-Zerfall

1904 wurde bekannt, dass bei Radiumverbindungen, die  $\alpha$ -Strahlen aussenden, **Helium** auftritt. Dieses Helium konnte nur beim Zerfall des Radiums entstanden sein. Alle weiteren Versuche führten zur folgenden Feststellung:

Beim  $\alpha$ -Zerfall werden Teilchen ausgesandt. Alle diese Teilchen bestehen aus **2 Protonen** und aus **2 Neutronen**. Diese Teilchen sind also **Heliumkerne**.

Die ausgesandten Teilchen werden  **$\alpha$ -Teilchen** genannt.



**Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des  $\alpha$  -Zerfalls**

Nach einem  $\alpha$  -Zerfall fehlen dem ursprünglichen Nuklid 2 Protonen und 2 Neutronen. Das ursprüngliche **Element** hat sich also **durch den Zerfall in ein neues gewandelt**.

### Aufgabe 2.2

Radon-222 sendet beim Zerfall ein  $\alpha$ -Teilchen aus. In welches Element wandelt sich das Radon durch diesen Zerfall? Lösen Sie die Aufgabe mit Hilfe des Periodensystems.

### 2.2.2 Der Beta-Zerfall

Beim  $\beta$ -Zerfall werden ebenfalls Teilchen ausgesandt. Diese Teilchen verhalten sich wie Elektronen. Zum Beispiel werden sie, dank ihrer kleinen Masse, leicht in Magnetfeldern abgelenkt. Man nennt diese Teilchen  **$\beta$  -Teilchen**.

Es gibt **2 Sorten** von  **$\beta$  -Teilchen**.

Bei den einen stimmen Masse, Ladung und Verhalten genau mit denen der **Elektronen** überein. Hier werden also Elektronen ausgesandt. Eine derartige Strahlung heisst  **$\beta^-$ -Strahlung**. (Sprich: „Beta-Minus-Strahlung„. Minus weil das emittierte Elektron negativ geladen ist.)

Die zweite Sorte der ausgesandten Teilchen unterscheidet sich von den Elektronen lediglich durch ihre Ladung. Elektronen sind negativ geladen. Diese Teilchen jedoch sind positiv geladen. Sie werden **Positronen** genannt. Eine derartige Strahlung heisst denn auch  **$\beta^+$ -Strahlung** (Sprich: „Beta-Plus-Strahlung„).

Woher stammen diese Elektronen und Positronen? Gibt es im Kern freie Elektronen oder Positronen?

Nein, **im Kern gibt es weder freie Elektronen noch freie Positronen**. Überlegungen der Quantenphysik, auf die wir hier nicht näher eingehen, sagen, dass Elektronen und Positronen im Kern nicht frei existieren können.

Experimente haben aber gezeigt, dass sich **Neutronen in Protonen** und **Protonen in Neutronen umwandeln** können. Bei diesen Umwandlungen **entstehen** dann die gesuchten **Elektronen** beziehungsweise **Positronen**.

Betrachten wir eine solche Umwandlung. In diesem Beispiel soll ein Proton in ein Neutron umgewandelt werden. Wir wissen, das Proton ist positiv geladen, das Neutron ist ungeladen. Bei der Umwandlung muss also noch ein Teilchen entstehen, das die positive Ladung aufnehmen kann. Sonst wäre die Gesamtladung nach der Umwandlung nicht gleich der Gesamtladung vor der Umwandlung. (Denn auch hier gilt das Gesetz der Ladungserhaltung. Dieses besagt, dass bei jedem Umwandlungsprozess die Summe der Ladungen erhalten bleiben muss.) Das Positron erfüllt diese Aufgabe. Es hat die gleiche Masse wie ein Elektron, ist jedoch positiv geladen.

Da es keine freien Positronen im Kern geben kann, werden diese nach der Entstehung sofort aus dem Kern emittiert.

In Kurzform lautet diese Reaktion:  $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu$

Ursprünglich glaubte man, der  $\beta^-$ -Zerfall verletze das Gesetz der Energieerhaltung. Heute weiss man mehr:

1. Das beim  $\beta^-$ -Zerfall erzeugte Proton und das freigesetzte Elektron haben eine kleinere Totalenergie als das ursprüngliche Neutron. Beim  $\beta^-$ -Zerfall entsteht aber noch ein drittes Teilchen. Dieses wird Anti-Neutrino ( $\bar{\nu}$ ) genannt. Es wird ebenfalls aus dem Kern emittiert und trägt den Rest der Energie, die beim Zerfall entsteht, mit sich. Das Anti-Neutrino ist ungeladen. Weil die Totalenergie der Teilchen nach dem Zerfall (Proton, Elektron, Anti-Neutrino) kleiner ist als vor dem Zerfall (Neutron) ist ein freies Neutron instabil (radioaktiv).
2. Das beim  $\beta^+$ -Zerfall erzeugte Neutron und das freigesetzte Positron haben eine kleinere Totalenergie als das ursprüngliche Proton. Beim  $\beta^+$ -Zerfall entsteht ebenfalls ein drittes Teilchen. Dieses wird Neutrino ( $\nu$ ) genannt. Es wird aus dem Kern emittiert und trägt den Rest der Energie, die beim Zerfall frei wird, mit sich. Das Neutrino ist ungeladen. Weil die Totalenergie der Teilchen nach dem Zerfall (Neutron, Positron, Neutrino) *grösser* ist als vor dem Zerfall (Proton) ist ein freies Proton stabil. Die für den  $\beta^+$ -Zerfall nötige Energie stammt aus der höheren Bindungsenergie des übrigbleibenden Atomkerns.

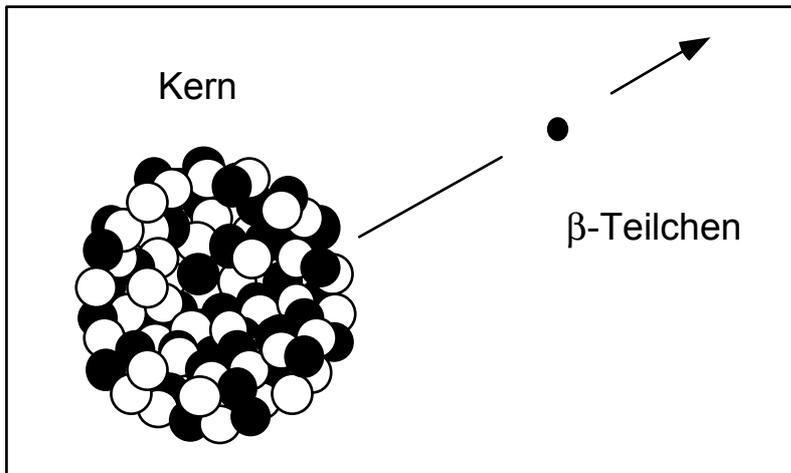
### Aufgabe 2.3

Stelle die Reaktionsgleichung für die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton auf. (Achtung: Das Antineutrino nicht vergessen.)

Wie beim  $\alpha$ -Zerfall wird auch beim  $\beta$ -Zerfall der Kern verändert. D. h. die **Substanzen** (Elemente) **vor und nach dem Zerfall** sind **nicht mehr die selben**.

- Beim  $\beta^-$ -Zerfall geht ein Neutron des Kerns in ein Proton über. Die Ordnungszahl des Kerns erhöht sich um 1. Dadurch entsteht ein anderes chemisches Element.

- Beim  $\beta^+$ -Zerfall geht ein Proton des Kerns in ein Neutron über. Die Ordnungszahl senkt sich um 1. Auch hier ändert das chemische Element.



**Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des  $\beta$ -Zerfalls**

#### **Aufgabe 2.4**

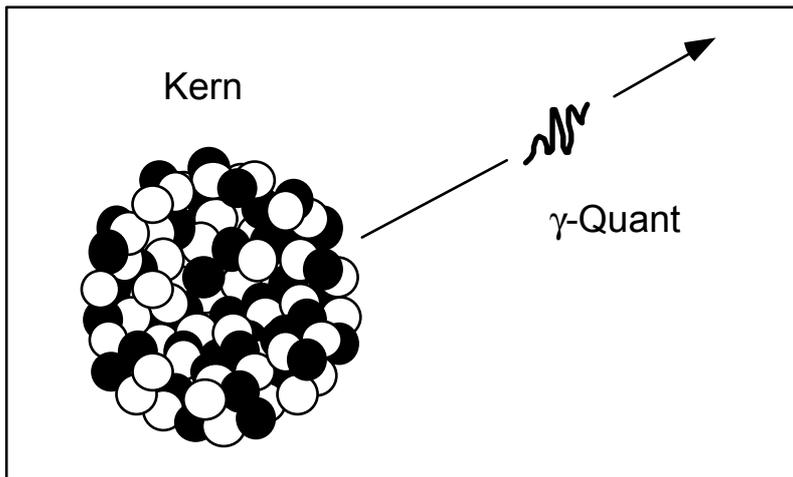
C-14 ist ein  $\beta^-$ -Strahler. Das heisst, C-14 emittiert beim Zerfall ein Elektron. In welches Element verwandelt sich der Kohlenstoff durch den Zerfall? Lösen Sie die Aufgabe mit Hilfe des Periodensystems.

#### **2.2.3 Die Gamma-Strahlung**

Nach einem  $\alpha$  - oder  $\beta$  -Zerfall ist der **Kern** oft in einem **angeregten Zustand**. Das heisst, im Kern befindet sich noch Energie, die abgebaut werden sollte. Dieser Energieabbau erfolgt durch Aussenden **elektromagnetischer Strahlung**.

Diese Strahlung hat die gleiche Natur wie sichtbares Licht. Auch Licht ist eine elektromagnetische Strahlung. Doch die  $\gamma$ -Strahlung ist viel kurzwelliger und darum viel energiereicher als das Licht.

Der angeregte Kern gibt jedoch seine Energie nicht kontinuierlich ab.  $\gamma$ -Strahlen werden in einzelnen Portionen (Quanten) ausgesandt. Die Physiker sagen, es wird ein **Photon** oder  **$\gamma$ -Quant** ausgesandt.



**Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des  $\gamma$ -Zerfalls**

Obwohl kein eigentlicher Kernzerfall stattfindet, sprechen die Physiker auch hier von einem Zerfall, dem  $\gamma$ -Zerfall. In dieser Sprechweise könnten Sie etwa sagen: „Der angeregte (energiereiche) Zustand des Kerns zerfällt in einen energieärmeren Zustand und in ein  $\gamma$ -Quant, das ausgesandt wird.“

Beim  $\gamma$ -Zerfall werden die **Nukleonen** des Kerns **weder umgewandelt noch ausgesandt**. Das bedeutet, dass vor und nach dem Energieabbau **das gleiche Element** vorhanden ist. Der Kern strahlt einzig Energie ab.

## 2.3 Aktivität

Sie wissen, dass Radionuklide spontan zerfallen und dabei Teilchen aussenden. Wenn Sie zum Beispiel eine Salatprobe vor sich haben, möchten Sie aber auch sagen können, **wie oft** in dieser Probe **ein Zerfall stattfindet**. Sie brauchen also ein Mass, das beschreibt, wie intensiv Ihre Probe strahlt. Zu diesem Zweck definieren wir die **Aktivität**:

### Definition 2.1

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl Kernzerfälle}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Die **Einheit** der Aktivität ist **1 Becquerel** = 1 Zerfall/Sekunde:  $[A] = 1 \text{ Bq}$

Im folgenden wollen wir die Zerfallsgesetze im Detail herleiten. Sie können jetzt Ihr mathematisches Wissen gut gebrauchen.

Wenn Sie ein paar einfache Regeln der Differentialrechnung gelernt haben, dann machen Sie mit den folgenden Abschnitten weiter, es lohnt sich! Falls Sie keine Grundkenntnisse der Differentialrechnung haben, gehen Sie direkt zur Zusammenfassung.

Der radioaktive Zerfall hat rein statistischen Charakter. Wir können nur für eine sehr, sehr grosse Zahl von radioaktiven Nukliden, aber nicht für ein einzelnes Nuklid, voraussagen, wann der Zerfall eintritt. Wir führen deshalb die

Zerfallswahrscheinlichkeit  $\lambda$  dafür ein, dass ein bestimmter Kern pro Zeiteinheit zerfällt.  $\lambda$  hat die Einheit 1/s.

In einer Menge  $N$  identischer radioaktiver Kerne ist also die gesamte Zahl der Zerfälle pro Zeiteinheit  $N \cdot \lambda$ .

$$\text{Aktivität } A = N \cdot \lambda = -\frac{dN}{dt} \quad (2.1)$$

Die Anzahl der radioaktiven Kerne nimmt mit der Zeit ab, da ja immer einige Kerne zerfallen. Wir nehmen dabei an, dass ein Kern nach dem Zerfall stabil sei.

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{\text{nachher}} - N_{\text{vorher}}}{\Delta t}, N_{\text{nachher}} < N_{\text{vorher}}$$

Merken Sie, warum das Minuszeichen da sein muss?

Die Gleichung  $N \cdot \lambda = -\frac{dN}{dt}$  nennt man eine Differentialgleichung 1. Ordnung.

Gesucht ist die Anzahl der Kerne  $N(t)$ , welche diese Gleichung erfüllt. Anfangsbedingung:  $N(t=0)=N_0$ .

**Lösungsweg:**

$$dN/dt = -N \cdot \lambda$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

Beide Seiten integrieren:

$$\int \frac{dN}{N} = \int -\lambda \cdot dt$$

$$\ln N = -\lambda \cdot t + c$$

Anfangsbedingung:  $N(t=0)=N_0$

$$\ln N_0 = 0 + c \Rightarrow \ln N_0 = c$$

$$\ln N = -\lambda \cdot t + \ln N_0$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t}$$

$\Rightarrow$

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

**Zerfallsgesetz (2.2)**

$N(t)$  = Zahl der zur Zeit  $t$  noch vorhandenen Kerne.

Da die Aktivität  $A = N \cdot \lambda$  ist, gilt:

$$A = N \cdot \lambda = N_0 e^{-\lambda t} \cdot \lambda = N_0 \lambda \cdot e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

Die Aktivität nimmt zeitlich mit dem gleichen Gesetz ab wie die Anzahl der radioaktiven Kerne.

### Zusammenfassung

Der radioaktive Zerfall hat rein statistischen Charakter. Man kann also von einem Kern nicht sagen, wann er zerfällt, sondern nur, wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, dass er in einer gewissen Zeitspanne zerfällt. Damit gleichbedeutend ist die Aussage, wie viele Zerfälle aus einer riesigen Anzahl von Nukliden stattfinden.

Wie viele radioaktive Kerne in einer gewissen Zeit zerfallen, hängt von zwei Grössen ab:

- Zum einen ist dies die Anzahl vorhandener Kerne. Denn, je mehr Kerne vorhanden sind, desto mehr können auch zerfallen.
- Zum anderen ist es die Zerfallswahrscheinlichkeit. Sie ist ein Mass dafür, wie „gerne„ ein Kern zerfällt.

Diese Art von Abhängigkeit wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{Zerfallsgesetz})$$

$N(t)$ : Anzahl radioaktiver Kerne zur Zeit  $t$

$N_0$ : Ursprüngliche Anzahl radioaktiver Kerne

$\lambda$ : Zerfallswahrscheinlichkeit,  $[\lambda] = \text{s}^{-1}$

Die Aktivität ist proportional zur Anzahl radioaktiver Kerne. Die Proportionalitätskonstante ist die Zerfallswahrscheinlichkeit.

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{wobei } A_0 = \lambda \cdot N_0.$$

### Aufgabe 2.5

Eine Probe mit 1 mg reinem Radium-226 hat etwa  $2.7 \cdot 10^{18}$  Kerne. Die Zerfallswahrscheinlichkeit beträgt  $13.8 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ . (Dies entspricht einer Halbwertszeit von 1600 Jahren. Mehr darüber lernen Sie im Abschnitt 2.4).

- a) Wie gross ist die Aktivität dieser Probe?
- b) Wie viele Kerne zerfallen in 15 Minuten?
- c) Wie gross ist die Aktivität noch nach diesen 15 Minuten?

### Experiment 2.1

Der Lehrer hat Ihnen ein Experiment vorbereitet.

In diesem Experiment sollten Sie den **zeitlichen Verlauf der Aktivität** einer Pa-234- oder einer anderen geeigneten Probe aufnehmen, das Ergebnis graphisch darstellen und interpretieren.

Arbeiten Sie zu zweit. Suchen Sie sich einen Partner, der im Leitprogramm gerade etwa am selben Ort steht wie Sie. Planen und führen Sie das Experiment gemeinsam durch.

### **Was geschieht in diesem Experiment?**

Die Probe zerfällt und sendet  $\beta$ -Teilchen aus. Ein bestimmter Anteil aller ausgesandten Strahlen löst im Detektor einen elektrischen Impuls aus. Diese Impulse werden registriert. Ihre Anzahl wird fortlaufend aufaddiert und angezeigt.

### **Was ist Ihre Aufgabe?**

Bestimmen Sie den zeitlichen Verlauf der Aktivität der bereitgelegten Probe. Stellen Sie die Ergebnisse Ihrer Messung graphisch dar, und diskutieren Sie das Resultat. Ihre Messung sollte den Aktivitätsverlauf über einen Zeitraum von rund 5 Minuten wiedergeben.

### **Wie gehen Sie vor?**

Bedienung der Geräte:

Lassen Sie sich von Ihrem Betreuer oder von Ihrer Betreuerin die wesentlichen Elemente der Messapparatur und deren Bedienung erläutern. Beachten Sie auch die Geräteanleitung.

Planung des Experiments:

Planen Sie Ihr gemeinsames Vorgehen. Achtung, während der Messung könnte es hektisch werden. Arbeiten Sie deshalb zu zweit. Besprechen Sie mit Ihrem Partner Ihr Vorgehen. Wer macht wann genau was? Erstellen Sie vor Messbeginn die nötigen Unterlagen.

Haben Sie schon eine gemeinsame Strategie zur Durchführung der Messung erarbeitet? Falls nicht, finden Sie im nächsten Abschnitt zwei kurze Vorschläge.

Durchführung des Experimentes:

Wenn alles bereit ist, starten Sie die Messung. Protokollieren Sie alle Zwischenergebnisse. Unterlassen Sie in dieser Phase jegliche Auswerteschritte.

Auswertung des Experimentes:

Beginnen Sie die Auswertung erst nach Beendigung der Messung. Erstellen Sie die Graphik. Tragen Sie dazu die registrierten Impulse in Abhängigkeit der Zeit auf. Beschreiben Sie in höchstens zwei kurzen Sätzen den beobachteten zeitlichen Verlauf der Aktivität.

Nun beantworten Sie folgende **Frage**: Durch welche mathematische Funktion könnte das Abklingen der Aktivität angenähert werden?

### **Zwei Vorschläge zum praktischen Vorgehen.**

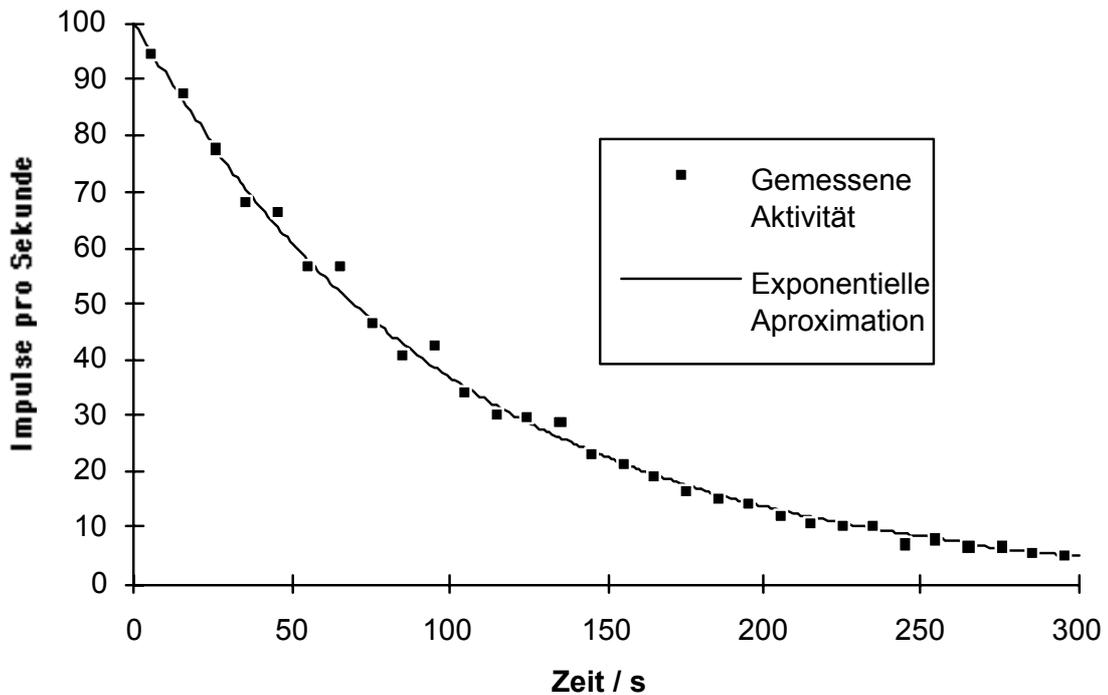
Die einen setzen den Zähler zuerst auf 0. Nach Messbeginn lassen sie ihn dann frei hochzählen. In periodischen Abständen  $\Delta t$  lesen Sie den Zählerstand ab und notieren sich die Werte. Die Aktivität erhalten sie, indem sie den aktuellen Wert minus den vorangegangenen Wert nehmen und die Differenz durch die Periodendauer teilen.

Die anderen führen periodische Intervallmessungen durch. Sie setzen den Zählerstand auf 0. Dann starten sie die Messung. Diese wird nach beispielsweise 5 Sekunden gestoppt. Der Wert wird abgelesen, der Zähler wird zurückgesetzt. In periodischen Abständen folgen die nächsten Messequenzen. Die Aktivität erhält

man, indem der Wert einer Intervallmessung durch die Dauer seines Messintervalls geteilt wird.

### Ergebnis

Mit zunehmender Zeit wird die Aktivität immer schwächer. Dabei scheint die Aktivität exponentiell abzufallen. Die Kurve lässt sich recht gut durch eine **Exponentialkurve** annähern (Abbildung 2.5).



**Abbildung 2.5: Aktivitätsverlauf einer Pa-234 Probe**

Diese Exponentialkurve stellt aber nur einen Mittelwert dar. Denn beim radioaktiven Zerfall handelt es sich um Zufallsereignisse. Das heisst, dass während einer Messperiode einmal mehr, einmal weniger Kerne zerfallen als im Mittel. Bestimmt man die Aktivität in ganz kurzen Zeiteinheiten (Feinbestimmung), kann man diese Abweichungen sichtbar machen (vergleiche Abbildung 2.6).

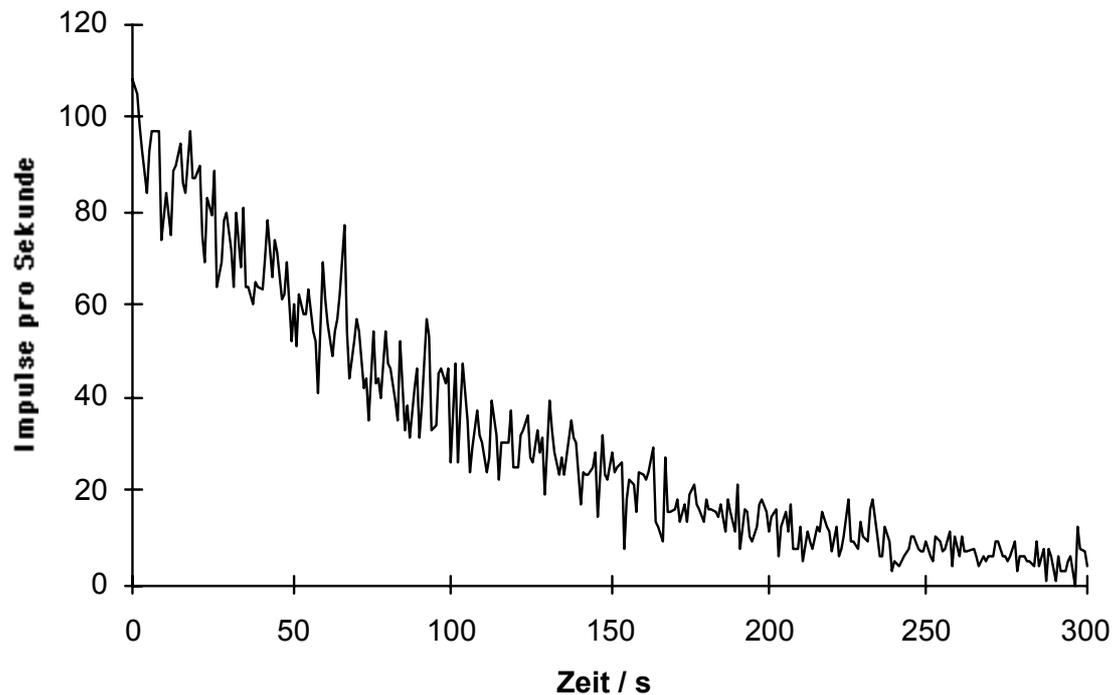


Abbildung 2.6: Feinbestimmung des Aktivitätsverlaufs einer Pa-234 Probe

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

Die Zerfallskonstante ist eine unanschauliche Grösse. Deshalb führen wir die **Halbwertszeit  $T_{1/2}$**  ein.

Die Halbwertszeit besagt, **nach welcher Zeit sich die Zahl der Nuklide und damit die Aktivität halbiert haben wird.**

Nach Ablauf einer zweiten Halbwertszeit hat sich die Zahl der Nuklide erneut halbiert. Sie ist nun die Hälfte der Hälfte, also ein Viertel. Nach dem Verstreichen einer weiteren Halbwertszeit beträgt die Nuklidzahl ein Achtel, dann ein Sechzehntel usw. Mathematisch zusammengefasst lässt sich schreiben:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \quad (2.4)$$

beziehungsweise für die Aktivität

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \quad (2.5)$$

### Aufgabe 2.6

Nochmals zu Ihrem Experiment (Experiment 2.1) zurück. Bestimmen Sie die Halbwertszeit des dort verwendeten radioaktiven Präparats. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen zur Bestimmung der Halbwertszeit in wenigen Worten. Schreiben Sie höchstens 3 kurze Sätze.

### Aufgabe 2.7

Um das in Abschnitt 2.1.3 beschriebene Aussterben der künstlich erzeugten Elemente zu verstehen, sollten Sie diese Aufgabe lösen.

Fiktive Annahme:

Vor 10 Milliarden Jahren hätten  $10^{13}$  kg (10 Milliarden Tonnen) Pu-244 existiert. In der Zwischenzeit wäre jedoch dieses Plutonium ständig zerfallen. Pu-244 ist eines der langlebigsten künstlichen Elemente. Seine Halbwertszeit beträgt  $8.3 \cdot 10^7$  Jahre.

Welche Masse wäre von diesen ursprünglichen  $10^{13}$  kg Pu-244 heute noch vorhanden?

### Lernaufgabe

#### Beziehung zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten

Zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten gilt eine einfache Beziehung. Diese herauszufinden ist Ihre Aufgabe. Dazu eine kleine Hilfe: Nach Verstreichen einer Halbwertszeit wird die ursprüngliche Anzahl Radionuklide auf die Hälfte geschrumpft sein. Es gilt:

$$t = T_{1/2} \quad \text{und} \quad N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

In Gleichung (2.2) eingesetzt erhalten Sie

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (2.6)$$

Ermitteln Sie nun daraus den Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten. Lösen Sie dazu diese Gleichung nach  $\lambda$  auf.

Den Lösungsvorschlag zu dieser Aufgabe finden Sie auf der nächsten Seite.

### Lösungsvorschlag

Zuerst eliminieren Sie  $N_0$ . Sie erhalten

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Nach beidseitigem Logarithmieren folgt

$$-\ln(2) = -\lambda T_{1/2}$$

Durch Umformen erhalten Sie für die **Beziehung zwischen der Zerfallskonstanten und der Halbwertszeit**

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.7)$$

## 2.5 Nuklidkarte

Die Nuklidkarte ist ein wichtiges Hilfsmittel der Kernphysik.

### Literaturstudium

*Zum Aufbau der Nuklidkarte lesen Sie in Dorn, Bader: „Physik in einem Band“, auf Seite 533, „§196 Die Nuklidkarte„.*

*Studieren Sie unbedingt die Graphik auf den Seiten 578 und 579.*

### Aufgabe 2.8

Die Felder der Nuklidkarte sind farbig. Jede Farbe repräsentiert einen bestimmten Zerfallstyp. Durch welche Farben werden  $\alpha$ -,  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Zerfälle wiedergegeben?

### Lernaufgabe

#### Anwendung der Nuklidkarte

Gewisse Radionuklide senden bei der Umwandlung Teilchen aus. Dabei wandeln sich die Atome von einem Element zum anderen. Wir sagen: Aus der Mutter entsteht durch den Zerfall die Tochter. Der Mutter-Tochter-Übergang kann auf der Nuklidkarte nachvollzogen werden. Jede der betrachteten Zerfallsarten, bei denen Nukleonen ausgesandt oder umgewandelt werden ( $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ), entspricht einem typischen Verschiebungsmuster auf der Karte. Dieses **Verschiebungsmuster** sollten Sie herausfinden und sich einprägen.

Vorbereitung:

Wissen Sie noch, welche Kernreaktionen beim  $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ -Zerfall stattfinden? Wenn nicht schauen Sie in Abschnitt 2.2 nach.

### 1. Teil der Aufgabe

Erstellen Sie eine Tabelle und tragen Sie für jede der 3 Zerfallsarten ( $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ) die Änderung

- der Gesamtzahl aller Nukleonen (Nukleonenzahl A)
- der Anzahl Protonen (Ordnungszahl Z)
- der Neutronenzahl (Neutronenzahl N)

auf.

Beispiel:  $\alpha$ -Zerfall

A geht über in A-4:  $A \rightarrow A-4$

N geht über in ...  $N \rightarrow \dots$

Z geht über in ...  $Z \rightarrow \dots$

Das Vervollständigen ist Ihre Aufgabe.

### 2. Teil der Aufgabe

Diese Zerfälle führen auf der Nuklidkarte zu einem typischen Verschiebungsmuster. Erstellen Sie dazu eine „Kurzanleitung“. Notieren Sie sich zu jeder Zerfallsart, wie Sie auf der Nuklidkarte vom Mutternuklid zum Tochternuklid gelangen.

Beispiel:

Wir betrachten den Übergang  $N \rightarrow N+1$ .

Kurzanleitung: Ausgehend vom Ausgangsnuklid gelangen wir zum Zielnuklid, indem wir auf der Karte ein Feld nach rechts rücken.

## 1. Lösungsvorschläge

### Teil 1:

|                     |                                    |                     |                     |
|---------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| $\alpha$ -Zerfall:  | $A \rightarrow A-4$                | $N \rightarrow N-2$ | $Z \rightarrow Z-2$ |
| $\beta^-$ -Zerfall: | $A \rightarrow A$<br>(unverändert) | $N \rightarrow N-1$ | $Z \rightarrow Z+1$ |
| $\beta^+$ -Zerfall: | $A \rightarrow A$<br>(unverändert) | $N \rightarrow N+1$ | $Z \rightarrow Z-1$ |

### Teil 2:

Von der Muttersubstanz gelangen Sie zur Tochtersubstanz, indem Sie auf der Nuklidkarte

|                     |                         |                            |
|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| $\alpha$ -Zerfall:  | 2 Felder nach links und | 2 Felder nach unten rücken |
| $\beta^-$ -Zerfall: | 1 Feld nach links und   | 1 Feld nach oben rücken    |
| $\beta^+$ -Zerfall: | 1 Feld nach rechts und  | 1 Feld nach unten rücken   |

### Aufgabe 2.9

Welches sind die Tochterprodukte von C-13, Pb-202, Ra-220 und N-18?

## 2.6 Zerfallsreihen

Die meisten Mutter-Tochter-Übergänge enden bei einer wiederum radioaktiven Tochter. Diese zerfällt erneut. Und vielleicht zerfällt das aus der Tochter entstandene Produkt nochmals. Dies geht weiter, bis ein stabiles Nuklid erreicht wird. So entsteht eine Zerfallsreihe.

Beispiel einer solchen Zerfallsreihe:

### Beispiel 2.1

Die Zerfallsreihe von Radon-213 lautet:



### Aufgabe 2.10

Erstellen Sie mit Hilfe der Nuklidkarte die Zerfallsreihe zu Am-243. Schreiben Sie die Reihe entsprechend dem obigen Beispiel.

Hier die ersten Gedankenschritte:

Sie starten beim Feld Am-243. Das Feld ist gelb. Am-243 ist also ein  $\alpha$ -Strahler. Zur Tochter gelangen Sie, indem Sie 2 Felder nach links und zwei Felder nach unten rücken. Das ist ... und ist ein ...-Strahler. Zur Tochter dieses Nuklids gelangen Sie ...

Es gibt **3 natürliche Zerfallsreihen**. Diese werden auch „Natürliche radioaktive Familien,“ genannt. Jede dieser Reihen beginnt bei einem sehr langlebigen Radionuklid. Die Ausgangsnuklide dieser drei Reihen sind: Th-232, U-235 und U-238.

### **Lernaufgabe**

#### **Natürliche Zerfallsreihen**

Bestimmen Sie das chemische Element bei dem alle drei natürlichen Zerfallsreihen enden.

Vorgehen: Setzen Sie sich mit 2 Kollegen zusammen. Jeder von Ihnen erstellt eine Zerfallsreihe. Dabei wählt jeder ein anderes Ausgangsnuklid. Diskutieren Sie Ihre Resultate.

## Lösung

Alle drei natürlichen Zerfallsreihen enden beim Element Blei. Genauer:

- Die Thorium-232 Reihe endet bei Blei-208.
- Die Uran-235 Reihe endet bei Blei-207.
- Die Uran-238 Reihe endet bei Blei-206.

## 2.7 Anwendungen der Kerntechnik

Die Kerntechnik spielt in der heutigen Gesellschaft eine bedeutende Rolle. Sie kommt in erhöhtem Masse in der Medizin, bei der Energieerzeugung, bei Materialuntersuchungen, in der Lebensmittelindustrie und bei der Umweltanalytik zur Anwendung.

Als spezielles Beispiel betrachten wir die **Datierung mit Radionukliden**. Radioaktive Nuklide eignen sich hervorragend als Uhr. Diese Uhr ist sehr robust. Höchste Beschleunigungen, Extremtemperaturen, Witterungseinflüsse, elektromagnetische Felder, chemische und mechanische Veränderungen können ihr nichts anhaben.

### Literaturstudium

*Lesen Sie in Dorn, Bader: „Physik in einem Band“, auf Seite 525, „3. Aktivität verrät das Alter,,*

Damit hätten Sie den allgemeinen Teil dieses Kapitels erfolgreich durchgearbeitet. Falls Sie noch mehr über physikalische Zusammenhänge erfahren möchten, bearbeiten Sie im Additum ab Seite 43 den Abschnitt „Der Mutter-Tochter-Zerfall,,

Sollten Sie jedoch „gesättigt,, sein, lösen Sie nun die Kontrollfragen zu diesem Kapitel (Seite 39).

## Lernkontrolle

### Aufgabe 2.11

Die Kernforschung begann mit der Entdeckung der radioaktiven Strahlen. Wann wurden diese Strahlen entdeckt und wie hiess der Entdecker?

(Sie sollten das Entdeckungsjahr auf 5 Jahre genau nennen können).

### Aufgabe 2.12

In diesem Kapitel haben Sie die drei wichtigsten Zerfallsarten kennen gelernt. Sie wissen, dass Radionuklide zerfallen und dabei Teilchen aussenden. Nennen Sie die drei wichtigsten Zerfallsarten. Beschreiben Sie kurz die Teilchen, die bei diesen Zerfällen emittiert werden.

### Aufgabe 2.13

Fr-221 (Francium) ist radioaktiv. Beim Zerfall wandelt sich das Fr-221 in ein neues Nuklid. Das entstandene Nuklid zerfällt auch wieder. Diese Zerfallsreihe wird fortgesetzt bis ein stabiles Nuklid erreicht wird.

Erstellen Sie mit Hilfe der Nuklidkarte die Zerfallsreihe, die bei Fr-221 beginnt.

### Aufgabe 2.14

Archäologen finden bei Ausgrabungen Holzkohlenreste. Diese Kohlestückchen lassen sie nach der C-14-Methode datieren. Bei der Altersbestimmung wird die Aktivität dieser alten Probe mit der Aktivität einer frischen Holzkohlenprobe (Referenzprobe) verglichen.

Das Ergebnis: Die alte Probe weist eine Aktivität von 21.2 Zerfällen pro Minute auf. Die Referenzprobe weist eine Aktivität von 32.3 Zerfällen pro Minute auf.

Berechnen Sie das Alter der gefundenen Holzkohlenprobe. (C-14 hat eine Halbwertszeit von 5730 Jahren ).

## Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 2

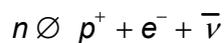
### Aufgabe 2.1

Radioaktive Strahlen stammen aus dem Kern.

### Aufgabe 2.2

Durch diesen  $\alpha$ -Zerfall wandelt sich Rn-222 in Po-218. Beim Zerfall gehen dem Radon 2 Neutronen und 2 Protonen verloren. Dadurch rückt das Element im Periodensystem um 2 Elemente weiter nach links.

### Aufgabe 2.3



Das elektrisch neutrale Neutron wandelt sich in ein Proton. Dieses ist positiv geladen. Damit vor und nach der Reaktion die Ladungsbilanz stimmt, muss bei diesem  $\beta^-$ -Zerfall noch ein Elektron entstehen. Das Antineutrino trägt einen Teil der Energie weg.

### Aufgabe 2.4

Aus Kohlenstoff entsteht Stickstoff.

Ein Neutron wandelt sich in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Elektron und Antineutrino werden ausgesandt. Das Proton verbleibt im Kern. Die Ordnungszahl des Nuklids ist durch diesen Zerfall um 1 gestiegen.

### Aufgabe 2.5

a) Die Aktivität beträgt  $A = \lambda \cdot N = 13,8 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1} \cdot 2,7 \cdot 10^{18} \approx 37 \cdot 10^6 \text{ Bq}$

b) In 15 Minuten (900 Sekunden) zerfallen:

$$\begin{aligned} \Delta N &= N_0 - N(900\text{s}) = N_0 (1 - e^{-\lambda \cdot t}) = \\ &= 2,7 \cdot 10^{18} \cdot (1 - e^{-13,8 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1} \cdot 900 \text{ s}}) \text{ Kerne} \approx 33 \cdot 10^9 \text{ Kerne} \end{aligned}$$

c) Da  $\Delta N$  viel kleiner ist als  $N_0$  kann keine Änderung der Aktivität festgestellt werden.

### Aufgabe 2.6

Die Halbwertszeit beträgt rund 70 Sekunden.

Wir bestimmen graphisch, nach welcher Zeit die Aktivität auf 50% (25%) der ursprünglichen Aktivität gesunken ist. Die verstrichene Zeit, die Sie der Abszisse entnehmen können, entspricht einer (zwei) Halbwertszeit(en).

### Aufgabe 2.7

Vor 10 Milliarden Jahren gab es  $10^{13} \text{ kg}$  Plutonium-244. Das sind

$$N_0 = \frac{10^{13} \text{ kg}}{244 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot N_A = \frac{10^{13} \text{ kg}}{0.244 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \approx 2.5 \cdot 10^{37} \text{ Kerne}$$

Setzt man diesen Wert in das Zerfallsgesetz (2.4) ein, erhält man

$$N = N_0 2^{-\frac{10^{10} \text{ Jahre}}{8.3 \cdot 10^7 \text{ Jahre}}} = 2.5 \cdot 10^{37} \cdot 5.4 \cdot 10^{-37} \text{ Kerne} \approx 13 \text{ Kerne}$$

Heute wären davon noch in der Grössenordnung von 10 vorhanden. Erstaunt Sie das?

### Aufgabe 2.8

$\alpha$ -Strahler sind gelb gekennzeichnet,

$\beta^-$ -Strahler sind blau gekennzeichnet,

$\beta^+$ -Strahler sind rot.

### Aufgabe 2.9

C-13 ist stabil. Da es nicht zerfällt, hat es auch keine Tochter.

Pb-202 geht über in Tl-202.

Ra-220 geht über in Rn-216.

N-18 geht über in O-18

### Aufgabe 2.10

Am-243  $\rightarrow$  Np-239  $\rightarrow$  Pu-239  $\rightarrow$  U-235  $\rightarrow$  Th-231  $\rightarrow$  Pa-231  $\rightarrow$  Ac-227  $\rightarrow$  Th-227  $\rightarrow$  Ra-223  $\rightarrow$  Rn-219  $\rightarrow$  Po-215  $\rightarrow$  Pb-211  $\rightarrow$  Bi-211  $\rightarrow$  Tl-207  $\rightarrow$  Pb-207.

### Aufgabe 2.11

Der Entdecker der radioaktiven Strahlen hiess H. Becquerel. Er entdeckte diese Strahlen 1896.

### Aufgabe 2.12

$\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Zerfall sind die drei wichtigsten Zerfallsarten.

Beim  $\alpha$ -Zerfall werden  $\alpha$ -Teilchen ausgesandt. Diese bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen.  $\alpha$ -Teilchen sind Heliumkerne.

Der  $\beta$ -Zerfall wird in zwei Gruppen eingeteilt. Beim  $\beta^-$ -Zerfall wird ein Elektron zusammen mit einem Antineutrino ausgesandt. Beim  $\beta^+$ -Zerfall wird ein Positron zusammen mit einem Neutrino ausgesandt.

Beim  $\gamma$ -Zerfall strahlt der Kern Energie in Form elektromagnetischer Wellen ab.

### Aufgabe 2.13

Die Zerfallsreihe lautet:

Fr-221 → At-217 → Bi-213 → Po-213 → Pb-209 → Bi-209  
Diese Zerfallsreihe endet beim stabilen Nuklid Bi-209.

### Aufgabe 2.14

Die Aktivität der Probe verändert sich nach der Beziehung

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

Diese Gleichung nach  $t$  aufgelöst ergibt

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)}{\ln(2)} \cdot T_{1/2}$$

Nach Einsetzen der Werte

$$A(t) = 21,2 \quad \text{Zerfälle pro Minute}$$

$$A_0 = 32,3 \quad \text{Zerfälle pro Minute}$$

$$T_{1/2} = 5730 \quad \text{Jahre}$$

erhalten wir  $t = 3480$  Jahre. Die Holzkohle ist demnach rund 3500 Jahre alt.

Wenn Sie 3 dieser 4 Kontrollfragen richtig beantwortet haben, melden Sie sich beim Lehrer zum Kapiteltest.

## Additum

### Der Mutter-Tochter-Zerfall

Das Produkt eines radioaktiven Zerfalls kann wieder instabil sein. Das heisst, die **Tochter** ist **ebenfalls radioaktiv**. Diese zerfällt wiederum. Durch diese mehrstufige Wandlung der einzelnen Nuklide **ändern** sich auch die **Eigenschaften der Probe**.

Ein Beispiel:

Im Granit finden sich kleine Spuren von Uran. Beim Zerfall des Urans bildet sich eine Reihe verschiedener „Nachfahren„. Hier betrachten wir einen Ausschnitt daraus. Wir beginnen beim Radium-226.

**Radium** ist ein Metall und bei unseren Gesteinstemperaturen fest. Als festes Element bleibt es in seiner festen Umgebung, dem Gestein. Seine Strahlung gefährdet uns auch nicht. Denn Radium ist ein  $\alpha$ -Strahler. Wie Sie noch sehen werden, können  $\alpha$ -Teilchen durch Luft und Gestein gut abgeschirmt werden. Radium wäre also verhältnismässig harmlos.

Doch da ist seine Tochter - das **Radon**. Radon ist ein Edelgas. Als solches geht es kaum chemische Verbindungen ein. Kleine Mengen mögen, noch bevor sie zerfallen, aus dem Boden diffundieren (heraustreten). So gelangen sie u. a. in die Atemluft. Mit der Luft kommt das Radon in die Lunge. Das Radon wird, sollte es nicht zuvor zerfallen, wieder ausgeatmet. Zerfällt es jedoch in der Lunge, befindet es sich in unmittelbarer Nähe des Gewebes. Hier ausgesandte  $\alpha$ -Teilchen können das umgebende Lungengewebe schädigen.

Doch damit nicht genug. Zerfällt das Radon, entsteht **Polonium**. Polonium, ein Metall, wird nicht mehr ausgeatmet. Polonium bleibt im Organismus. Auch Polonium ist ein  $\alpha$ -Strahler.

### 1. Zeitliche Änderung der Mutter- und der Tochternuklide.

Radioaktive Tochternuklide werden einerseits gebildet, andererseits zerfallen sie. Wie verändert sich nun die **Konzentration des Mutternuklids**, wie die **des Tochternuklids**?

Dazu betrachten wir eine frisch **aufbereitete Probe**. Diese soll anfänglich **keine Tochternuklide** enthalten. Lediglich die Muttersubstanz sei vorhanden.

Vorgaben

Muttersubstanz: Fiktives Element Mu

Anfangsmenge:  $N_{0-Mu}$

Zerfallskonstante:  $L_{mu}$

Tochtersubstanz: Fiktives Element To

Anfangsmenge:  $N_{0-To} = 0$ ; am Anfang sind keine Tochternuklide vorhanden.

Zerfallskonstante:  $L_{to}$

Wie lauten nun die **Zerfallsgesetze für Mutter und Tochter**?

Die Herleitung der Formel würde hier zu weit führen. Darum direkt das Ergebnis:

---

Für das **Mutternuklid** gilt (Gleichung 2.2):

$$N_{\text{Mu}}(t) = N_{0-\text{Mu}} \cdot e^{-\lambda_{\text{Mu}}t}$$

Für das **Tochternuklid** gilt:

$$N_{\text{To}}(t) = N_{0-\text{Mu}} \frac{\lambda_{\text{Mu}}}{\lambda_{\text{To}} - \lambda_{\text{Mu}}} \left( e^{-\lambda_{\text{Mu}}t} - e^{-\lambda_{\text{To}}t} \right)$$

Für den Spezialfall mit  $I_{\text{Mu}} = I_{\text{To}}$  gilt:

$$N_{\text{To}}(t) = N_{0-\text{Mu}} \cdot \lambda_{\text{Mu}} \cdot t \cdot e^{-\lambda_{\text{Mu}}t}$$

|           |                   |
|-----------|-------------------|
| N:        | Nuklidzahl        |
| I:        | Zerfallskonstante |
| Index Mu: | Mutternuklid      |
| Index To: | Tochternuklid     |

Wie sieht das an einem **Beispiel** aus?

Betrachten wir dazu die folgenden **Varianten**: Mutter und Tochter sind beide radioaktiv und zerfallen.

- Die Lebensdauer der Tochter ist bedeutend länger als die der Mutter.
- Mutter und Tochter leben gleich lange.
- Die Lebensdauer der Tochter ist bedeutend kürzer als die der Mutter.

Ich habe für Sie ein Beispiel durchgerechnet. Dazu die genauen Zahlenwerte:

|                    |   |
|--------------------|---|
| Muttersubstanz:    | Fiktives Element Mu   |
| Anfangsmenge:      | $N_{0-\text{Mu}} = 10^9$ Kerne                                    |
| Zerfallskonstante: | $I_{\text{Mu}} = 0.1 \text{ s}^{-1}$                              |
| Tochtersubstanz:   | Fiktives Element To   |
| Anfangsmenge:      | $N_{0-\text{To}} = 0$ ; Am Anfang keine Tochternuklide vorhanden. |
| Zerfallskonstante: | 3 Möglichkeiten   |

a)  $I_{\text{To}} = 0.01 \text{ s}^{-1}$

Der Zerfall der Tochter ist 10mal unwahrscheinlicher als der der Mutter. D. h. die Halbwertszeit der Tochter ist 10mal grösser als diejenige der Mutter. Die Tochter lebt also bedeutend länger.

b)  $I_{\text{To}} = 0.1 \text{ s}^{-1}$

Mutter und Tochter zerfallen gleich wahrscheinlich. Die beiden Halbwertszeiten sind gleich.

c)  $I_{\text{To}} = 0.5 \text{ s}^{-1}$

Die Halbwertszeit der Tochter ist 5mal kleiner als diejenige der Mutter. Die mittlere Lebensdauer der Tochter ist also bedeutend kürzer als die der Mutter.

## Diskussion

### Zeitliche Änderung der Nuklidzahl

In Abbildung 2.7 finden Sie den zeitlichen Verlauf der Nuklidzahl der Muttersubstanz wiedergegeben. Zum zeitlichen Verlauf der Nuklidzahl der Tochtersubstanz finden Sie 3 Kurven ( für jede Variante eine).

Die Nuklidzahl der **Mutter** kann lediglich abnehmen. Denn es gibt in dieser Probe kein übergeordneter „Vorfahre,, bei dessen Zerfall das Mutternuklid erzeugt würde.

Bei den Töchtern gilt:

In der Anfangsphase dominiert die Bildung der Töchter. Die Aktivität des Mutternuklids ist in dieser Phase noch hoch. Durch die vielen Mutterzerfälle entstehen viele Tochterkerne. Bei der Tochter sind in der Anfangsphase jedoch erst wenige Kerne vorhanden. Darum können auch nur wenige zerfallen. Der **Zuwachs** an Töchtern ist höher als deren Abnahme durch Zerfall.

Mit **fortschreitender Dauer** dominiert der **Zerfall** der Tochtersubstanz. Hier sind nur noch wenige Mutterkerne vorhanden. Daher ist ihre Aktivität auch klein. Das heisst, es entstehen nur noch wenige Töchter.

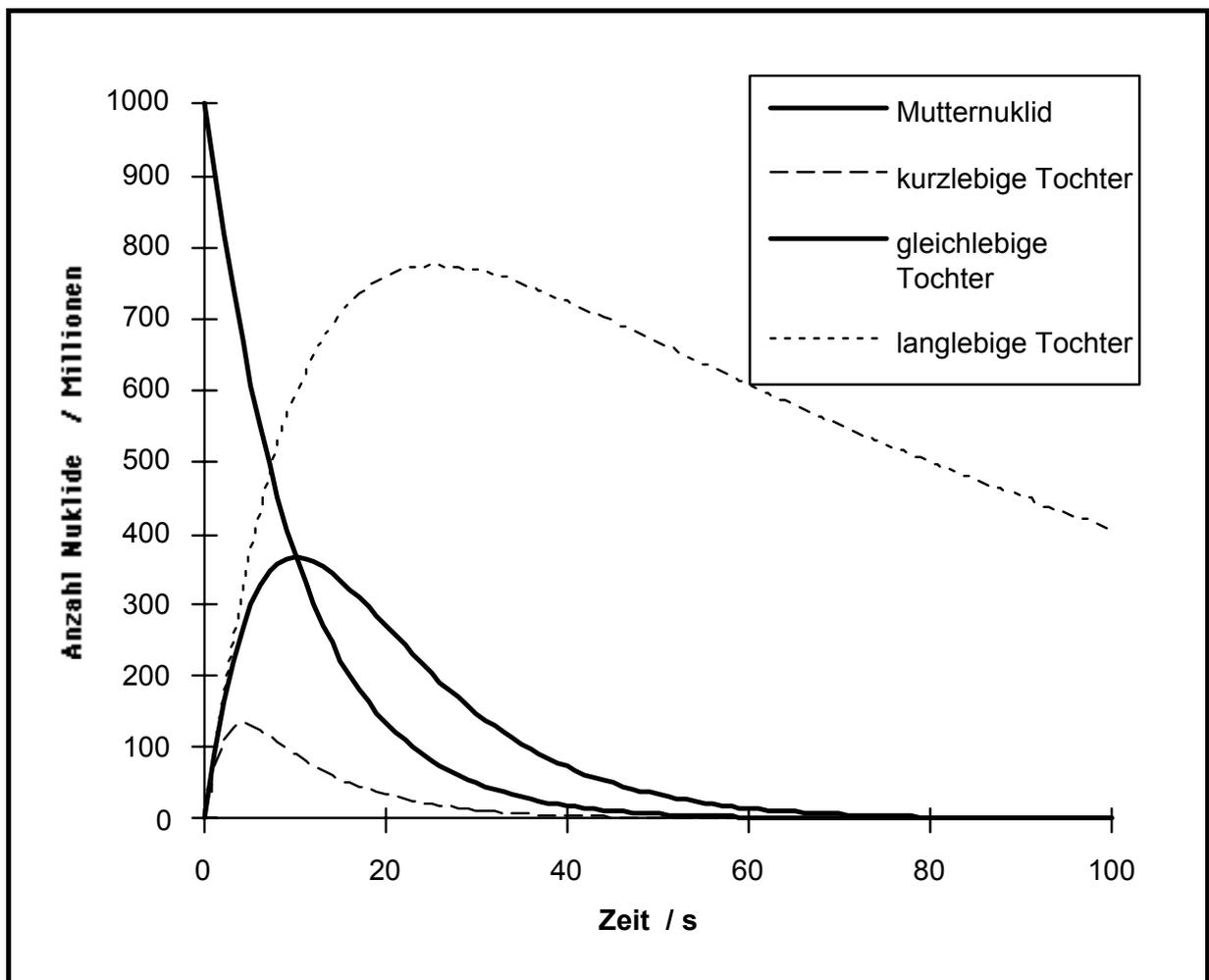


Abbildung 2.7: Nuklidzahl der Muttersubstanz und der Tochtersubstanz (Beachten Sie die 3 Varianten der Tochtersubstanz)

### Wie ändert sich die Aktivität?

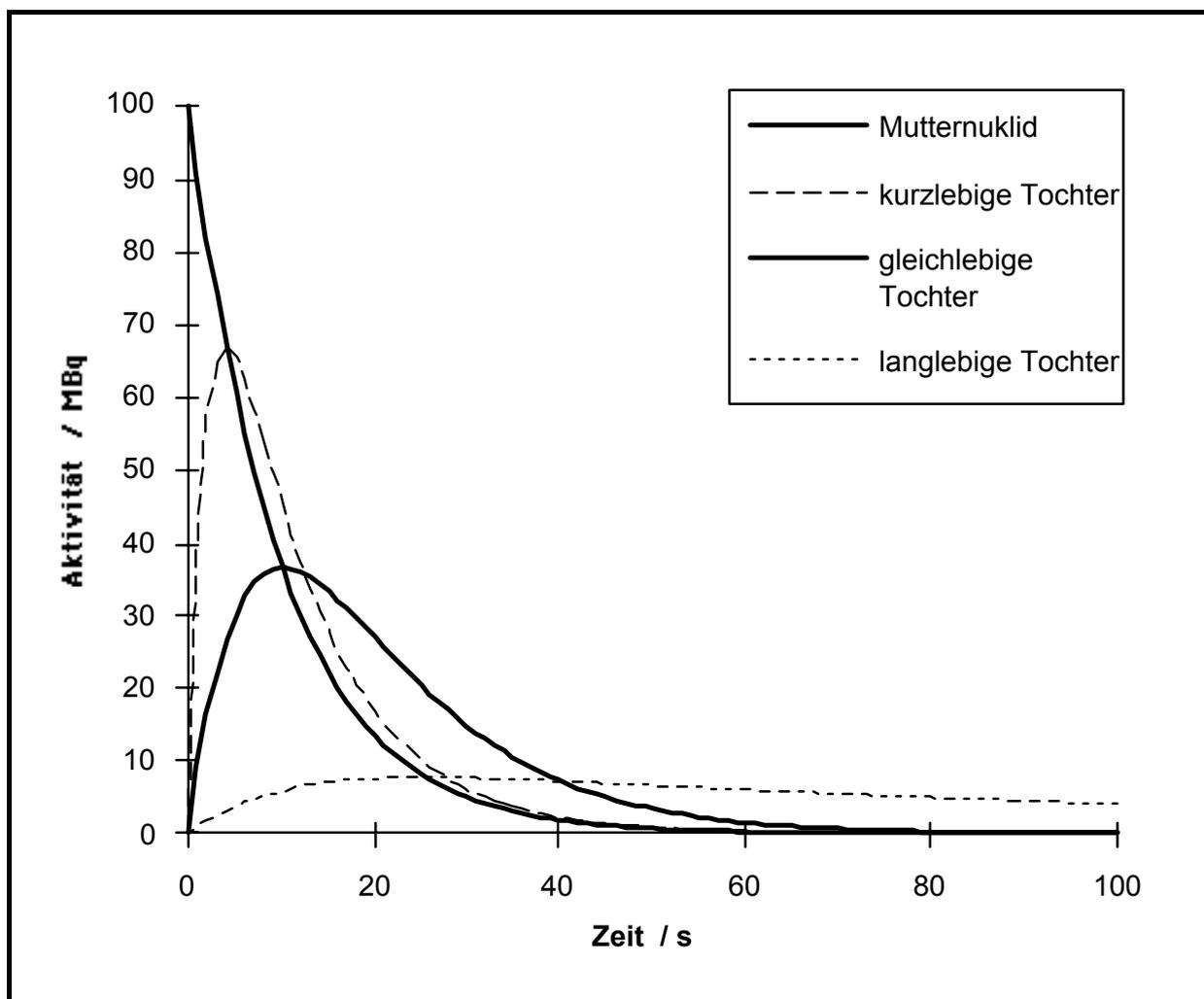
In Abbildung 2.8 finden Sie für die Muttersubstanz sowie für jede der 3 Varianten der Tochtersubstanz den **zeitlichen Verlauf der Aktivität** wiedergegeben.

In der Zusammenfassung von Abschnitt 2.3 haben Sie gesehen, dass **die Aktivität proportional zur Anzahl der Nuklide** ist. Dies gilt allgemein, also auch in der Anfangsphase. Auch schon in dieser Phase zerfallen einige Töchter (Aktivität  $A_{T_0} > 0$ ).

Für die Aktivitäten gilt:

$$A_{\text{Mu}}(t) = \lambda_{\text{Mu}} \cdot N_{\text{Mu}}(t)$$

$$A_{T_0}(t) = \lambda_{T_0} \cdot N_{T_0}(t)$$



**Abbildung 2.8: Aktivitätsverlauf der einzelnen Nuklide (Beachten Sie die 3 Varianten der Tochtersubstanz)**

Die **Aktivität der Mutterkerne nimmt mit der Zeit exponentiell ab**.

**Töchter**, die **wesentlich länger leben** als die Mutter, sind lange nach dem Abklingen der Muttersubstanz noch aktiv.

Ist die **Tochter** jedoch wesentlich **kurzlebiger** als die Mutter, zerfällt sie nach ihrer Entstehung gleich wieder. Beachten Sie die Graphik: Schon kurz nach der

Aufbauphase nähert sich die Aktivität der kurzlebigen Tochter der Aktivität der Mutter. Bald danach sind **beide Aktivitäten gleich**. Mutter und Tochter sind im **radioaktiven Gleichgewicht**.

Dieses **Gleichgewicht** kann sich auch **über mehrere Glieder einer Zerfallsreihe** erstrecken. Die Bedingung dazu lautet: Ein Glied der Zerfallsreihe ist bedeutend langlebiger als alle Folgeglieder. Dieses Glied wird zur dominanten Mutter. Die **Aktivitäten** der Folgesubstanzen sind dann **praktisch gleich der Aktivität dieser langlebigen Muttersubstanz**.

*Ergänzender Literaturhinweis:*

*Ein schönes Modell zum radioaktiven Gleichgewicht finden Sie in: Gross, Berhag: „Atome, Kerne, Quanten“, Seite 115f, „Radioaktives Gleichgewicht“,*

**Aufgabe 2.15**

Sr-90 ist ein im Schulunterricht öfters verwendeter  $\beta^-$ -Strahler. Die Aktivitäten dieser Schulproben sind doppelt so gross, als nach der Anzahl Sr-90 Nukliden zu erwarten wäre. Die Beziehung  $A(t) = \lambda \cdot N(t)$  scheint verletzt zu sein. Wie lässt sich dieses Phänomen erklären? Falls in Ihrer Klasse keine vollständige Nuklidkarte vorhanden ist, arbeiten Sie mit dem folgenden Ausschnitt.

|                       |                                     |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Zr 90</b><br>51.5% | <b>Zr 91</b><br>11.3%               | <b>Zr 92</b><br>17.2%               |
| <b>Y 89</b><br>100%   | <b>Y 90</b><br>64.1 h<br>$\beta^-$  | <b>Y 91</b><br>58.5 d<br>$\beta^-$  |
| <b>Sr 88</b><br>82.6% | <b>Sr 89</b><br>50.5 d<br>$\beta^-$ | <b>Sr 90</b><br>28.5 a<br>$\beta^-$ |

**Aufgabe 2.15**

Sr-90 zerfällt in Y-90. Die Halbwertszeit von Sr-90 beträgt 28.5 Jahre, die von Y-90 lediglich 64 Stunden.

Sr-90 und Y-90 sind im Gleichgewicht. Beide Aktivitäten sind also gleich.

Die Aktivität dieser Schulproben ist doppelt so gross, als erwartet. Denn zu jedem Zerfall des Sr-90 gehört auch ein Zerfall von Y-90.



### 3. Messung ionisierender Strahlung und Dosimetrie

#### Übersicht

Nach dem Reaktorunglück in Tschernobyl im Jahre 1986 wurde immer wieder gemeldet, dass Lebensmittel wie Fleisch, Milch oder Gemüse radioaktiv verstrahlt seien. Können Sie feststellen, wie stark Nahrungsmittel, zum Beispiel Beeren in Ihrem Garten, radioaktiv strahlen? Keiner Ihrer Sinne vermag die Radioaktivität wahrzunehmen. Es ist also ein geeignetes Messgerät erforderlich! Glücklicherweise ist schon 1928 von Hans Geiger und Walter Müller ein Strahlenmessgerät entwickelt worden. Im ersten Teil dieses Kapitels werden Sie diese Erfindung genauer kennenlernen und damit einige Experimente durchführen. Solche Messungen liefern allein zu wenig Information, um die Auswirkung radioaktiver Strahlung auf die Gesundheit beurteilen zu können. Dazu hat man Begriffe wie Energiedosis, Dosisleistung, Äquivalentdosis und effektive Äquivalentdosis eingeführt. Was hinter diesen physikalischen Grössen steckt, erfahren Sie im zweiten Teil dieses Kapitels.

#### Vorgehen

Lesen Sie zuerst die Lernziele durch. Sie sollen dabei erfahren, was auf Sie zukommt. Danach beginnen Sie mit der Durcharbeitung des Stoffs. Zur Auflockerung werden Sie zwei Experimente durchführen. Ausserdem werden Sie zur Abwechslung einen Text aus der Bibliothek lesen. Die Aufgaben sollen Ihnen helfen, das Gelesene zu vertiefen und das Verständnis zu fördern. Die Antworten finden Sie, wie gewohnt, am Schluss dieses Kapitels. Wenn Sie sich sicher fühlen und die Aufgaben der Lernkontrolle dieses Kapitels richtig gelöst haben, melden Sie sich zum Kapiteltest.

#### Lernziele

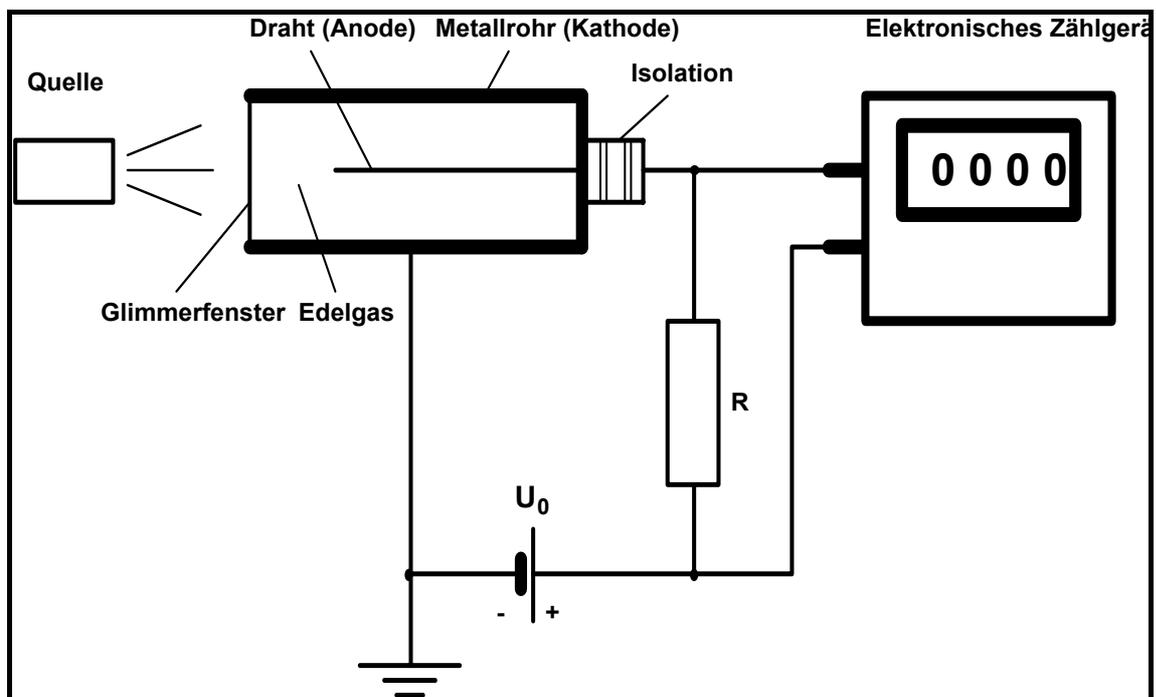
1. Sie wissen, wie ein Geiger-Müller-Zählrohr funktioniert, und wie man damit Messungen durchführt.
2. Sie wissen, wie die radioaktiven Strahlen mit der Materie wechselwirken.
3. Sie kennen die einzelnen Dosisbegriffe und können diese genau unterscheiden.

## 3.1 Das Geiger-Müller-Zählrohr

### 3.1.1 Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohres

Der Mensch besitzt kein Sinnesorgan, das ihm erlaubt, ionisierende Strahlung wahrzunehmen. Er kann sie nicht wie Licht sehen oder wie Wärmestrahlung direkt auf der Haut spüren. Um  $\alpha$  -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen nachzuweisen, müssen also Messapparaturen konstruiert werden. **Das Geiger-Müller-Zählrohr ist ein solches Messgerät.** Es wurde im Jahre 1928 vom deutschen Physiker Hans Geiger und seinem damaligen Doktoranden Walter Müller entwickelt.

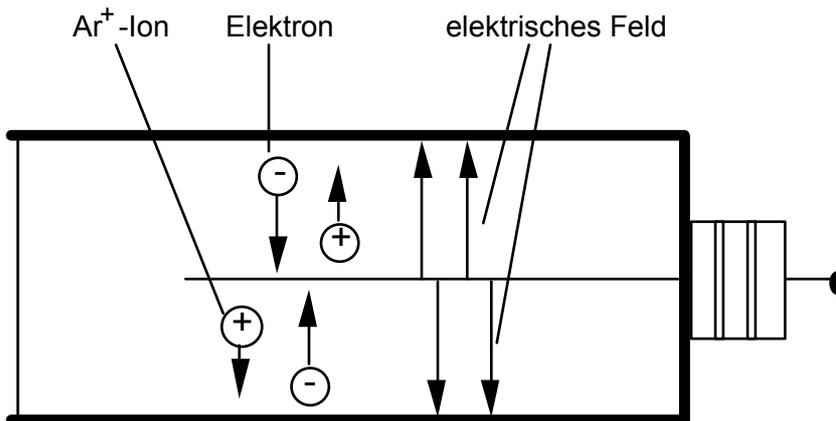
Im folgenden wird der Aufbau und die Funktionsweise dieses Zählrohres genauer betrachtet. Die Funktionsweise wird für  $\alpha$  - und  $\beta$ -Strahlen ausführlich erklärt. Bei der  $\gamma$ -Strahlung handelt es sich nicht wie bei der  $\alpha$  - und  $\beta$ -Strahlung um Teilchen, sondern um sogenannte  $\gamma$ -Quanten. Im Rahmen dieses Leitprogrammes werden die  $\gamma$  -Quanten nicht genauer behandelt. Kompliziertere physikalische Effekte, die an dieser Stelle nicht erklärt werden können, führen aber auch bei der  $\gamma$  -Strahlung zu denselben Ergebnissen.



**Abbildung 3.1: Schaltung eines Geiger-Müller-Zählrohres**

Das Geiger-Müller-Zählrohr (siehe Abbildung 3.1) besteht aus einem zylindrischen Metallrohr. In der Achse dieses Metallrohrs ist ein dünner Metalldraht mit einem Durchmesser von ca. 0.1 mm isoliert aufgespannt. Zwischen diesen Draht und die Rohrwand legt man eine Spannung  $U_0$  von einigen hundert Volt an. Dabei ist der Draht die positive und die Metallwand die negative Elektrode. In diesem Stromkreis befindet sich ein hochohmiger Widerstand  $R$  der Größenordnung  $10^9$  Ohm.

Das Zählrohr ist mit einem Edelgas bei einem Druck von etwa 100 mbar gefüllt. Meist handelt es sich beim verwendeten Edelgas um Argon. Am einen Ende des Metallrohres befindet sich ein sehr dünnes Fenster aus Glimmer. Vor das Glimmerfenster wird eine radioaktive Quelle gebracht. Die Teilchen der radioaktiven Strahlung gelangen durch das Glimmerfenster ins Zählrohr. Dort werden von jedem einzelnen Teilchen einige Ar-Atome ionisiert. Die entstandenen positiven  $\text{Ar}^+$ -Ionen werden im elektrischen Feld zur Metallwand hin beschleunigt. Im Gegensatz dazu werden die negativ geladenen, freien Elektronen zum Draht hin gezogen (siehe Abbildung 3.2).



**Abbildung 3.2: Ionenbewegung**

Haben die Ionen die Elektroden erreicht, fließt ein Strom. Dieser Strom wird **Ionisationsstrom** genannt. Wegen des Ohmschen Gesetzes fällt nun am Widerstand  $R$  eine Spannung ab. Sind alle  $\text{Ar}^+$ -Ionen an der Kathode neutralisiert und alle Elektronen von der Anode aufgenommen worden, bricht der Strom wieder zusammen. Wenn aber kein Strom mehr fließt, kann auch am Widerstand  $R$  kein Spannungsabfall mehr gemessen werden. Das Ergebnis ist ein Spannungsschuss. Man kann also **pro Teilchen oder pro  $\gamma$ -Quant** der einfallenden Strahlung **einen Spannungsschuss** erhalten. Ein solcher Spannungsschuss kann mit einem elektronischen Zählgerät registriert werden. Das Zählgerät liefert also die Anzahl Teilchen und/oder  $\gamma$ -Quanten, welche während der Messung registriert wurden. Das führt auf die Definition der **Zählrate  $Z$** .

### Definition 3.1

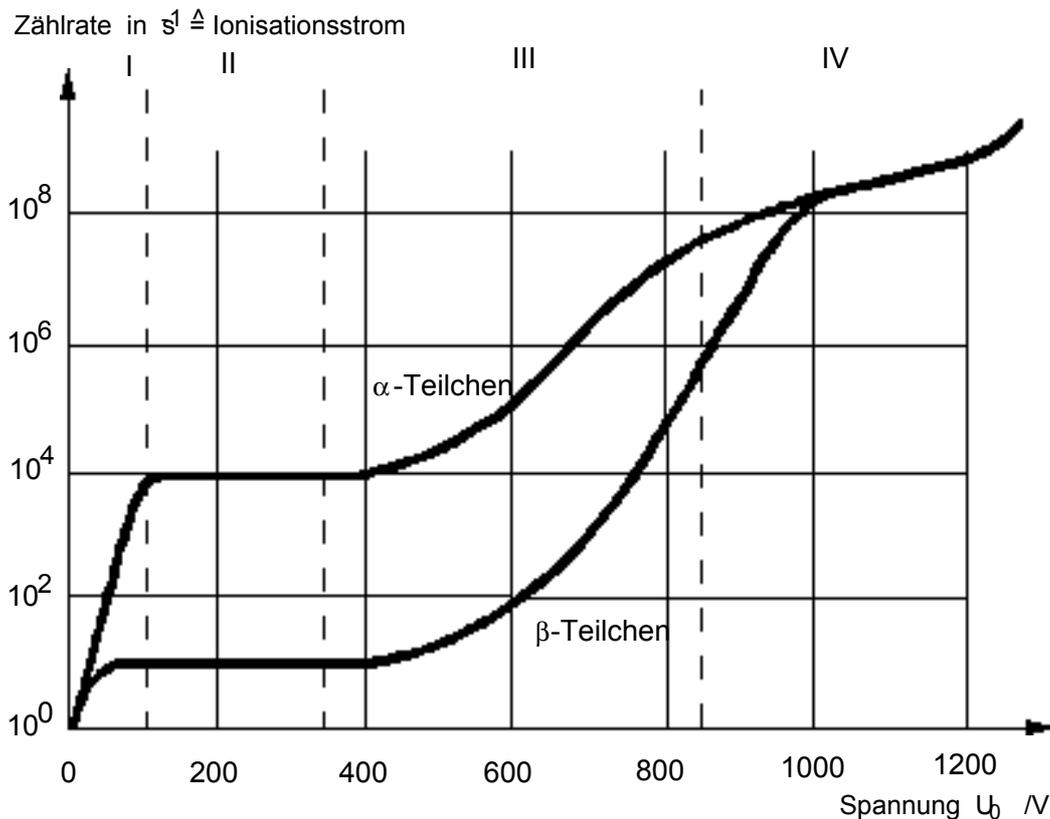
**Zählrate  $Z$**  = Anzahl registrierter Teilchen und/oder  $\gamma$ -Quanten pro Zeiteinheit.

Die Einheit der Zählrate ist  $1/\text{s}$ . Beachten Sie, dass die Zählrate nicht notwendigerweise gleich der Anzahl der pro Zeiteinheit einfallenden Teilchen ist. Die Zählrate ist das, was der Geiger-Müller-Zähler misst! In Abschnitt 3.1.3 „Probleme beim Messen,“ folgt eine Erklärung für diesen Sachverhalt. **Mit dem Geiger-Müller-Zählrohr kann man also die Zählrate bestimmen und damit die Teilchen und/oder  $\gamma$ -Quanten der radioaktiven Strahlung zählen.**

### 3.1.2 Zählrohrcharakteristik

Will man mit dem Geiger-Müller-Zählrohr eine Messung durchführen, stellt sich die Frage, wie hoch die Zählrohrspannung  $U_0$  gewählt werden muss. Wird die Spannung  $U_0$  von Null Volt ausgehend schrittweise erhöht, so ändert sich der Ionisationsstrom  $I$ . Die Abhängigkeit des Ionisationsstroms von der angelegten Spannung  $U_0$  ist in der Abbildung 3.3 dargestellt. Die Kurve  $I(U_0)$  nennt man Kennlinie des Zählrohres oder **Zählrohrcharakteristik**.

Man kann die Kennlinie in verschiedene Bereiche aufteilen, die im folgenden genauer betrachtet werden.



**Abbildung 3.3: Zählrohrcharakteristik; Beachten Sie insbesondere die logarithmische Skaleneinteilung der Ordinate! (Kuhn 1976, 43)**

Im Bereich I (**Rekombinationsbereich**) ist die angelegte Spannung  $U_0$  sehr klein. Damit herrscht zwischen den Elektroden ebenfalls ein sehr kleines elektrisches Feld. Die Ionen werden also nicht sehr stark beschleunigt. Daher kann es geschehen, dass sich einige  $Ar^+$ -Ionen wieder mit Elektronen zu neutralen Ar-Atomen vereinigen. Dieser Prozess wird **Rekombination** genannt. Wegen der Rekombination gelangen nicht alle Ionen zu den Elektroden. Es fließt ein geringer Strom. Erhöht man die angelegte Spannung, werden die Ionen durch das grössere elektrische Feld stärker beschleunigt. Der Impuls der Ionen nimmt zu. Da die Ionen und Elektronen zu fest aufeinander prallen, wird eine Rekombination unwahrscheinlicher. Also gelangen bei Erhöhung der angelegten Spannung  $U_0$  mehr Ionen zu den Elektroden. Der Strom steigt.

Im Bereich II (**Sättigungsbereich**) tritt wegen des noch grösseren elektrischen Feldes keine Rekombination mehr auf. Somit gelangen fast alle Ionen zu den Elektroden. Es fliesst ein nahezu konstanter Strom, der **Sättigungsstrom** genannt wird. Dieser Sättigungsstrom hängt von der Energie der einfallenden Strahlung ab. Zum Beispiel besitzt ein  $\alpha$ -Teilchen im allgemeinen mehr Energie als ein  $\beta$ -Teilchen. Ein energiereicheres Teilchen ionisiert aber eine grössere Anzahl Ar-Atome. Deshalb erzeugt ein  $\alpha$ -Teilchen mehr Ionen und Elektronen als ein  $\beta$ -Teilchen. Der Sättigungsstrom für  $\alpha$ -Teilchen ist also grösser als der Sättigungsstrom der  $\beta$ -Teilchen.

Das Anwachsen des Stromes im Bereich III (**Proportionalitätsbereich**) beruht auf der Erzeugung weiterer Ladung durch **Stossionisation**. Hierfür sind im wesentlichen die bei der Ionisation erzeugten Elektronen verantwortlich. In der Nähe des Anodendrahtes werden die Elektronen so stark beschleunigt, dass ihre Energie zur Ionisation weiterer Gasatome ausreicht. Diese weitere Ionisation wird als **Sekundärionisation** bezeichnet. Analog heisst die Ionisation durch die ionisierende Strahlung **Primärionisation**. Die Anzahl der durch Sekundärionisation erzeugten Ionen ist nun proportional zur Anzahl der primär erzeugten Ionen. Wird eine höhere Spannung  $U_0$  angelegt, erfahren die Ionen eine grössere Beschleunigung und werden zu immer mehr Sekundärionisationen führen. Der Strom steigt. Wie bereits weiter oben erwähnt, ist die Primärionisation von der Energie der einfallenden Strahlung abhängig.

Mit einem in Bereich II oder III betriebenen Zählrohr kann also die Energie der einfallenden Teilchen bestimmt werden.

Im Bereich IV (**Auslösebereich**) herrscht ein sehr starkes elektrisches Feld. Die Ionen werden sehr stark beschleunigt, und es finden sehr viele Sekundärionisationen statt. Die Anzahl der Sekundärionisationen ist so gross, dass es keine Rolle spielt, ob bei der Primärionisation einige Ionen mehr oder weniger entstehen. Das bedeutet, dass in diesem Bereich eine Messung unabhängig von der Energie der einfallenden Strahlung stattfindet. In Abbildung 3.3 nähern sich die Kurven für die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Strahlung einander an.

Im Bereich IV registriert das Zählrohr die Anzahl der einfallenden Teilchen und/oder  $\gamma$ -Quanten unabhängig von deren Energie. Dieser Bereich ist der eigentliche **Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohres**.

### Aufgabe 3.1

Bilden Sie Zweiergruppen und erzählen Sie sich gegenseitig den Aufbau und die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohres. Wenn Sie dabei auf Unklarheiten stossen, dann lesen Sie die entsprechenden Stellen im Leitprogramm nochmals durch. Verwenden Sie dafür höchstens 10 Minuten!

### 3.1.3 Probleme beim Messen

Will man nun mittels des Geiger-Müller-Zählrohres eine radioaktive Quelle ausmessen, müssen folgende Fehlerquellen beachtet werden:

#### Null-Effekt

Die Untergrundstrahlung liefert bei jeder Messung einen Beitrag. Dieser Effekt wirkt sich also durch einen zu grossen Wert der Zählrate aus.

#### Totzeit

Nach jeder Entladung bleibt das Zählrohr gegen neu eintretende Strahlung für eine gewisse Zeit unempfindlich. Eine Erklärung ergibt sich beim Betrachten der auftretenden Ionen. Die positiven  $\text{Ar}^+$ -Ionen bewegen sich wegen ihrer grösseren Masse viel langsamer im elektrischen Feld als die Elektronen. Somit bildet sich nach einer Entladung eine positive Raumladungszone um den Draht. Dadurch wird die Feldstärke verringert. Erst wenn die positiven Ionen zur Kathode abgewandert sind, können weitere Teilchen registriert werden. Diese Abwanderungszeit bezeichnet man als Totzeit. Sie liegt in der Grössenordnung von  $10^{-4}$  Sekunden. Wegen der Totzeit kann nur ein Bruchteil der Zerfälle registriert werden.

#### Ansprechwahrscheinlichkeit A

Bei der Messung der Zählrate mit dem Geiger-Müller-Zählrohr werden nicht alle einfallenden  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen registriert. Dies hängt neben der Totzeit und der Rekombination hauptsächlich von der einfallenden Strahlungsart ab. Ein Mass dafür, wie viele Teilchen gezählt werden, ist die **Ansprechwahrscheinlichkeit A**.

#### Definition 3.2

Die **Ansprechwahrscheinlichkeit A** für  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen ist wie folgt definiert:

$$A = \frac{\text{Anzahl der vom Zählrohr registrierten Teilchen}}{\text{Anzahl der ins Zählrohr einfallenden Teilchen}}$$

Für die  $\gamma$ -Strahlung kann die Ansprechwahrscheinlichkeit A analog definiert werden:

#### Definition 3.3

Die **Ansprechwahrscheinlichkeit A** für  $\gamma$ -Strahlen ist

$$A = \frac{\text{Anzahl der vom Zählrohr registrierten } \gamma\text{-Quanten}}{\text{Anzahl der ins Zählrohr einfallenden } \gamma\text{-Quanten}}$$

#### Beispiel 3.1

1. Strontium-90 (Sr-90) sendet  $\beta$ -Strahlen der maximalen Energie 0.55 MeV aus. Die Ansprechwahrscheinlichkeit A beträgt ungefähr 0.46, d. h. von 100 einfallenden Teilchen werden im Mittel 46 Teilchen registriert.

2. Cäsium-137 (Cs-137) sendet  $\gamma$ -Strahlen der Energie 0.66 MeV aus und die Ansprechwahrscheinlichkeit A beträgt ungefähr  $0.4 \cdot 10^{-2}$ .
3. Cobalt-60 (Co-60) sendet  $\gamma$ -Strahlen der Energie 1.17/1.33 MeV aus. Die Ansprechwahrscheinlichkeit A beträgt ungefähr  $1.7 \cdot 10^{-2}$ .
4. Für  $\gamma$ -Strahlen höherer Energie ist die Ansprechwahrscheinlichkeit grösser. Bei Energien von 25 MeV kann sie bis zu 0.2 betragen.

### Aufgabe 3.2

Bestimmen Sie aus der Totzeit des Geiger-Müller-Zählrohres die maximale Zählrate.

#### 3.1.4 Anleitung zu den Experimenten

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden Experimente mit dem Geiger-Müller-Zählrohr durchgeführt.

Zunächst soll die ionisierende Strahlung hörbar gemacht werden. Später wird in einem weiteren Experiment die Absorption radioaktiver Strahlung in Materie untersucht.

Für jedes dieser Experimente müssen Sie folgende **Hinweise** berücksichtigen:

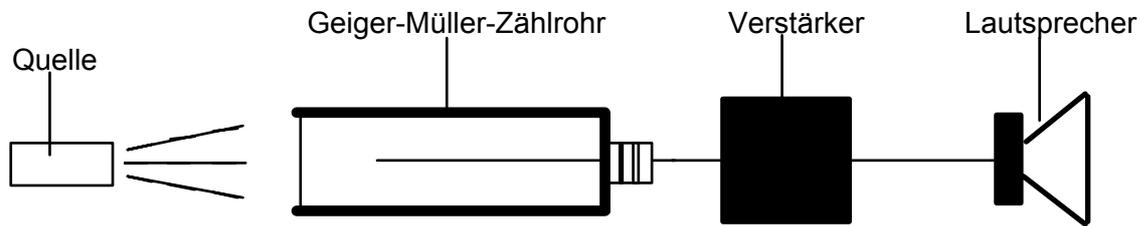
- a) Lesen Sie die Beschreibung des jeweiligen Experimentes **vollständig** durch, bevor Sie mit der Durchführung beginnen.
- b) Die Physiklehrerin oder der Physiklehrer hat im Labor die Versuchsanordnungen bereits vorbereitet. Sie müssen also nur noch geringfügige Veränderungen vornehmen.
- c) Bei der Versuchsdurchführung ist folgendes zu beachten:
  - Das Geiger-Müller-Zählrohr wird im Auslösebereich betrieben.
  - Während der Messung muss die Schutzkappe des Zählrohres entfernt werden.
  - Das Glimmerfenster ist sehr dünn und damit äusserst leicht zerstörbar. **Es darf also nicht berührt werden.**
  - Die für die Messung benötigten radioaktiven Präparate befinden sich in einem speziellen Aufbewahrungsbehälter. Nach Beendigung der einzelnen Experimente **muss** die Quelle wieder in diesen Aufbewahrungsbehälter zurückgelegt werden.
- d) Am Ende dieses Kapitels finden Sie die Ergebnisse zu den Experimenten.

#### Experiment 3.1

In diesem Experiment werden Sie die ionisierende Strahlung hörbar machen. Hierzu wird das elektronische Zählgerät durch einen Lautsprecher mit vorgeschaltetem Verstärker ersetzt. Somit ergibt jeder Spannungsschuss ein Knackgeräusch.

### Versuchsaufbau

Machen Sie sich mit Hilfe der unten angegebenen Figur (siehe Abbildung 3.4) den Versuchsaufbau klar. Sie sollten die einzelnen Elemente der Figur im Versuchsaufbau erkennen können.



**Abbildung 3.4: Versuchsanordnung für das Experiment 1; zur Vereinfachung wurde auf die Darstellung des Stromkreises verzichtet.**

### Versuchsdurchführung

- 1. Teil:** Betreiben Sie das Zählrohr ohne radioaktives Präparat. Was hören Sie?
- 2. Teil:** Für diesen Teil des Versuches wird eine radioaktive Quelle verwendet. Nehmen Sie das Präparat aus dem Aufbewahrungsbehälter, und nähern Sie dieses sehr langsam dem Zählrohr. Was passiert?

### Aufgabe 3.3

Suchen Sie eine mögliche Erklärung für die Beobachtung im Teil 1 des Experimentes.

### Aufgabe 3.4

Notieren Sie in Stichworten die von Ihnen gemachten Beobachtungen im Teil 2 der Versuchsdurchführung. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus?

### 3.1.5 Reichweite und Halbwertsdicke

Was geschieht, wenn ionisierende Strahlung auf ein Material wie zum Beispiel Wasser oder Blei trifft?

Treten  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen in Materie ein, so kommt es zu Zusammenstößen mit den Atomen der Materie. Dabei können Atome der Materie sogar ionisiert werden. Bei jeder Ionisation und bei jedem Stoss nimmt die Energie der  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen ab. Sie werden also abgebremst. Die  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen dringen somit in ein bestimmtes Material und kommen je nach ihrer Energie in verschiedenen Tiefen zum Stillstand. Diese Eindringtiefe nennt man **Reichweite**. Die Reichweite ist nicht allein von der Energie der Teilchen abhängig. Hauptsächlich wird die Reichweite durch die Stoss- und Ionisationshäufigkeit beeinflusst. Wie häufig ein Stoss oder eine Ionisation vorkommt, wird massgeblich durch die Grösse der Atome und die Dichte des Materials bestimmt. Je grösser die Atome der Materie sind und je dichter das Material ist, desto häufiger findet ein Stoss oder eine Ionisation statt. Mit steigender Stoss- oder Ionisationshäufigkeit nimmt die Reichweite ab. Die Reichweite ist also materialabhängig.

#### Definition 3.4

Die durchschnittliche Eindringtiefe von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen in ein bestimmtes Material A heisst **Reichweite R von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen in A**.

#### Aufgabe 3.5

Betrachtet man  $\alpha$ -Teilchen der Energie 4 MeV und  $\beta$ -Teilchen der Energie 2 MeV, so beträgt die Reichweite dieser  $\alpha$ -Teilchen in Luft 2.5 cm und die der  $\beta$ -Teilchen 71.0 cm. Erstaunt Sie das? Können Sie eine Erklärung dafür finden?

Die Wechselwirkung der  $\gamma$ -Strahlung mit der Materie ist sehr viel schwächer als die der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung. Deshalb kann die  $\gamma$ -Strahlung Materie leichter durchdringen. Die  $\gamma$ -Strahlung kann von der Materie in der Regel nicht vollständig absorbiert, sondern nur abgeschwächt werden. Es ist also nicht sinnvoll, von einer Reichweite zu sprechen. Statt dessen definiert man die sogenannte **Halbwertsdicke  $d_{1/2}$**  eines Materials.

#### Definition 3.5

$\gamma$ -Strahlung mit der Zählrate  $Z_e$  trifft auf ein Material A. Die Strecke, nach der die Zählrate auf die Hälfte gesunken ist, nennt man **Halbwertsdicke  $d_{1/2}$  des Materials A**.

#### Aufgabe 3.6

Ein  $\gamma$ -Strahl ( $\gamma$ -Quanten) tritt in ein Material der Dicke  $x$  ein. Wenn kein Material ( $x=0$ ) da ist, misst man mit einem geeigneten Zählrohr die Zählrate (Anzahl Impulse/s)  $Z_e = Z(0)$ . Was messen Sie wohl, wenn der  $\gamma$ -Strahl das Material der Dicke  $x$  durchquert hat?

Je dicker ein Material ist, um so kleiner ist die Zählrate, d. h. um so weniger  $\gamma$ -Quanten werden vom Zählrohr gemessen. Das Experiment zeigt, dass die Abnahme der Zählrate pro Weglänge  $dx$  direkt proportional zur Zählrate ist:

$$\frac{dZ(x)}{dx} = -c \cdot Z(x)$$

Ein gleiches Problem haben Sie bereits im Kapitel 2 kennen gelernt (Aktivität...). Benutzen Sie Ihre Kenntnisse aus jenem Kapitel, um folgende Aufgaben zu lösen:

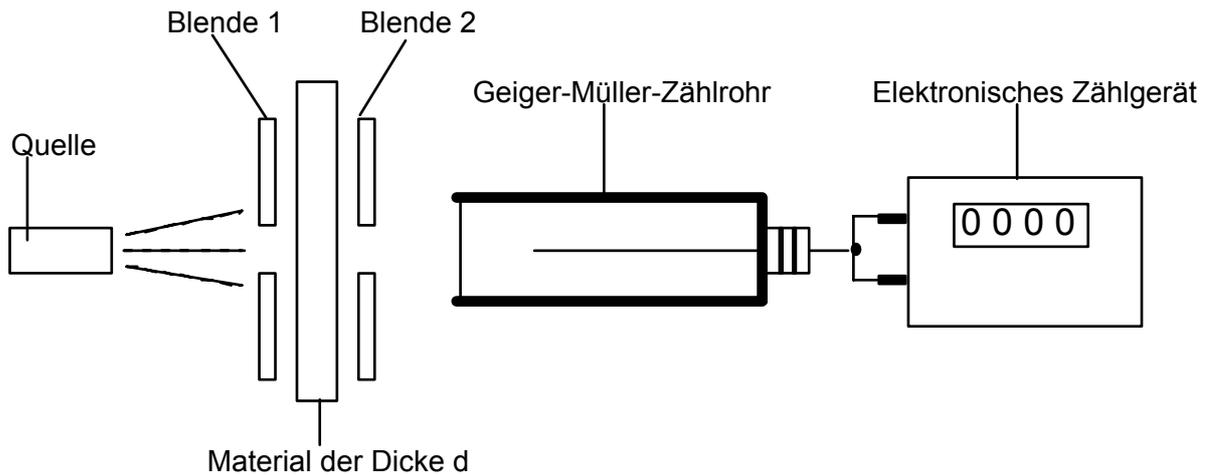
- Bestimmen Sie die Gleichung für  $Z(x)$ .
- Bestimmen Sie die Konstante  $c$  für eine bekannte Halbwertsdicke  $d_{1/2}$ . (Hinweis: Denken Sie an den Zusammenhang von Zerfallswahrscheinlichkeit und Halbwertszeit).

### Experiment 3.2

In diesem Experiment wird untersucht, wie die  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Strahlen mit verschiedenen Materialien abgeschirmt werden können. Diese Messungen werden besonders wichtig, wenn die Frage von Strahlenschutz und Strahlengefahr behandelt wird. Im Kapitel 4 wird dieses Problem noch einmal aufgegriffen. Bevor Sie mit dem Experiment beginnen, lesen Sie nochmals den Abschnitt 3.1.4 dieses Kapitels „Anleitung zu den Experimenten,,“.

### Versuchsaufbau

Betrachten Sie die in Abbildung 3.5 dargestellte Versuchsanordnung. Die einfallende Strahlung wird durch eine Blende 1 gebündelt und fällt senkrecht auf eine Materieschicht der Dicke  $d$  ein. Ein Teil der Strahlung wird aus der einfallenden Strahlenrichtung abgelenkt und mit Blende 2 abgefangen. Ein anderer Teil wird vom Material absorbiert. Somit gelangt nicht die gesamte einfallende Strahlung ins Zählrohr. Mit dem Zählrohr misst man die Zählrate  $Z$ . Als Abschirmmaterialien werden Luft, Papier, Aluminium und Blei benutzt.



**Abbildung 3.5: Versuchsanordnung für das Experiment 3.2**

### Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung gliedert sich in zwei Teile. In jedem Teil wird das Absorptionsverhalten einer Strahlungsart behandelt. Die Physiklehrerin oder der Physiklehrer hat Materialproben von Papier, Aluminiumplättchen und Bleiplättchen vorbereitet.

Mit einem Geiger-Müller-Zählrohr wird die Zählrate gemessen. Das Messergebnis wird durch den Null-Effekt verfälscht. Überlegen Sie sich, wie man diesen Fehler im Messergebnis korrigieren könnte! Verwenden Sie diese Korrektur bei den quantitativen Messungen in diesem Experiment.

#### Teil 1: $\alpha$ -Strahlung

- Nähern Sie dem Geiger-Müller-Zählrohr langsam eine  $\alpha$ -Quelle. Bestimmen Sie auf diese Art qualitativ die ungefähre Reichweite der  $\alpha$ -Strahlung in Luft.
- Die Position der  $\alpha$ -Quelle bleibt nun unverändert. Fixieren Sie der Reihe nach die verschiedenen Materialien zwischen den beiden Blenden, und beobachten Sie das Verhalten der Zählrate. Was geschieht? Wundert Sie das?

#### Teil 2: $\gamma$ -Strahlung

Für diesen Teil müssen Sie eine  $\gamma$ -Quelle verwenden.

Wiederum ist die Abschwächung durch verschiedene Materialien qualitativ zu beobachten. Verfahren Sie hierzu analog zu Teil 1.

In einer weiteren quantitativen Messung sollen Sie die Halbwertsdicke der  $\gamma$ -Strahlung bestimmen. Befestigen Sie hierzu nacheinander die bereitgelegten Bleiplättchen zwischen den beiden Blenden. Für verschieden dicke Bleischichten ist die Zählrate zu bestimmen. Messen Sie die jeweilige Dicke der Bleischicht und tragen Sie diese in die Tabelle 3.1 ein. Die Messzeit soll jeweils eine Minute betragen. Die Messwerte sollen in einer Wertetabelle (siehe Tabelle 3.1) festgehalten und dann in einem Diagramm aufgetragen werden (siehe Abbildung 3.6). Bestimmen Sie mit Hilfe dieses Diagramms die Halbwertsdicke der

$\gamma$ -Strahlung in Blei. Warum wird bei der Ordinate der Logarithmus der Zählrate aufgetragen?

| Anzahl der Bleiplättchen | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------|---|---|---|---|---|
| Dicke der Bleischicht    |   |   |   |   |   |
| gemessene Zählrate $Z_g$ |   |   |   |   |   |
| korrigierte Zählrate $Z$ |   |   |   |   |   |

Tabelle 3.1: Wertetabelle

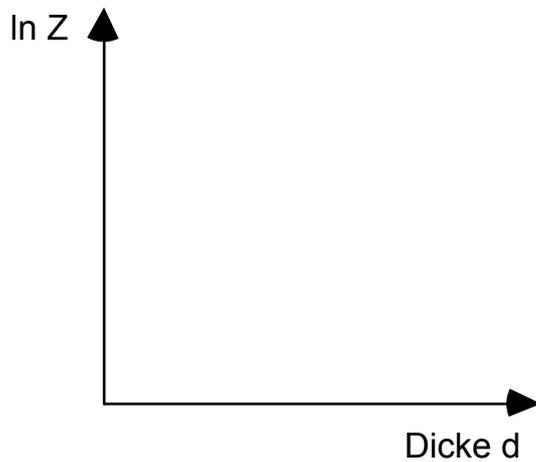
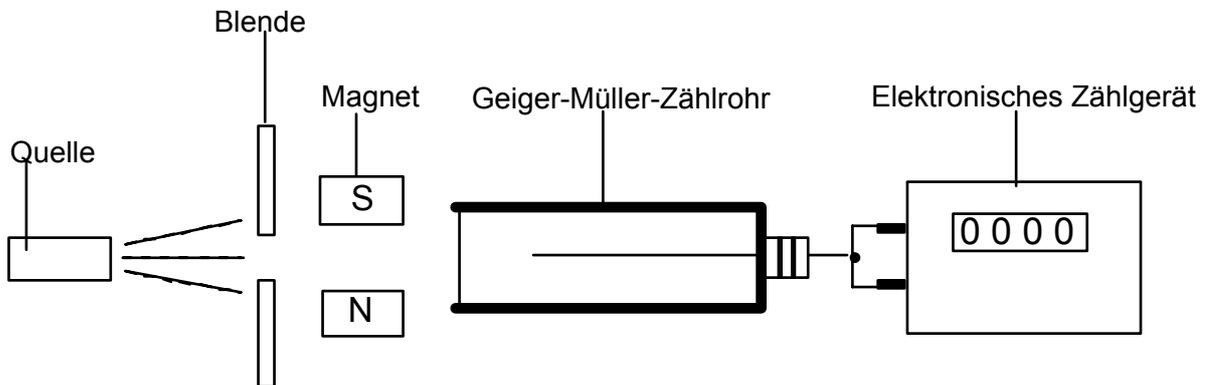


Abbildung 3.6: Diagramm

## Lernaufgabe

### Wirkung eines Magnetfeldes auf $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlung

Kann ein Magnetfeld ionisierende Strahlung beeinflussen? Diese Frage sollen Sie mit dieser Lernaufgabe beantworten. Abbildung 3.7 zeigt einen möglichen Versuchsaufbau, um diese Frage experimentell zu klären. Dabei sind Quelle, Blende und Magnet fest, das Zählrohr jedoch ist auslenkbar.



**Abbildung 3.7: Eine mögliche Versuchsanordnung. Quelle, Blende und Magnet sind fest, das Zählrohr auslenkbar.**

Mit Ihrem Wissen über ionisierende Strahlung können Sie aber die Frage auch ohne Experiment beantworten. Versuchen Sie's!

- a) Das Zählrohr sei in einer Linie mit der übrigen Anordnung ausgerichtet. Misst man eine unterschiedliche Zählrate mit und ohne Magnetfeld, falls die Quelle
  - $\beta$ -Strahlung
  - $\gamma$ -Strahlung
 aussendet?
- b) Nun sei das Zählrohr z. B.  $20^\circ$  ausgelenkt und das Magnetfeld eingeschaltet. Misst man eine höhere oder tiefere Zählrate als wenn das Zählrohr in der Null-Position ist? Behandeln Sie die Frage für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung.
- c) Welche Faktoren bestimmen die Stärke der Ablenkung? Stellen Sie mindestens zwei Vermutungen auf.

Einen Lösungsvorschlag für diese Aufgaben finden Sie auf der nächsten Seite.

### Lösungsvorschlag

a)  $\beta$ -Strahlung ist geladen (Ladung entweder  $-e$  oder  $+e$  für Elektronen bzw. Positronen). Da sich die Elektronen bzw. Positronen bewegen, verspüren sie in einem Magnetfeld die Lorentz-Kraft. Folglich ist eine Änderung der gemessenen Zählrate zu erwarten.

Ganz anders sieht es aus für  $\gamma$ -Strahlung. Sie ist elektrisch neutral und wird daher vom Magnetfeld nicht beeinflusst.

b) Wegen a) muss nur die  $\beta$ -Strahlung betrachtet werden.

Ist das Magnetfeld so, dass die  $\beta$ -Strahlung in Richtung des ausgelenkten Zählrohrs abgelenkt wird, kann man bei  $20^\circ$  eine höhere Zählrate als in der Null-Lage messen. Im Extremfall wird in der Null-Lage kaum noch eine Zählrate gemessen werden können!

c) Grosses Magnetfeld, grosse Ladung bewirken eine starke Ablenkung.

Grosse Energie oder grosse Masse wirken der Ablenkung entgegen.

Zusammenfassend ergeben sich für die Absorption der drei Strahlungsarten durch unterschiedliche Materialien folgende Grössenordnungen:

| Strahlenart         |                | Luft   | Wasser   | feste Materie     |
|---------------------|----------------|--------|----------|-------------------|
| $\alpha$ -Strahlung | Reichweite     | <0.1 m | <0.01 mm | <sup>a</sup> 0 cm |
| $\beta$ -Strahlung  | Reichweite     | <10 m  | <2 cm    | <10 mm            |
| $\gamma$ -Strahlung | Halbwertsdicke | 100 m  | 10 cm    | 3 cm              |

**Tabelle 3.2: Grössenordnungen der Reichweite und Halbwertsdicken (Niederer 1990, 5.2; Dorn-Bader 1989, 520f)**

## 3.2 Dosimetrie

In Abschnitt 3.1 dieses Kapitels haben wir ein Nachweisverfahren für radioaktive Strahlen kennengelernt. Des weiteren ist aus dem Kapitel 2 die Aktivität von strahlenden Substanzen bekannt. Für die meisten Strahlenwirkungen ist aber nicht die Aktivität ausschlaggebend. Wesentlich ist vielmehr die Wechselwirkung der Strahlung mit der Materie, die Art der Strahlung und die Reichweite. Die Gesamtwirkung einer Strahlung auf ein Massenelement wird **Strahlendosis** oder **Dosis** genannt. Die zu ihrer Messung entwickelten Verfahren werden als **Strahlungsdosimetrie** oder **Dosimetrie** bezeichnet.

### 3.2.1 Energiedosis

Die biologische Wirkung von ionisierenden Strahlen hängt von der Strahlenenergie ab, die von einer bestimmten Masse absorbiert wird. Daher definiert man die **Energiedosis** für ionisierende Strahlung wie folgt:

**Definition 3.6**

$$\text{Energiedosis } D = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse des bestrahlten Gewebes}}$$

$$D = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{dW}{dm}$$

Die Einheit der Energiedosis ist 1 Gray = 1 Gy = 1 J/kg. Sie wurde nach dem Briten Louis Gray benannt. Wenn Sie an der Biographie von Louis Gray interessiert sind, können Sie diese im Additum nachlesen.

**3.2.2 Dosisleistung**

Die pro Zeiteinheit absorbierte Energiedosis nennt man **Dosisleistung**. Die Dosisleistung stellt ein Mass für die Intensität der Strahlung dar, weil die Intensität der Quotient aus Leistung und Fläche ist.

**Definition 3.7**

$$\text{Dosisleistung } \dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Im folgenden ist **die Dosisleistung im Abstand r von einer punktförmigen radioaktiven  $\gamma$ -Quelle** zu bestimmen. Da die Halbwertsdicke von  $\gamma$ -Strahlen in Luft sehr gross ist, kann die Abschirmung durch die Luft vernachlässigt werden. Dies gilt nicht für  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen, denn ihre Reichweite in Luft ist relativ klein. Deshalb wird nur eine  $\gamma$ -Quelle betrachtet. Die  $\gamma$ -Strahlen breiten sich in allen Raumrichtungen gleichmässig aus. Daher nimmt die Intensität mit dem Faktor  $1/r^2$  ab. Nutzt man die Proportionalität zwischen der Dosisleistung und der Intensität aus, lautet die Formel für die Dosisleistung im Abstand r

$$\dot{D} = \frac{\Gamma \cdot A}{r^2},$$

wobei A die Aktivität der Quelle und  $\Gamma$  = Gammakonstante der Proportionalitätsfaktor ist, der in

$$\frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{Bq}}$$

angegeben wird.

Die folgende Tabelle enthält einige Werte für G.

| Quelle | $\Gamma$ in $\frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{Bq}}$ |
|--------|---|
| Co-60  | $3,5 \cdot 10^{-13}$  |
| I-131  | $5,9 \cdot 10^{-14}$  |
| Cs-137 | $8,4 \cdot 10^{-14}$  |

**Tabelle 3.3: Einige Werte für G (Niederer 1990, 5.5)**

### Beispiel 3.2

Eine Cobalt-60 Quelle mit einer Aktivität von  $3,7 \cdot 10^{15}$  Bq erzeugt in 5 Meter Abstand eine Dosisleistung von

$$\dot{D} = \frac{3,5 \cdot 10^{-13} \cdot 3,7 \cdot 10^{15}}{5^2} \frac{\text{Gy}}{\text{h}} = 51,8 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$$

### Aufgabe 3.7

Ein Gammastrahl habe in 10 m Abstand eine Zählrate von  $2,5 \cdot 10^6$  1/s. Dabei beträgt die Ansprechwahrscheinlichkeit des Geiger-Müller-Zählrohres 0.1. Anstelle des Zählrohres wird ein Probekörper der Masse 1 kg hingelegt. Berechnen Sie die Dosisleistung in diesem Körper unter der Annahme, dass jedes g-Quant im Körper 1 MeV Energie deponiert.

### 3.2.3 Äquivalentdosis

Für die Beurteilung der biologischen Wirkung müssen auch die unterschiedlichen Strahlungsarten berücksichtigt werden. So erzeugt zum Beispiel ein  $\alpha$ -Teilchen beim Durchqueren einer Zelle 10'000 bis 70'000 Ionen und freie Elektronen. Hingegen erzeugt ein  $\beta$ -Teilchen lediglich 10 bis 100 Ionen und freie Elektronen.

### Aufgabe 3.8

Nehmen Sie an,  $\alpha$ -Teilchen und  $\beta$ -Teilchen ergeben dieselbe Energiedosis in einem Gewebe. Was können Sie über die Anzahl der betroffenen Zellen aussagen?

### Literaturstudium

*Nun folgt ein Abschnitt, in dem die Handbibliothek benützt werden muss. Dazu besorgen Sie sich folgende Literatur: Martin Volkmer: Die natürliche Strahlenbelastung. Hamburg 1980, 3. Auflage (Leybold-Heraeus). Haben Sie die Literatur gefunden, so bearbeiten Sie Variante 1. Ist diese Literatur in der Bibliothek nicht vorhanden, fahren Sie im Leitprogramm mit der Variante 2 fort.*

### Variante 1

Lesen Sie in der oben angegebenen Literatur das Kapitel 2.5 „Die Äquivalentdosis,..“ Anschliessend fahren Sie mit dem Leitprogramm nach der Definition der Äquivalentdosis (Seite 69) fort.

### Variante 2

Um die biologische Wirkung ionisierender Strahlung verschiedener Art in demselben Gewebe vergleichen zu können, führt man einen **dimensionslosen Qualitätsfaktor Q** (neu nach ICRP 60 (1991) **Strahlenwichtungsfaktor**) ein. Dieser Faktor nimmt je nach Strahlung einen unterschiedlichen Wert an. Verursacht die Strahlung einen grossen biologischen Schaden, ist der Qualitätsfaktor gross. Ist hingegen der Schaden klein, ist auch der Faktor Q klein.

In folgender Tabelle sind einige Werte für den Q-Faktor angegeben.

| Strahlungsart                    | Q-Faktor |
|----------------------------------|----------|
| Röntgen- und $\gamma$ -Strahlung | 1        |
| $\beta$ -Strahlung               | 1        |
| Neutronenstrahlung               | 10       |
| $\alpha$ -Strahlung              | 20       |

**Tabelle 3.4: Einige Q-Faktoren (Dorn-Bader 1989, 527)**

Mit Hilfe dieses Qualitätsfaktors wird nun die **Äquivalentdosis** als Produkt von Q und der Energiedosis D definiert:

### Definition 3.8

$$\text{Äquivalentdosis } H = Q \cdot D$$

Zur Unterscheidung von der Energiedosis D hat man der Äquivalentdosis H die **Einheit 1 Sievert** = 1 Sv = 1 J/kg gegeben. Die Einheit der Äquivalentdosis geht auf den Schweden Rolf Sievert zurück. Wenn sie an der Biographie von Rolf Sievert interessiert sind, können sie diese ebenfalls im Additum nachlesen.

### Beispiel 3.3

Bei einer Röntgenuntersuchung (Q=1) der Lendenwirbelsäule ergibt sich eine mittlere Strahlendosis von 35 mGy. Dies entspricht einer Äquivalentdosis von 35 mSv. Bei Verwendung von  $\alpha$ -Strahlung derselben Energiedosis erhält man mit Q=20 aber eine Äquivalentdosis von 700 mSv=0.7 Sv.

### Aufgabe 3.9

In einem Forschungslabor wird eine Dosisleistung von 20 mGy/h gemessen. Dabei handelt es sich um ein Experiment mit Neutronenstrahlung. Nach wie vielen Stunden muss ein Forscher das Labor verlassen, wenn die Äquivalentdosis maximal 1 mSv betragen darf?

### 3.2.4 Effektive Äquivalentdosis

In der Äquivalentdosis wurden die Unterschiede der einzelnen Strahlungsarten berücksichtigt. Damit allein kann man jedoch noch nicht sagen, wie sich ionisierende Strahlung auf biologisches Gewebe auswirkt. Wird ein Mensch einer schwachen radioaktiven Strahlung ausgesetzt, so werden Gewebezellen mit unterschiedlichem Aufbau bestrahlt, zum Beispiel Leberzellen, Darmzellen, Zellen der Schilddrüse, usw. . Der unterschiedliche Aufbau der Zellen bedingt eine unterschiedliche Strahlungsempfindlichkeit. Dies wird bei der Definition der **effektiven Äquivalentdosis** berücksichtigt. Hierzu werden die Äquivalentdosen der einzelnen Organe mit einem Faktor  $w_i$  gewichtet. Die effektive Äquivalentdosis  $H_{\text{eff}}$  ergibt sich dann als Summe über die gewichteten Äquivalentdosen  $w_i \cdot H_i$ . Die Summe über alle Gewichtungsfaktoren  $w_i$  muss gleich 1 sein.

#### Definition 3.9

$$\text{Effektive Äquivalentdosis } H_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot H_i$$

$$\text{wobei } \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

$w_i$ =Gewichtungsfaktor des Organs  $i$   
 $H_i$ =Äquivalentdosis im Organ  $i$   
 Summiert wird über alle Organe.

In Tabelle 3.5 sind die wichtigsten Gewichtungsfaktoren angegeben.

| Organ/Gewebe      | Gewichtungsfaktor $w_i$ |
|-------------------|-------------------------|
| Gonaden           | 0.20                    |
| Brust             | 0.05                    |
| rotes Knochenmark | 0.12                    |
| Lunge             | 0.12                    |
| Schilddrüse       | 0.05                    |
| Knochenoberfläche | 0.01                    |
| Magen             | 0.12                    |
| Leber             | 0.05                    |
| Blase             | 0.05                    |
| Haut              | 0.01                    |
| Übrige            | 0.22                    |
| Summe             | 1.00                    |

**Tabelle 3.5: Einige Werte für die Gewichtungsfaktoren (Schweizerische Physikalische Gesellschaft 1993, 20)**

**Beispiel 3.4**

Der Gewichtungsfaktor der Lunge ist 0.12. Einer Lungendosis  $H=1$  Sv entspricht also die effektive Äquivalentdosis  $H_{\text{eff}}=120$  mSv.

Ist eine einzelne Person einer schwachen Ganzkörperbestrahlung ausgesetzt, so kann man mit der effektiven Äquivalentdosis die gesamte Strahlengefährdung beurteilen.

Zum Schluss folgt eine kurze Zusammenfassung zum Abschnitt Dosimetrie.

| Dosen                     | Definition                                    | Einheit                      | Beschreibt / Berücksichtigt  |
|---------------------------|---|------------------------------|--|
| Energiedosis              | $D = \frac{dW}{dm}$                           | Gy                           | die <b>absorbierte Strahlungsenergie</b> pro Masse                         |
| Dosisleistung             | $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$                     | $\frac{\text{Gy}}{\text{s}}$ | die Energiedosis pro Zeit  |
| Äquivalentdosis           | $H=Q \cdot D$                                 | Sv                           | die Wirkung verschiedener <b>Strahlungsarten</b> in demselben Gewebe       |
| Effektive Äquivalentdosis | $H_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot H_i$ | Sv                           | die unterschiedliche <b>Strahlungsempfindlichkeit</b> der einzelnen Organe |

**Tabelle 3.6: Zusammenfassung der Dosimetrie**

## Lernkontrolle

Bearbeiten Sie selbständig die folgenden Aufgaben. Sie prüfen dabei Ihr Wissen über dieses Kapitel.

### Aufgabe 3.10

Die Zählrate von Titan-204 wird mit einem Geiger-Müller-Zählrohr bestimmt. Die von dieser Quelle ausgesandten  $\beta$ -Teilchen haben eine maximale Energie von 0.76 MeV. Die Ansprechwahrscheinlichkeit  $A$  beträgt 0.039. Wie viele Teilchen müssen einfallen, damit im Mittel 100 Teilchen registriert werden?

### Aufgabe 3.11

In einer Lernaufgabe dieses Kapitels haben Sie die Abhängigkeit der  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung von einem Magnetfeld untersucht. Dieses Experiment scheitert bei der Verwendung von  $\alpha$ -Strahlung. Es werden zum Beispiel  $\alpha$ -Strahlen der Energie  $E = 5$  MeV und ein Magnetfeld  $B = 0.01$  T verwendet. Die Masse des  $\alpha$ -Teilchens ist  $m = 4 u = 4 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}$  kg.

- Zeichnen Sie eine Skizze, in der die Flugbahn und die wirkenden Kräfte eingezeichnet sind!
- Berechnen Sie den Radius der Kreisbahn!
- Woran scheitert das Experiment?

### Aufgabe 3.12

Ein Mensch wird mit folgenden Organdosen bestrahlt:

| Organ             | Dosis   |
|-------------------|---------|
| Lunge             | 0.6 Sv  |
| Schilddrüse       | 1.2 Sv  |
| Knochenoberfläche | 0.09 Sv |
| Magen             | 1.8 Sv  |

Bestimmen Sie die effektive Äquivalenzdosis!

Haben Sie die Aufgaben zur Lernkontrolle richtig beantwortet? Ja? Na dann melden Sie sich zum Kapiteltest!

## Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 3

### Aufgabe 3.1

Siehe hierzu folgende Abschnitte im Leitprogramm:

- 3.1.1 Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohres
- 3.1.2 Zählrohrcharakteristik

### Aufgabe 3.2

Wegen der Totzeit kann pro  $10^{-4}$  Sekunden höchstens ein Impuls registriert werden. Pro Sekunde können somit maximal  $10^4$  Impulse registriert werden, d. h. die maximale Zählrate beträgt  $10^4$  Impulse/s.

### Aufgabe 3.3

Bei jedem hörbaren Knackgeräusch muss kurz zuvor eine Spannung am Widerstand abgefallen sein. Dieser Spannungsabfall wird durch die einfallende Strahlung hervorgerufen. Das heisst, es existiert eine natürliche ionisierende Strahlung, der wir ständig ausgesetzt sind. Diese Strahlung nennt man Untergrundstrahlung. Das Auftreten von Knackgeräuschen ohne radioaktive Quelle wird Null-Effekt genannt. Die ohne radioaktives Präparat gemessene Zählrate nennt man Nullrate  $Z_0$ .

Eine weitere Beobachtung ist die unregelmässige Folge der Knackgeräusche. Sie weisen darauf hin, dass die stattfindenden Zerfälle in einer radioaktiven Quelle voneinander unabhängige Ereignisse sind. Es handelt sich um zufällige Prozesse.

### Aufgabe 3.4

Aus dem Lautsprecher ertönen in unregelmässiger Folge knackende Geräusche. Bei abnehmendem Abstand zwischen Präparat und Zählrohr werden die Zeitintervalle im Mittel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knackgeräuschen immer kleiner. Je kleiner der Abstand ist, desto grösser wird die Zählrate und damit die Intensität der Strahlung.

### Aufgabe 3.5

$\alpha$ -Teilchen sind zweifach positiv geladene Heliumkerne. Sie sind viel grösser als die  $\beta$ -Teilchen. Die Anzahl der Stösse und Ionisationen auf einer Wegstrecke ist bei den  $\alpha$ -Teilchen somit viel grösser als bei den  $\beta$ -Teilchen. Die Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen in Luft ist viel kleiner als die Reichweite der  $\beta$ -Teilchen, obwohl die Energie der  $\alpha$ -Teilchen doppelt so gross ist wie die Energie der  $\beta$ -Teilchen. Somit ist für die Reichweite der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen die Häufigkeit der Stösse und Ionisationen entscheidender als die unterschiedliche Energie.

### Aufgabe 3.6

a) Der Vergleich mit Kapitel 2 liefert folgende Analogien:

- Zählrate  $Z \rightarrow$  Anzahl radioaktiver Kerne  $N$
- Proportionalitätskonstante  $c \rightarrow$  Zerfallswahrscheinlichkeit  $\lambda$
- Raumrichtung  $x \rightarrow$  Zeit  $t$

Somit gilt für die Zählrate die analoge Gleichung:

$$Z(x) = Z_e \cdot e^{-c \cdot x}$$

b) Aus der Definition der Halbwertsdicke folgt:

$$Z(d_{1/2}) = \frac{Z_e}{2} = Z_e \cdot \exp(-c \cdot d_{1/2})$$

$$\Rightarrow c = \frac{\ln 2}{d_{1/2}}$$

### Aufgabe 3.7

Anzahl der im Zählrohr eintreffenden g-Quanten pro s =

$$\frac{2.5 \cdot 10^6}{0.1} \frac{1}{s} = 2.5 \cdot 10^7 \frac{1}{s}$$

$$\dot{D} = 2.5 \cdot 10^7 \frac{1}{s} \frac{1 \text{ MeV}}{\text{kg}} = 4 \frac{\mu\text{Gy}}{\text{s}}$$

### Aufgabe 3.8

Bei den  $\alpha$ -Teilchen sind sehr viel weniger Zellen betroffen als bei den  $\beta$ -Teilchen. Denn ein  $\alpha$ -Teilchen erzeugt in einer Zelle im Mittel 1000mal mehr Ionen und Elektronen als ein  $\beta$ -Teilchen. Somit verlieren die  $\alpha$ -Teilchen ihre Energie auf einer viel kürzeren Distanz als die  $\beta$ -Teilchen.

### Aufgabe 3.9

$H = Q \cdot D$ , mit  $H = 1 \text{ mSv}$  und  $Q = 10$

$$\Rightarrow D = 10^{-4} \text{ Gy} = 100 \mu\text{Gy}$$

$\Rightarrow$  Nach 5 Stunden muss der Forscher das Labor verlassen.

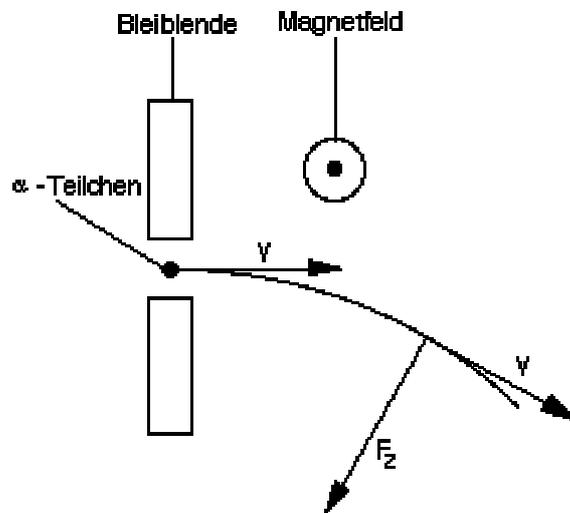
### Aufgabe 3.10

$$A = 0.039 = \frac{100}{n} \Rightarrow n = 2564,1$$

Es müssen 2565 Teilchen einfallen, damit 100 Teilchen registriert werden.

**Aufgabe 3.11**

a) Skizze:


 b) Ansatz: Zentripetalkraft  $F_z$  = Lorentz-Kraft

$$\Leftrightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = 2e \cdot v \cdot B$$

wobei r: Radius der Kreisbahn  
 m: Masse des  $\alpha$ -Teilchens  
 E: Energie des  $\alpha$ -Teilchens  
 e: Elementarladung  
 B: Magnetfeld

$$\text{und aus } E = \frac{m \cdot v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2m \cdot E}{4e^2 \cdot B^2}}$$

$$\Rightarrow r = \frac{m \cdot v^2}{2e \cdot v \cdot B} = \frac{m \cdot \sqrt{\frac{2E}{m}}}{2e \cdot B} = \sqrt{\frac{2m \cdot E}{4e^2 \cdot B^2}}$$

Damit ergibt sich für den Radius:

$$r = 32.2 \text{ m}$$

c)  $\alpha$ -Strahlung besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumatomen. Sie erfahren im Magnetfeld eine Lorentz-Kraft und werden abgelenkt. Da der Radius der Kreisbahn sehr gross ist, und die Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen in Luft nur etwa 4 cm beträgt, ist die Ablenkung aus der Strahlenrichtung kaum messbar.

### Aufgabe 3.12

Mit den in Tabelle 3.5 angegebenen Gewichtungsfaktoren gilt:

$$H_{\text{eff}} = 0.12 \cdot 0.6 \text{ Sv} + 0.05 \cdot 1.2 \text{ Sv} + 0.01 \cdot 0.09 \text{ Sv} + 0.12 \cdot 1.8 \text{ Sv} = 0.35 \text{ Sv}.$$

## Ergebnisse zu den Experimenten

### Experiment 3.1

Siehe Lösung Aufgabe 3.1 und Aufgabe 3.2

### Experiment 3.2

Korrekturmöglichkeit:

Man misst zuerst einige Male die Untergrundstrahlung. Von diesen Messungen bildet man den Mittelwert. Von jeder Messung mit dem radioaktiven Präparat wird dieser Mittelwert subtrahiert.

Teil 1:

In Luft ergibt sich für  $\alpha$ -Strahlung je nach Energie eine Reichweite von ca. 4 cm. Werden die unterschiedlichen Materialproben angebracht, ist die Zählrate für die  $\alpha$ -Strahlung Null. Dies ist nicht erstaunlich, denn bereits in Luft besitzt die  $\alpha$ -Strahlung nur eine geringe Reichweite. Für Materialien mit noch grösserer Dichte ergibt sich eine noch kürzere Reichweite.

Teil 2:

- Qualitativ ergibt sich, dass das Absorptionsverhalten der hier verwendeten Materialien bis auf Blei sehr gering bzw. Null ist.
- Die einzelnen Daten können aus der Abbildung 521.3 in Dorn-Bader 1989, 521 entnommen werden. Für die Bestimmung der Halbwertsdicke des  $\gamma$ -Strahlers in Blei ist aus den Kenngrößen der Quelle die maximale Strahlungsenergie abzulesen. Das Logarithmieren der Ordinate bewirkt, dass das von Ihnen erstellte Diagramm eine Gerade ergibt. Formal erhält man nämlich mit den Notationen aus Aufgabe 3.6 eine Geradengleichung:

$$Z(x) = Z_e \cdot \exp(-cx)$$

$$\propto \ln Z(x) = -cx + \ln Z_e$$

$$\propto y = -cx + b \quad \text{mit } \ln Z(x) = y \text{ und } \ln Z_e = b \text{ also die}$$

Geradengleichung.

## Additum

### Biographien

In diesem Additum finden Sie die Biographien von Louis Gray (1905-1965) und Rolf Sievert (1896-1966).

#### Wer war Louis Gray (1905-1965)?



Louis Harold Gray ist als Einzelkind in London aufgewachsen. Die Familienverhältnisse waren sehr bescheiden. Während durch seinen Vater die naturwissenschaftliche Begabung gefördert wurde, erlernte Louis Gray von seiner Mutter einige nützliche handwerkliche Dinge, wie z. B. tapezieren und nähen. In der Schule war Gray als fleissiger, interessierter und ausgezeichneter Schüler bekannt.

Mit 18 Jahren begann sich Gray für die Kernphysik zu interessieren. Dieses Wissenschaftsgebiet wurde damals vor allem von Ernest Rutherford an der Universität Cambridge erforscht. Daher freute sich Gray über das Stipendium, welches er am Trinity College in Cambridge erhielt. Dort beendete er als Jahrgangsbester das Studium in Physik, Mathematik und Chemie. Wegen seiner hervorragenden Studienleistung wurde er im Cavendish Laboratory in Cambridge aufgenommen. Dort untersuchte Gray die Wirkung verschiedener Strahlenarten auf Materie. Er schrieb seine Doktorarbeit über die Absorption energiereicher  $\gamma$ -Strahlen. In dieser Zeit lernte Gray eine blinde Theologiestudentin kennen, die er später heiratete. Durch den Einfluss seiner Frau engagierte sich Gray als Laienprediger und betätigte sich im sozialen Bereich.

Neben den reinen Forschungsaufgaben wünschte sich Gray eine praktische Arbeit zum Wohle der Allgemeinheit. Deshalb wechselte er von Cambridge nach London, wo er nacheinander in zwei verschiedenen Spitälern arbeitete. Dort legte Gray die Grundlagen der Radiobiologie. Er erforschte die Wirkung der ionisierenden Strahlung auf lebendes Gewebe. Gray wollte die Strahlung zur Bekämpfung von Tumoren und Krebs einsetzen. Er war bestrebt, die geeignete Dosis zu bestimmen, so dass einerseits die kranken Zellen absterben, andererseits aber das angrenzende gesunde Gewebe möglichst verschont bleibt. Daher führte Gray die Energiedosis mit der Einheit rad, eine Abkürzung für „radiation absorbed dose“, ein. 1965 starb Gray an den Folgen eines Schlaganfalls. 10 Jahre nach seinem Tod wurde die Energiedosiseinheit nach ihm umbenannt. Die seither übliche Einheit ist

1 Gray = 1 Gy = 100 rad.

### **Wer war Rolf Sievert (1896-1966)?**



Rolf Maximilian Sievert wurde 1896 in Schweden geboren. Sein Grossvater wanderte aus Deutschland aus und wurde in Schweden ein sehr erfolgreicher Fabrikant. Nach dem Tod seines Vaters sollte Rolf Sievert die Leitung der Firma übernehmen. Doch sehr bald zeigte sich, dass Sievert nichts von den Fabriken wissen wollte. Er war nach dem knapp bestandenen Schulabschluss sehr unentschlossen. Dank der guten finanziellen Verhältnisse der Familie konnte er es sich leisten, immer wieder eine neue Ausbildung zu beginnen. Er versuchte sich in Medizin und in Elektrotechnik vergeblich, bevor er das Studium in Astronomie, Meteorologie, Mathematik und Mechanik an der Universität in Uppsala in Angriff nahm und auch beendete. Während seiner Diplomarbeit beschäftigte sich Sievert

mit der Strahlungsintensität eines Radiumpräparates. Dieses Gebiet wurde später zu seinem Lebenswerk.

Zunächst musste Sievert aber auf familiären Druck hin in die Unternehmensleitung einsteigen. Nach dem 1. Weltkrieg studierte er nebenbei Physik an der Stockholmer Hochschule und wurde Assistent an der Schwedischen Akademie der Wissenschaften. 1920 erfuhr Sievert von der Möglichkeit, Röntgenstrahlen und Radiumpräparate für medizinische Zwecke einzusetzen. Dabei stand man noch vor dem Problem, die richtige Dosierung herauszufinden. Im folgenden entwickelte Sievert Methoden, um die Intensität von Röntgenstrahlung zu messen. Mit einer selbst gebastelten Apparatur konnte er bald Strahlendosen bestimmen. Damit wurde es möglich, bei der Bekämpfung von Tumoren und Krebs die Röntgenstrahlen dosiert einzusetzen. Ein weiteres Ziel von Sievert war die Entwicklung geeigneter Methoden zum Strahlenschutz. Er war Gründungsmitglied der „International Commission on Radiation Units and Measurement,“ (ICRU) und später Vorsitzender der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP). Er setzte sich mit Nachdruck für die Festlegung internationaler Grenzwerte ein und war diesbezüglich in mehreren Kommissionen vertreten.

Neben den beruflichen Aufgaben widmete sich Sievert aber auch seiner Familie. Er war zweimal verheiratet und hatte sieben Kinder. Zu seinen Hobbys zählten neben seiner Kakteenzucht das Sammeln von Schmetterlingen und das Orgelspielen.

Insgesamt 27 Jahre lang leitete er das Radiophysikalische Institut in Stockholm, bevor er 1966 an den Folgen einer Magenoperation starb.

## 4. Die biologische Wirkung radioaktiver Strahlung

### Übersicht

Stellen Sie sich vor, man würde Ihnen vorschreiben, dass Sie sich pro Jahr nur noch 95 Minuten der direkten Sonnenstrahlung aussetzen dürften! Diese Forderung müsste erhoben werden, wenn die Strahlenschutzgrenzwerte für ionisierende Strahlung auch auf die UV-Strahlung der Sonne ausgedehnt würden! Wie werden solche Grenzwerte überhaupt festgelegt? In diesem Kapitel erfahren Sie, nach welchen Kriterien diese Grenzwerte definiert werden. Ausgehend von den Folgen radioaktiver Strahlung in einer Zelle, werden die Auswirkungen auf den ganzen Körper behandelt. Sie werden ebenso erfahren, dass die Radioaktivität etwas Natürliches ist.

### Vorgehen

Zuerst studieren Sie die Lernziele. Dann arbeiten Sie den Stoff dieses Kapitels durch. Wiederum sollen zur Abwechslung einige Literaturstellen aus Büchern der Bibliothek gelesen werden. Ausserdem gibt es noch Beispiele und Aufgaben. Am Schluss des Kapitels finden Sie die Lösungen zu den Aufgaben.

Wenn Sie die Lernkontrolle mit Erfolg bestanden haben, können Sie bei Ihrem Tutor einen kurzen Kapiteltest absolvieren. Stellen Sie noch stoffliche Unsicherheiten fest, repetieren Sie nochmals die entsprechenden Kapitelabschnitte.

Genug jetzt mit den organisatorischen Dingen! Blättern Sie um, und legen Sie los!

### Lernziele

1. Sie kennen die Auswirkungen der radioaktiven Strahlung auf den menschlichen Körper.
2. Sie wissen, von welchen Faktoren die Strahlenwirkung abhängt.
3. Sie können die Gefährlichkeit der radioaktiven Strahlung einschätzen.

## 4.1 Biologische Grundkenntnisse

Als erstes müssen Sie einige biologische und chemische Grundbegriffe auffrischen. Bilden Sie Zweiergruppen für eine aktive Repetition. Erklären Sie sich gegenseitig folgende Begriffe:

- Radikal
- Wasserstoffbrücke
- Aufbau und Funktion der Desoxyribonukleinsäure (DNS)
- Chromosom
- Mutationen

Verwenden Sie dafür höchstens 10 Minuten.

Sind Ihnen die Begriffe klar geworden, so fahren Sie mit dem Leitprogramm ab Abschnitt 4.2 „Biologische Wirkungen in einer Zelle,“ fort.

Treten beim Erklären Schwierigkeiten oder Unsicherheiten auf, kann folgende Literatur zu Hilfe genommen werden.

### Literaturstudium

Im folgenden werden zu den oben genannten Begriffen Literaturstellen angegeben. Schlagen Sie zu den Ihnen unklaren Begriffen die entsprechende Literaturstelle nach, und bearbeiten Sie diese. Entnehmen Sie hierzu der Handbibliothek folgende Literatur:

1. Eine Ausgabe Ihrer Biologie- und Chemieunterlagen. Lesen Sie hier die entsprechenden Stellen nach.
2. Hans Rudolf Christen: Chemie. Frankfurt am Main 1984, 12. Auflage (Moritz Diesterweg, Otto Salle).
  - zu **Radikal** siehe S. 156, 1. Absatz.
3. Knodel, H. Bayrhuber zusammen mit U. Bässler, A. Danzer, U. Kull: Linder Biologie. Stuttgart 1986, 19. Auflage (J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung).
  - zur **Wasserstoffbrücke** siehe Seite 27, Abschnitt 8.1.3 „Wasserstoffbrücken,“
  - zu den **Chromosomen** siehe Seite 316f, Abschnitt 3.1 „Grundlage,“
  - zum **Aufbau** und zur **Struktur der DNS** siehe
    - \* Seite 329f, Abschnitt 8.1 „Desoxyribonukleinsäure (DNS) als Träger der genetischen Information,“
    - \* Seite 332ff, Abschnitt 8.4 „Vorkommen und Struktur der Nukleinsäuren,“
    - \* Seite 337f, Abschnitt 8.11 „Genetischer Code,“, 1. Absatz.
  - zu **Mutationen** siehe Seite 323ff, Abschnitt 6 „Mutationen,“

## 4.2 Biologische Wirkungen in einer Zelle

Tritt ionisierende Strahlung in eine Zelle, so ionisiert sie Atome und Biomoleküle. Dabei erfolgt die schädigende Wirkung auf zweierlei Art (U. Niederer 1990, 5.2):

### 4.2.1 Direkte Wirkung

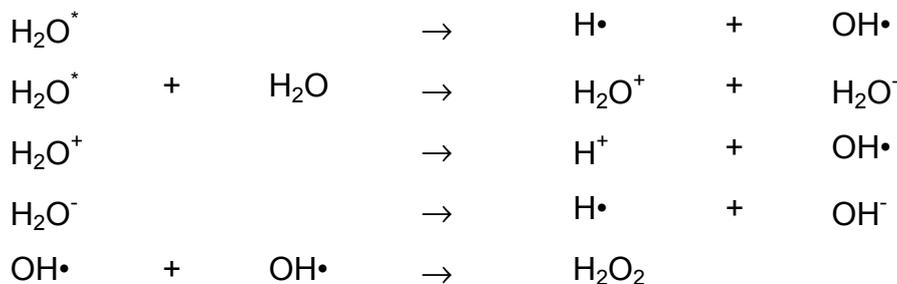
Ein Biomolekül wird direkt getroffen und ionisiert. Das führt zu chemischen Veränderungen. Das wichtigste Molekül ist die DNS, die als Gensubstanz die Zellinformation enthält und diese bei der Zellteilung weitergibt. Einzelstrangbrüche, Doppelstrangbrüche, Entstehen von Querverbindungen, Änderungen oder Substitutionen der organischen Basen können als Folge der radioaktiven Einstrahlung festgestellt werden. Daraus können Genmutationen und mikroskopisch feststellbare Chromosomenaberrationen entstehen.

Die Zelle verfügt über ein enzymgestütztes Reparatursystem, das Schäden an der DNS korrigieren kann. Manchmal ist die Reparatur aber fehlerhaft und bei starker Strahlenbelastung kann das Reparatursystem völlig überfordert sein, so dass nicht mehr alle Schäden behoben werden.

### 4.2.2 Indirekte Wirkung

Biomoleküle können durch Substanzen, die vorher durch das Ionisationsvermögen der Strahlung direkt entstanden sind, chemisch verändert werden.

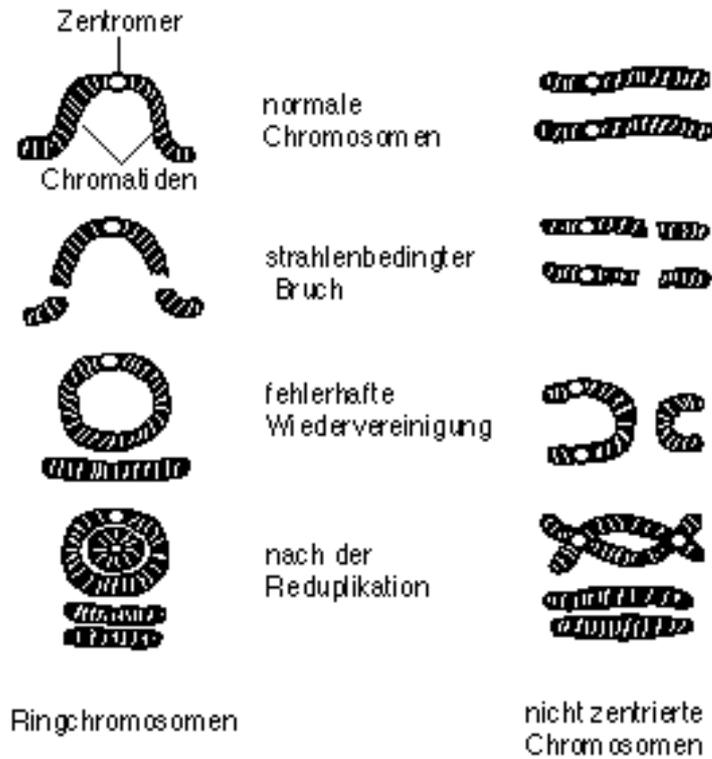
Der menschliche Körper besteht zu 2/3 aus Wasser. Deshalb ist die Radiolyse des Wassers (= chemische Veränderung des Wassers bei Strahleneinwirkung) ein wichtiger Prozess für die indirekte Wirkung. Dabei entstehen Ionen, Radikale und neue chemische Verbindungen (siehe Abb. 4.1). Alle diese Produkte können Ausgang für chemische Reaktionen mit Biomolekülen sein, die unter Umständen zu Krebs führen können.



**Tabelle 4.1: Reaktionsgleichungen im Wasser**

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| $\text{H}_2\text{O}^*$ :                       | <b>angeregtes Wassermolekül</b>  |
| $\text{H}\cdot, \text{OH}\cdot$ :              | <b>Radikale</b>                  |
| $\text{H}_2\text{O}^+, \text{H}_2\text{O}^-$ : | <b>ionisierte Wassermoleküle</b> |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ :                       | <b>Wasserstoffperoxid</b>        |

Diese Produkte lösen nun chemische Folgereaktionen mit Biomolekülen aus, die zum Beispiel zu Krebs führen können.



**Abbildung 4.1: Formen strahlenbedingter Chromosomenveränderungen (Arbeitsgruppe Kinder und atomare Bedrohung 1988, 20)**

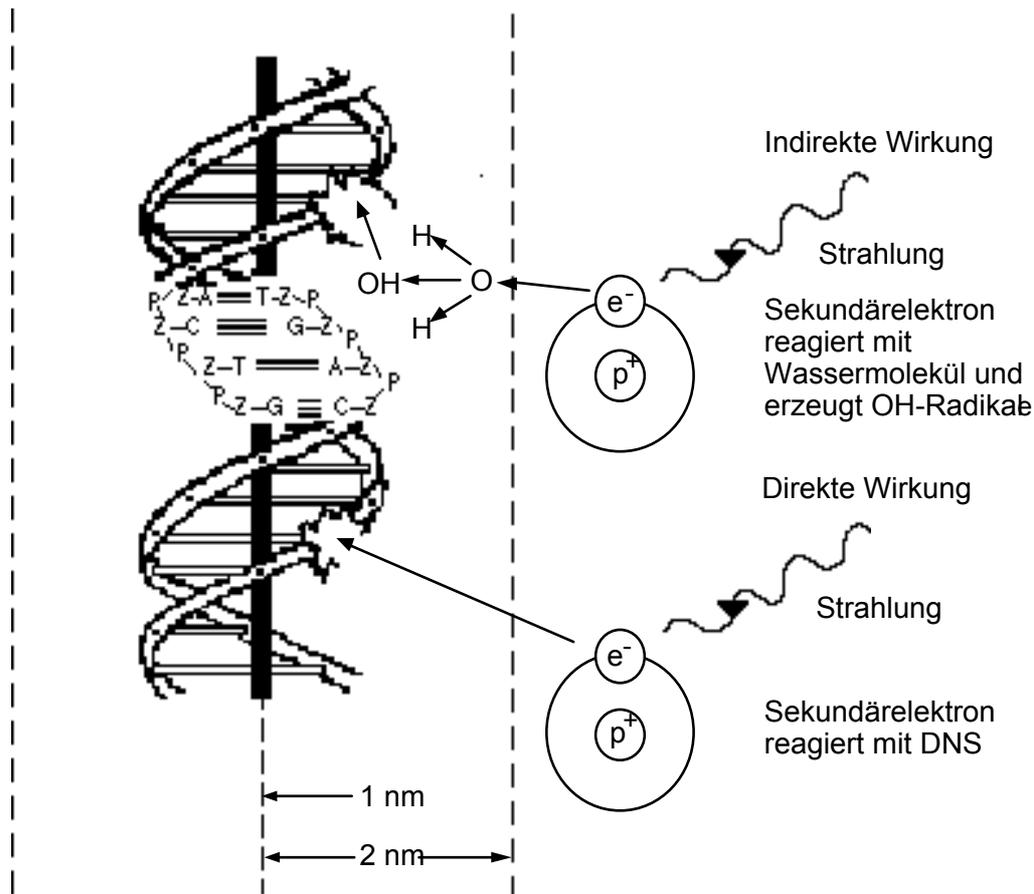


Abbildung 4.2: direkte und Indirekte Wirkung (Martignoni 1987, 9)

### 4.3 Stochastische und nicht-stochastische Effekte

#### Literaturstudium

Nun folgt ein Abschnitt, in dem Sie nochmals die Handbibliothek benutzen. Dazu besorgen Sie sich folgende Literatur: Dorn-Bader: Physik in einem Band. Hannover 1989 (Schrödel-Verlag). Haben Sie die Literatur gefunden, so bearbeiten Sie Variante 1. Ist diese Literatur in der Bibliothek nicht vorhanden, fahren Sie mit dem Leitprogramm ab Variante 2 fort.

#### Variante 1

Lesen Sie in der oben angegebenen Literatur auf Seite 529 f das Kapitel 5 „Welche Schäden können im Körper auftreten?“. Anschliessend fahren Sie mit dem Leitprogramm Tabelle 4.2 fort.

#### Variante 2

Aus den bisherigen Betrachtungen wissen Sie, dass zelluläre Veränderungen durch direkte und indirekte Wirkungen hervorgerufen werden können. Alle diese Veränderungen wirken sich auf Zellen, Gewebe und Organe aus. Dabei können wiederum zwei Fälle unterschieden werden.

Zum einen betrachtet man Veränderungen, die ab einer mehr oder weniger breiten Schwellendosis mit Sicherheit eintreten. Sie sind also nicht nach dem Zufallsprinzip gestreut und werden deshalb nicht-stochastische Effekte genannt.

Zum anderen kann bei genetischen Folgeschäden und bei Krebs nicht vorhergesagt werden, wen es zufällig treffen wird. Dies sind die stochastischen, also zufälligen Strahlenschäden. Ihre Auftretenswahrscheinlichkeit steigt mit der erhaltenen Dosis.

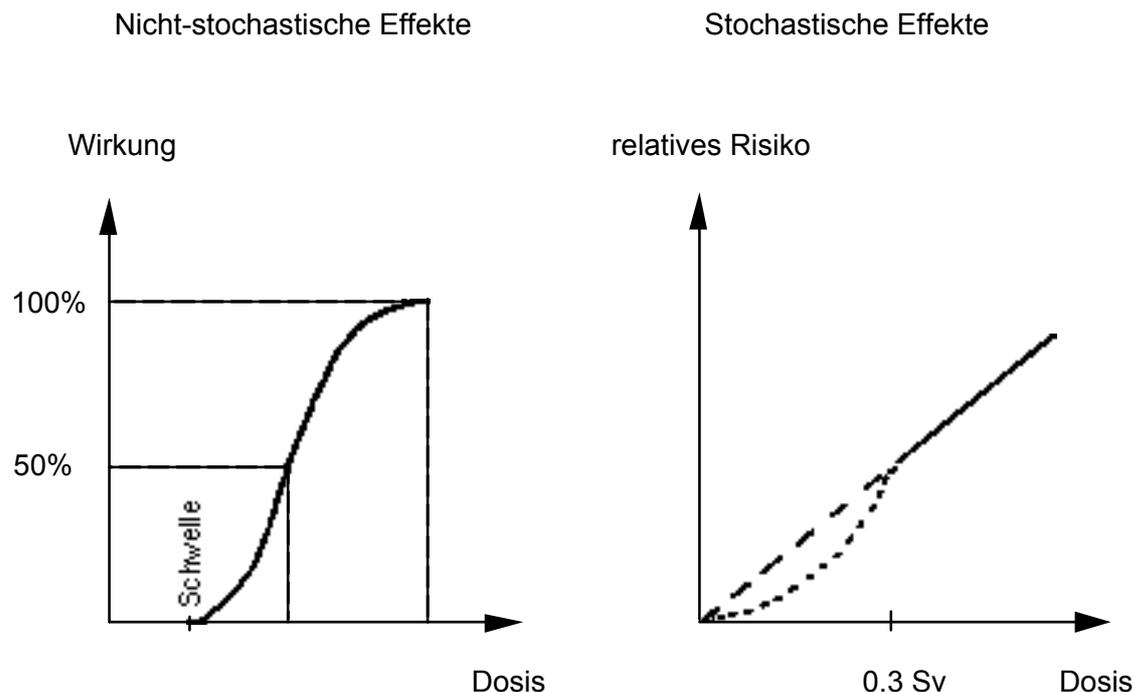
In der folgenden Tabelle (siehe Tabelle 4.2) sind die wichtigsten Eigenschaften der nicht-stochastischen und der stochastischen Effekte einander gegenübergestellt.

| <b>Nicht-stochastische Effekte</b>                 | <b>Stochastische Effekte</b>                           |
|--|--|
| Gewebe- und Organschäden                           | Bildung von Krebs                                      |
| Tritt rasch auf (Tage bis Wochen)                  | Entwickelt sich nach Latenzzeit (Jahre bis Jahrzehnte) |
| Schwere des Schadens nimmt mit der Dosis zu        | Eintretenswahrscheinlichkeit nimmt mit der Dosis zu    |
| Dosis hat Schwellenwert (nur grosse Dosen wirksam) | Kaum Schwellenwert bekannt (auch kleine Dosen wirksam) |
| Limitierung der Dosis verhindert den Schaden       | Limitierung der Dosis macht Schaden unwahrscheinlicher |

**Tabelle 4.2: Zusammenfassung stochastischer und nicht-stochastischer Effekte (Niederer 1990, 5.4)**

#### **4.4 Dosis-Wirkungsbeziehung**

Die Dosis-Wirkungsbeziehung beschreibt, wie sich die Auswirkungen der radioaktiven Strahlung auf den Menschen mit der Dosis ändert. In Abschnitt 4.3 haben Sie gelernt, die Auswirkungen in stochastische und nicht-stochastische Effekte zu unterteilen. Welche Dosis-Wirkungsbeziehung ergibt sich für stochastische Effekte? Eine Reihe von Untersuchungen führte zu den in Abbildung 4.3 dargestellten Ergebnissen.



**Abbildung 4.3: Dosis-Wirkungsbeziehung (Niederer 1990,5.6)**

Für die stochastischen Effekte steigt mit höheren Dosen die Wahrscheinlichkeit für genetische Folgeschäden und Krebserkrankungen linear an. Für Dosen unterhalb von 0.3 Sv liegt keine wissenschaftlich begründete Kurvenform vor. Allerdings geht man davon aus, dass die Krebswahrscheinlichkeit bei linearer Extrapolation überschätzt wird. Die punktierte Kurve ist somit realistischer.

Tabelle 4.3 gibt die Risikofaktoren einiger Krebsarten an. Dies sind allerdings nur statistische Werte. Da die Sterberate von Krebs deutlich höher liegt, sind die Ursachen der einzelnen Fälle kaum auszumachen. Insgesamt summiert sich das Risiko, aufgrund von radioaktiver Strahlung an Krebs zu sterben, für die Bevölkerung zu 0.05 pro Sv, d. h. von einer Million Menschen, die mit 1 Sv bestrahlt werden, würden 50'000 Leute an Krebs erkranken.

| Krebsart          | Latenzzeit in Jahren | Anzahl der Todesfälle in 30 Jahren pro Sievert |
|-------------------|----------------------|--|
| Leukämie          | 10-15                | 0.002  |
| Knochenkrebs      | x                    | 0.0005   |
| Lungenkrebs       | x                    | 0.002  |
| Schilddrüsenkrebs | 20.3                 | 0.0005   |
| Brustkrebs        | 22.6                 | 0.0025   |

**Tabelle 4.3: Risikofaktoren einiger Krebsarten (Kiefer, Koelzer 1986, 112)**

### Beispiel 4.1

Wird ein Mensch mit einer Dosis von 1 Sv bestrahlt, so ist die Wahrscheinlichkeit 0.2%, dass er aufgrund der erhaltenen Strahlung in den nächsten 30 Jahren an Lungenkrebs sterben wird.

### Aufgabe 4.1

Im Kanton Uri leben etwa 34'000 Menschen, die einer durchschnittlichen natürlichen und zivilisatorischen Strahlenbelastung von 5,5 mSv pro Jahr ausgesetzt sind. Die Wahrscheinlichkeit innerhalb eines Jahres an Krebs zu sterben ist 0.05 pro Sv. Bestimmen Sie aus diesen Daten die durchschnittliche Anzahl Krebstodesfälle (verursacht durch radioaktive Strahlung) im Kanton Uri pro Jahr.

## 4.5 Und was geschieht mit mir?

Nachdem Sie die möglichen Schäden in einer Zelle studiert haben, sollen die Folgen einer Ganzkörperbestrahlung untersucht werden. Die Auswirkungen einer Ganzkörperbestrahlung hängt neben der Dosishöhe massgeblich von der Dauer der Bestrahlung ab. Der Schaden ist geringer, falls eine bestimmte Dosis während längerer Zeit verabreicht wird, als wenn jemand dieselbe Dosis in kürzerer Zeit empfängt. Wichtig ist hierbei auch der Zeitraum zwischen zwei Bestrahlungen. Ist der Zeitraum so gross, dass die strahlenbedingte Auswirkung in einer Zelle von dieser repariert wird, bleibt der Schaden einer folgenden Bestrahlung klein. Ist der Zeitraum allerdings für die Reparaturen zu kurz, stellt sich ein grösserer Schaden ein (siehe Tabelle 4.4).

| Zeitfaktor der Bestrahlung | Ueberlebensrate |
|----------------------------|-----------------|
| 1·10 Gy kurzzeitig         | 0 %             |
| 10·1 Gy täglich            | 10 %            |
| 20·0.5 Gy täglich          | 70 %            |

**Tabelle 4.4: Ergebnisse aus einem Bestrahlungsversuch an Mäusen**

Welcher Krankheitsverlauf und welche Schäden ergeben sich durch eine einmalige kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung mit unterschiedlichen Dosen?

Ab einer Äquivalentdosis von mehr als 1 Sv tritt die sogenannte Strahlenkrankheit auf. Sie verläuft in drei Abschnitten: Zuerst treten erste Krankheitszeichen auf. Diese klingen in einem zweiten Abschnitt wieder ab, und der Patient scheint gesund zu sein. Darauf folgt aber wieder eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes. Die Zeitspanne, in der keine Krankheitszeichen auftreten, nennt man Latenzzeit. Je höher die erhaltene Dosis ist, desto kürzer ist die Latenzzeit.

In der folgenden Tabelle sind die möglichen Auswirkungen zusammengestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der bestrahlte Mensch medizinisch nicht behandelt wird (siehe Tabelle 4.5).

| <b>Äquivalentdosis</b> | <b>Strahlenwirkung auf den Menschen</b>  |
|------------------------|--|
| 0 - 0.3 Sv             | Keine Schäden, deren Ursache eindeutig bei der Bestrahlung liegen.   |
| 0.3 - 1 Sv             | Vorübergehende Veränderung des Blutbildes.   |
| über 1 Sv              | Ab dieser Dosis setzt die Strahlenkrankheit ein: Übelkeit, Erbrechen, Müdigkeit, Veränderung des Blutbildes, Haarausfall, Durchfall, Entzündungen, Fieber.   |
| 1 - 1.5 Sv             | Schwindel; Veränderung des Blutbildes mit verzögerter Erholung; erste Todesfälle.  |
| 1.5 - 2 Sv             | Strahlenkrankheit bei mehr als 50% der Betroffenen: An den ersten beiden Tagen Übelkeit und Müdigkeit; Latenzzeit; ab 3. Woche Appetitverlust, Haarausfall, Durchfall, Veränderungen des Blutbildes, punktförmige Hautblutungen.   |
| 2 Sv                   | Sterblichkeitsrate von 5%.   |
| 2.25 Sv                | Strahlenkrankheit bei 100% der Betroffenen.  |
| 2 - 3 Sv               | Am 1. Tag Schwindel und Übelkeit; Latenzzeit; ab der 2. Woche Appetitlosigkeit, Übelkeit, Halsweh, Haarausfall, Durchfall, Fieber, Veränderung des Blutbildes. Erholung innerhalb von 3 Monaten wahrscheinlich.  |
| 4.5 Sv                 | Sterblichkeitsrate von 50%.  |
| 3 - 6 Sv               | Am 1. Tag Schwindel und Übelkeit; Latenzzeit; Ende der 1. Woche Appetitverlust, Unwohlsein; ab der 2. Woche Fieber, innere Blutungen, punktförmige Hautblutungen, Durchfall, Abmagerung, blutige Entzündung von Mundhöhle und Rachen.  |
| mehr als 6 Sv          | Sterblichkeitsrate von nahezu 100%. In 95% der Fälle tritt der Tod in den ersten 2 Wochen ein. Nach wenigen Stunden Schwindel, Erbrechen und Durchfall; kurze Latenzzeit; Ende der 1. Woche Fieber, innere Blutungen, punktförmige Hautblutungen, Durchfall, schnelle Abmagerung, Entzündung von Mundhöhle, Rachen und Darm. |

**Tabelle 4.5: Verlauf der Strahlenkrankheit (Petzold 1983, 150)**

## **4.6 Strahlenbelastung in der Natur und durch Zivilisation**

Die gesamte Strahlenbelastung setzt sich aus natürlicher und künstlicher Radioaktivität zusammen.

Die künstliche Strahlung in der Schweiz stammt hauptsächlich aus Anwendungen in der Medizin mit 1 mSv pro Jahr, aus früheren Kernwaffenversuchen mit 0.02 mSv pro Jahr, aus kerntechnischen Anlagen mit <0.02 mSv pro Jahr und diversen Kleinquellen mit 0.1 mSv pro Jahr (siehe Abbildung 4.4). Sie besteht aus Hunderten von Radionukliden, die in der Natur nicht vorkommen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anreicherung in der Biosphäre und ihrer

Aktivitäten von den natürlichen Radionukliden. Die Belastung konzentriert sich ausserdem auf einige Zellen bzw. Zelltypen in besonders starkem Masse.

Die natürliche Belastung des Menschen setzt sich im wesentlichen aus 4 Komponenten zusammen:

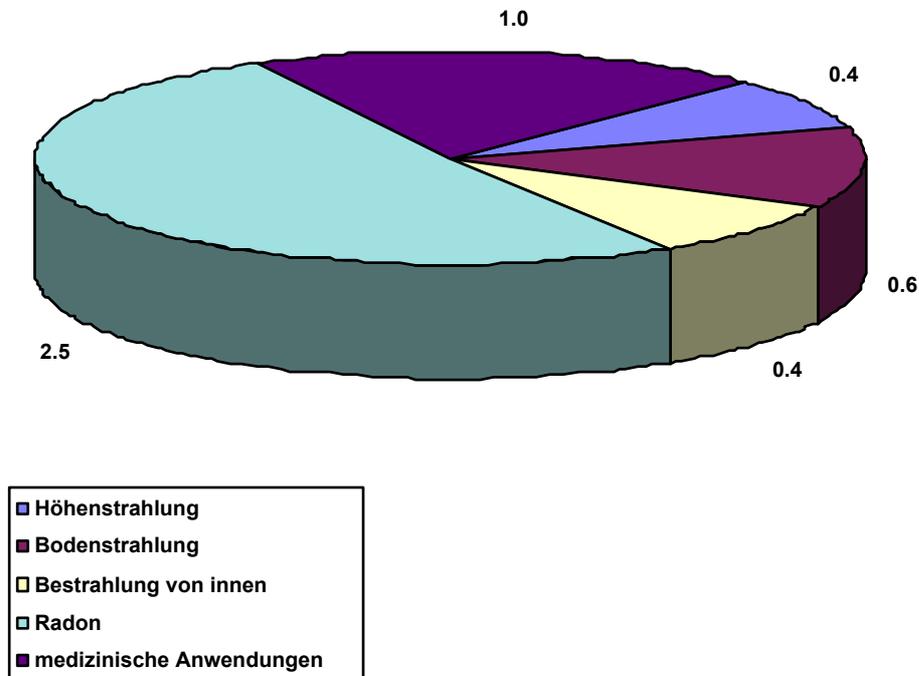
- a) Höhenstrahlung oder kosmische Strahlung
- b) Bodenstrahlung oder terrestrische Strahlung
- c) Bestrahlung aus dem Inneren des Körpers
- d) Radon

Die Höhenstrahlung kommt aus dem Weltraum und nimmt pro 1500 Höhenmeter etwa um den Faktor 2 zu. Die kosmische Strahlung erzeugt indirekt die Radionuklide C-14 und Tritium. Direkte Höhenstrahlung verursacht in Meereshöhe eine Dosis von etwa 0.4 mSv pro Jahr.

Die Bodenstrahlung rührt von sehr langlebigen Radionukliden aus den Zerfallsreihen des Thoriums bzw. Urans her, die im Laufe der Erdgeschichte noch nicht zerfallen sind. Sie erzeugen ca. 70% der natürlichen Strahlenbelastung. Je nach geologischem Untergrund kann die Bodenstrahlung erhebliche Werte annehmen. Sie beträgt, ohne Berücksichtigung von Rn-222, in der Schweiz durchschnittlich 0.6 mSv pro Jahr.

Die Bestrahlung von innen kommt hauptsächlich von Rn-222 und von Kalium-40. Diese gelangen durch Nahrungsaufnahme und durch Einatmen in den Körper. Das Rn-222 stammt aus der Zerfallsreihe des Urans und ist in Gesteinen der Erdkruste enthalten. Durch Diffusion gelangt das Rn-222 in die Luft und ebenfalls in Wohnhäuser. Um die Radonbelastung in den Häusern möglichst tief zu halten, sollte man zweimal pro Tag kurz und kräftig lüften. K-40 besitzt eine Halbwertszeit von 64 Milliarden Jahren und sendet beim Zerfall b- und g-Strahlung aus. In der Schweiz ist ohne Berücksichtigung von Rn-222 die durchschnittliche Dosis der Bestrahlung von innen 0.4 mSv pro Jahr. Die Belastung durch Radon liegt zwischen 2 und 3 mSv pro Jahr.

Im Durchschnitt beläuft sich die Strahlenexposition aus natürlichen und zivilisatorischen Quellen auf etwa 4.5-5.5 mSv pro Jahr (siehe Abbildung 4.4).



**Abbildung 4.4: Mittlere gesamte Strahlenexposition der Schweiz; Werte in mSv pro Jahr (Niederer 1990, 5.7)**

## 4.7 Strahlenschutz

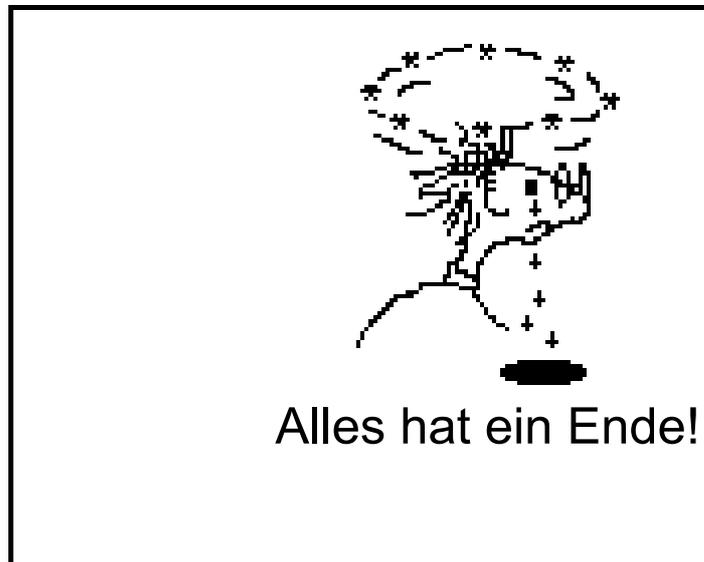
Um sich vor radioaktiver Strahlung zu schützen, sollte man eine radioaktive Quelle nicht berühren. In der Praxis ist dies leider nicht immer einzuhalten. Dennoch sollte möglichst darauf geachtet werden, eine oder mehrere der Schutzmethoden Abstand, Abschirmung oder Aufenthaltszeit zu gewährleisten.

Mit dem Abstand zur Quelle nimmt deren Intensität ab. Durch Abschirmung der Quelle mit geeigneten Materialien wie Beton, Blei oder Wasser wird die Dosis stark verringert. Je kürzer die Aufenthaltszeit in einem Strahlungsfeld konstanter Dosisleistung ist, desto geringer ist die erhaltene Dosis.

Im Sinne des Strahlenschutzes wurden von der International Commission on Radiological Protection (ICRP) und mittels der Strahlenschutzverordnung (StSV, Oktober 1994) jährliche Dosislimiten festgelegt (siehe Tabelle 4.6). Diese Grenzwerte sollten nicht überschritten werden. Die Dosen aus der Anwendung für medizinische Zwecke und aus der natürlichen Strahlenexposition unterliegen nicht diesen Grenzwerten.

|      | <b>Bevölkerung</b> | <b>beruflich Strahlenexponierte</b> |
|------|--------------------|-------------------------------------|
| StSV | 1 mSv              | 20 mSv                              |
| ICRP | 1 mSv              | 50 mSv                              |

**Tabelle 4.6: Richtwerte für die jährliche Dosis**



### Lernkontrolle

Bearbeiten Sie selbständig die folgenden Aufgaben. Sie prüfen dabei Ihr Wissen über dieses Kapitel.

#### Aufgabe 4.2

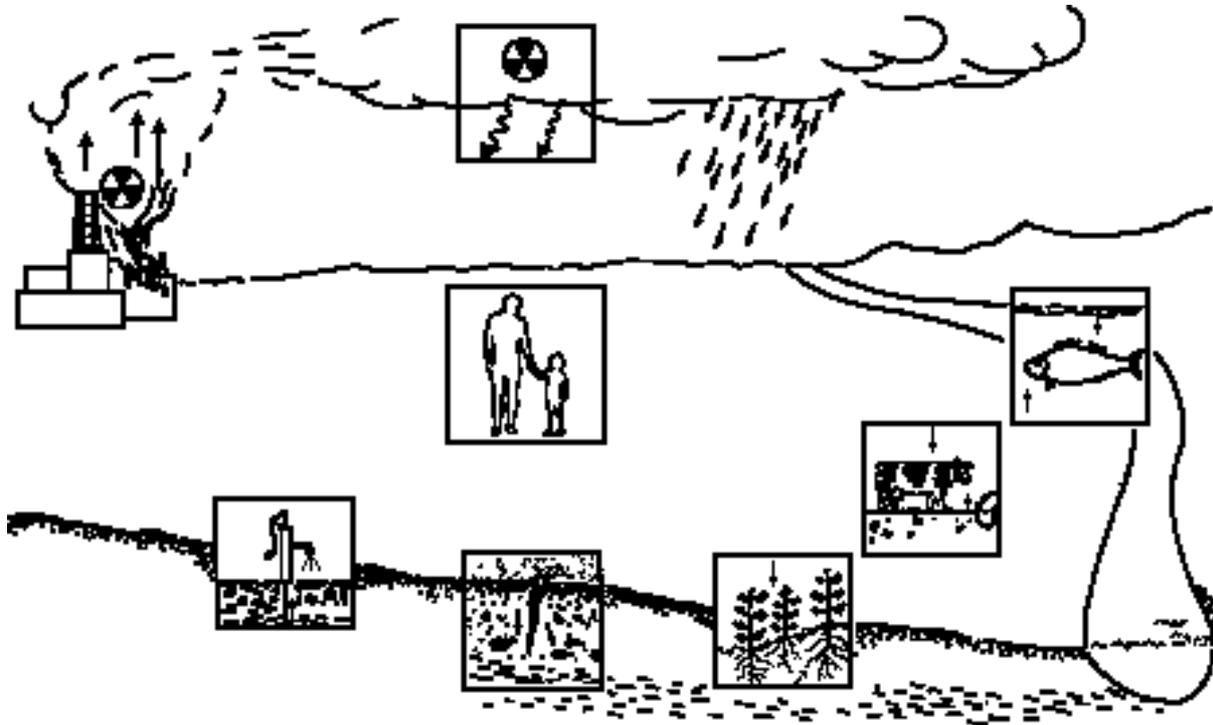


Abbildung 4.5

Betrachten Sie für diese Aufgabe die Abbildung 4.5.  
Auf welchen Wegen können Radionuklide zum Menschen gelangen?  
Deuten Sie in Abbildung 4.5 die möglichen Wege durch Pfeile an.  
Notieren Sie für jeden Weg ein geeignetes Stichwort!  
Beispiel: Unten links steht das Symbol für Grundwasser. Radioaktive Strahlung gelangt vom Grundwasser als Trinkwasser zum Menschen. Zeichnen Sie also einen Pfeil vom Symbol des Grundwassers zum Menschen und beschriften Sie ihn mit 'Trinkwasser'.

#### Aufgabe 4.3

Nennen Sie mindestens 7 Symptome der Strahlenkrankheit!

#### Aufgabe 4.4

Ein Glas Whisky enthält eine chemische Energie von etwa 300 kJ. Welche Dosis erhielte ein Mensch, der dieselbe Energie kurzfristig in Form von  $\gamma$ -Strahlung aufnahm? Vergleichen Sie die gesundheitlichen Auswirkungen.

#### Lösungen zu den Aufgaben von Kapitel 4

#### Aufgabe 4.1

Anzahl der Todesfälle pro Jahr =  $34'000 \cdot 5,5 \text{ mSv} \cdot 0,05/\text{Sv} = 9,35$

⇒ Aufgrund der natürlichen und zivilisatorischen Radioaktivität sterben im Durchschnitt 9 Einwohner des Kantons Uri pro Jahr an Krebs.

#### Aufgabe 4.2

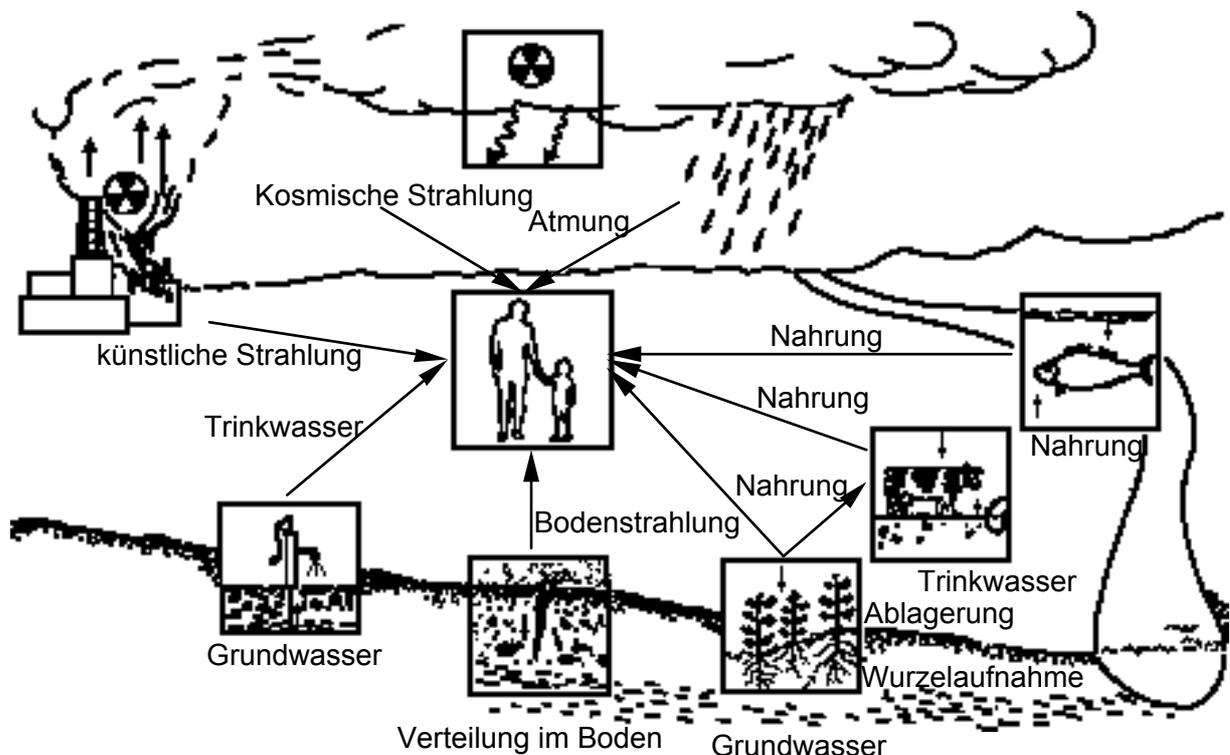


Abbildung 4.6: Natürliche und künstliche Radioaktivität

#### Aufgabe 4.3

Symptome der Strahlenkrankheit:

Übelkeit, Erbrechen, Müdigkeit, Veränderungen des Blutbildes, Haarausfall, Durchfall, Fieber, Schwindel, Appetitverlust, punktförmige Hautblutungen, blutige Entzündung von Mundhöhle, Rachen und Darm

**Aufgabe 4.4**

$D = 300\text{kJ}/70\text{ kg} = 4285.7\text{ Gy}$  bzw.  $4285.7\text{ Sv} \approx 700$  Letaldosen. Während also ein Glas Whisky sehr harmlos ist, würde die entsprechende ionisierende Strahlung den sofortigen Tod bedeuten.

## Additum: Die C-14 oder Radiokarbon-Methode

### Übersicht

Wie alt ist die Erde? Wann starben die Saurier aus? Wie alt sind die ägyptischen Pyramiden? Ist ein neu aufgetauchter 'Rembrandt' echt?

Um solche Fragestellungen zu lösen, braucht es die Möglichkeit das Alter eines interessierenden Objekts zu bestimmen - und zwar oft unter maximaler Schonung desselben. Schliesslich will man die Echtheit eines 'Rembrandts' prüfen, ohne diesen zu zerstören.

Besonders die Erforschung der Erdgeschichte und der Menschheitsgeschichte ist auf zuverlässige und genaue Altersbestimmungen angewiesen.

In diesem Kapitel erfahren Sie am Beispiel der C-14-Methode, wie mit Hilfe der Radioaktivität Altersbestimmungen mit beeindruckender Genauigkeit gemacht werden können. Mit verschiedenen Methoden, die auf der Radioaktivität beruhen, wird dabei fast der gesamte Zeitraum von der Entstehung der Erde bis heute zugänglich.

Der Schwerpunkt soll dabei für einmal nicht in der Physik allein liegen! Hier behandeln Sie ein Parade-Beispiel sogenannt interdisziplinärer Forschung.

### Vorgehen

Um von Beginn weg zu wissen, worauf es in diesem Kapitel ankommt, müssen Sie sich die Lernziele so gut merken, dass Sie sie während dem ganzen Studium dieses Kapitels vor Augen haben. So profitieren Sie am meisten.

Nach einer zeitlichen Übersicht über die Vergangenheit der Erde und der Menschen sollte Ihr Interesse für Altersbestimmungsmethoden geweckt sein. Sie befassen sich dann mit den physikalischen Grundlagen der Altersbestimmung durch Radioaktivitätsmessung. Diese werden Ihnen anhand der Radiokarbon-Datierung (C-14-Methode) erläutert.

Darauf werden Ihnen die zwei wichtigsten Messtechniken der C-14-Datierung vorgestellt. Prägen Sie sich die Haupteigenschaften dieser Techniken ein!

Im 4. Abschnitt sollen Sie lernen, dass Messungen nie absolut genau sind. Messungenauigkeiten, aber auch naturgegebene Einschränkungen wirken sich auf die Aussagekraft der Altersangabe bei der C-14-Methode aus.

Wenn Sie sich soweit durchgearbeitet haben, dürfen Sie aus einer kleinen Auswahl an Fachliteratur diejenige aussuchen, die Sie persönlich am meisten interessiert. In der Bibliothek hat es für fast jeden Geschmack einen Artikel!

Natürlich enthält auch dieses Kapitel Aufgaben, um das neu Gelernte sofort anzuwenden. Die Lösungen sind am Ende des Kapitels zu finden.

Wenn Sie alles durchgearbeitet haben, lösen Sie die Kontrollaufgaben. Diese zeigen Ihnen, ob Sie den behandelten Stoff verstanden haben. Urteilen Sie selbst, ob Sie reif sind für den Kapiteltest!

Da dieses Additum nicht von allen Schülern behandelt wird, wird der Kapiteltest ersetzt durch die Aufgabe, ein Kurzreferat über die C-14-Methode vorzubereiten.

### **Lernziele**

1. Sie können Ihrem Banknachbarn erklären, wie das C-14 erzeugt und in organisches Material eingebaut wird.
2. Sie kennen die zwei verschiedenen Technologien für die C-14-Altersbestimmung und deren wichtigsten Unterschiede.
3. Sie können mit einem Kurzreferat (mit ca. 3 Projektorfolien) den anderen Schülern die C-14-Methode anhand eines Beispiels (eventuell aus dem Literaturstudium) erklären.

## 1. Erd- und Menschheitsgeschichte

Die Altersbestimmung durch Radioaktivität ist eine Methode aus der Physik, die Forschern in ganz verschiedenen Gebieten dient. Natürlich gibt es auch nicht physikalische Datierungsmethoden, worauf wir aber nicht eingehen werden. Alle diese Methoden unterstützen sich gegenseitig und verhelfen dazu, archäologische Funde, Gesteinsschichten und vieles mehr zeitlich korrekt einzuordnen. Was dabei alles von Interesse ist, sehen Sie in der untenstehenden Tabelle der Erd- und Menschheitsgeschichte. Die Tabelle ist sehr klein und es lassen sich beliebig viele weitere Ereignisse hinzufügen. Vieles sollte aus dem Geographie- und dem Geschichtsunterricht bekannt sein.

| Zeitraum       | wichtiges Ereignis             | Bemerkung                          |
|----------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 4.5 Mrd. y BP  | Entstehung des Sonnensystems   | Die Erde wird fest                 |
| 2 Mrd. y BP    | der erste Regen                | Zeitalter: Archaikum               |
| 300 Mill. y BP | erste Reptilien                | Zeitalter: Karbon                  |
| 200 Mill. y BP | erste Säugetiere               | Beginn Erdmittelalter              |
| 65 Mill. y BP  | Saurier sterben aus            | Zeitalter: Kreide                  |
| 250000 y BP    | Beginn Homo Sapiens            |                                    |
| 40000 y BP     | Beginn Homo Sapiens Sapiens    |                                    |
| 12000 y BP     | letzte Eiszeit (Würmeiszeit)   | Mitteleuropa vergletschert         |
| 5000 y BP      | erste Hochkulturen             | Beginn schriftlicher Überlieferung |
| 2000 y BP      | Blüte des Römischen Reiches    |                                    |
| 1291 AD        | Gründung der Eidgenossenschaft |                                    |
| 1606 AD        | Geburt von Rembrandt           |                                    |
| 1765 AD        | Beginn der Industrialisierung  | J. Watt erfindet die Dampfmaschine |
| 1944 AD        | erste Atombombentests          | Anstieg der Radioaktivität         |

*Tabelle 1: wichtige Ereignisse aus der Vergangenheit (Diercke Weltatlas, Knaurs Lexikon)*

*verwendete Kürzel: y Jahre (engl. years);*

*BP vor heute (engl. before present);*

*AD unsere Jahrzahlweise (lat. anno domini).*

**Aufgabe A.1:** Ergänzen Sie die obige Tabelle um 3 Ereignisse oder Zeitspannen, die Ihnen wichtig erscheinen. Schlagen Sie im Lexikon nach!

## 2. Die Radiokarbon- oder C-14-Methode

Im September 1991 wurde in den Ötztaler-Alpen (Österreich) eine mumifizierte Leiche entdeckt. Über diesen Fund, der von grosser geschichtlicher Bedeutung ist, wurde auch in der Presse viel berichtet. Liebevoll wurde die Mumie "Ötzi" genannt. Das Hauptinteresse galt natürlich dem Alter des Leichnams, denn bis anhin wurde angenommen, dass die Eisregionen der Alpen in der Vergangenheit von den Menschen gemieden wurden.

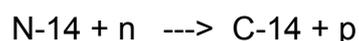


*Bild 1: Der "Ötzi" aus dem Tirol*

Um das Alter der Mumie zu bestimmen, verwendet man die sogenannte C-14-Methode. Worauf die C-14-Methode beruht, wird im folgenden diskutiert (eigentlich sind Sie beim Literaturstudium in Kapitel 2 schon auf die C-14-Methode gestossen!).

### 2.1 Produktion und Verteilung von C-14

Sogenannte kosmische Strahlung trifft ständig auf die Erdatmosphäre. In der oberen Atmosphäre werden durch diese Strahlung freie Neutronen erzeugt. Diese Neutronen gehen in der unteren Atmosphäre folgende Reaktion ein:



Ein Stickstoffatom (Anteil in der Luft 80 %) wird also zu einem C-14 umgewandelt. Das freiwerdende Proton ist nicht weiter von Bedeutung.

**Aufgabe A.2:** Schauen Sie in der Isotopentabelle die Halbwertszeit und die Zerfallsart von C-14, C-13 und C-12 nach!

Der Unterschied zwischen C-14, C-13 und C-12 liegt ja, wie Sie wissen, nur in der Anzahl Neutronen im Kern. Es handelt sich um einen kernphysikalischen Unterschied.

Chemische Eigenschaften hingegen sind ausschliesslich durch die Atomhülle (Elektronenschalen) bestimmt.

Somit ist es klar, dass sich C-14 chemisch genau gleich verhält wie C-12. C-14 oxidiert also genauso zu CO<sub>2</sub> wie C-12. Das CO<sub>2</sub> verweilt im Mittel ca. 70 Jahre in der Atmosphäre, sodass sich das C-14-haltige CO<sub>2</sub> weltweit mit dem normalen CO<sub>2</sub> vermischt. Die laufende Produktion und der Zerfall von C-14-Isotopen führen im atmosphärischen Kohlendioxid-Reservoir zu einem Gleichgewicht zwischen stabilen und radioaktiven Kohlenstoffisotopen.

Über die Photosynthese gelangt der radioaktive Kohlenstoff wie der stabile Kohlenstoff in alle Pflanzen und über die Nahrungskette in alle Lebewesen.

Man findet also (dank den Austauschmechanismen zwischen der Biosphäre und dem atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Reservoir) in allen lebenden Organismen das gleiche Häufigkeitsverhältnis von C-14 zu C-12 wie in der Atmosphäre (auf Abweichungen von diesem Sachverhalt kann hier nicht eingegangen werden).

Dieses Häufigkeitsverhältnis (Anzahl C-14 Atome/Anzahl C-12 Atome) wird kurz auch Verhältnis von C-14 zu C-12 oder C-14-Konzentration genannt.

Die atmosphärische C-14-Konzentration kann für den Zeitraum der Menschheitsgeschichte als nahezu konstant betrachtet werden und beträgt ca.  $1.2 \cdot 10^{-12}$ . Das heisst, dass auf eine Billion C-12 Atome etwas mehr als ein C-14 Atom zu stehen kommt. (Ein Vergleich: Gäbe es 250x mehr Menschen als heute, so wäre bei diesem Verhältnis genau einer anders als alle andern!)

Mit dem Tod scheidet ein Lebewesen aus dem globalen CO<sub>2</sub>-Kreislauf aus. Von nun an nimmt das Verhältnis zwischen C-14 und C-12 ab, da C-14 mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren zerfällt.

Durch Messung der aktuellen C-14-Konzentration in einer Probe (z.B. organisches Material vom Ötzi) kann somit die Zeitspanne bestimmt werden, die seit dem Ausscheiden des Organismus aus dem CO<sub>2</sub>-Kreislauf vergangen ist.

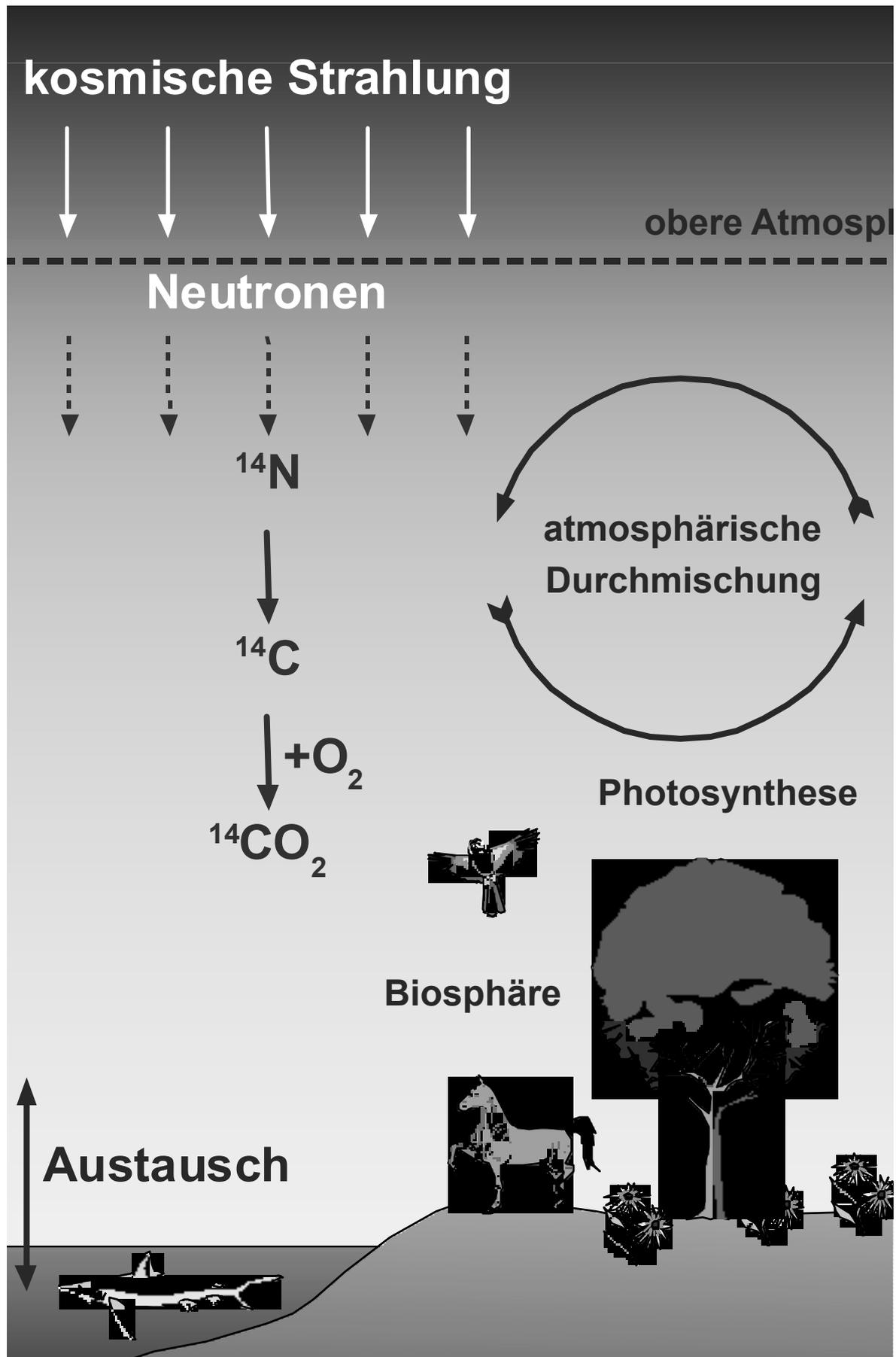
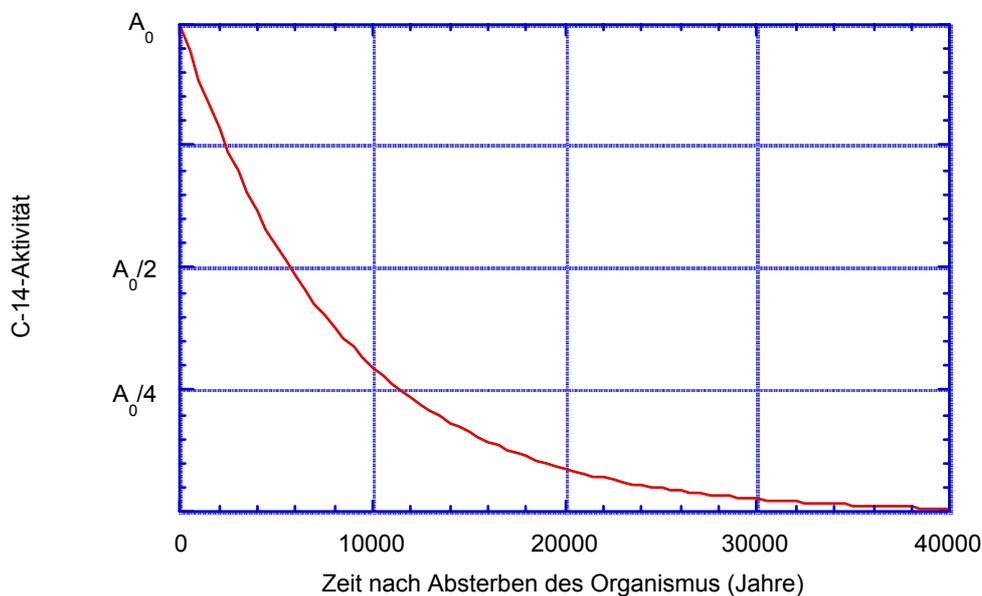


Bild 2: Produktion und Verteilung von C-14 in der Atmosphäre und der Biosphäre.

## 2.2 Die eigentliche Altersbestimmung

Wie wir bereits gelernt haben, beträgt die C-14-Konzentration in lebenden Organismen  $1.2 \cdot 10^{-12}$ . Was können wir nun über das Alter einer Probe aussagen, wenn wir die C-14-Konzentration bestimmen zu  $6 \cdot 10^{-13}$  ?

Wir stellen fest, dass nur noch halb soviel C-14 in der Probe enthalten ist wie in einem lebendigen Organismus. Es ist also die Hälfte des ursprünglichen C-14 zerfallen. Damit hat die Probe ein Alter von 5730 Jahren. (Dies ist die Definition der Halbwertszeit!)



*Bild 3: Die C-14-Aktivität (Anzahl C-14-Zerfälle pro Sekunde) nimmt nach dem Absterben des Organismus gemäss dem Zerfallsgesetz ab. Die C-14-Konzentration ist proportional zur C-14-Aktivität ( $A = \lambda N$ )*

**Aufgabe A.3:** Wie alt ist eine Probe, die eine 8-mal tiefere C-14-Konzentration enthält als ein noch lebender Organismus?

Wie wir noch sehen werden, liegt momentan die tiefste noch nachweisbare C-14-Konzentration bei ca.  $10^{-15}$ .

**Aufgabe A.4:** Was für ein Zeitbereich ist nun also mit der C-14-Methode zugänglich?

## 2.3 Eichungen und Korrekturen

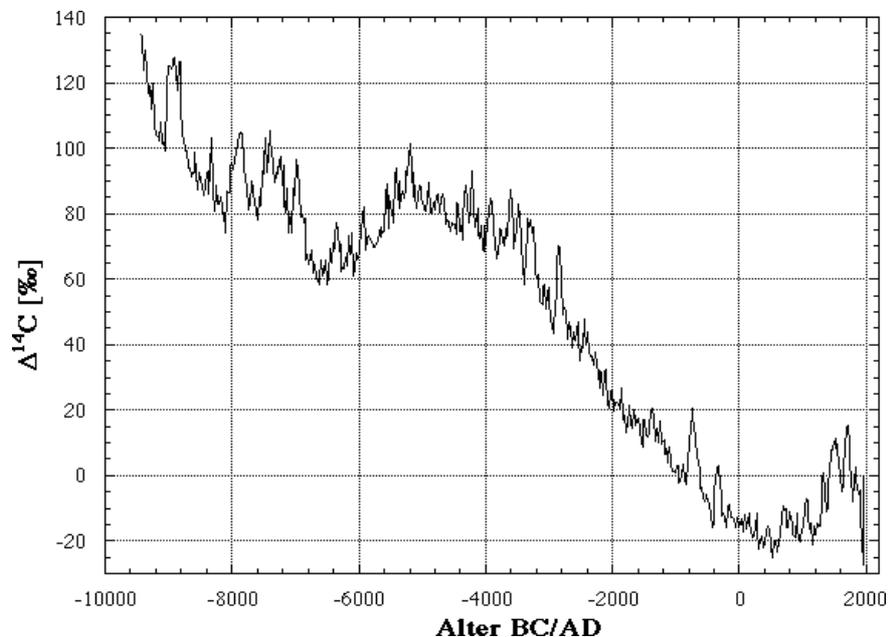
Ob die C-14-Konzentration über die letzten Jahrtausende konstant gewesen war, konnte anhand von Messungen an Baumringen überprüft werden.

Die sogenannte Dendrochronologie (Altersbestimmung anhand von Baumringen) kann eine Abfolge von 50 -70 Baumringen genau datieren. Dies ist möglich, da für die gesamte Zeit der letzten zehntausend Jahre viele konservierte Bäume gefunden wurden. Durch Überlappungen der Strukturfolge (gute Jahre - schlechte Jahre) in den Baumringen der verschiedenen Bäume konnte diesen ihr genaues Alter zugewiesen werden (Rückwärtszählen der Baumringe).

Bestimmt man nun die C-14-Konzentration von Baumringen, deren Alter genau bekannt ist, so lässt sich daraus das C-14/C-12-Verhältnis in der Atmosphäre zu der Zeit, als der Baumring wuchs, bestimmen.

Die Messungen ergaben, dass vor 10000 Jahren die C-14-Konzentration ca. 10 % grösser war als zu Beginn dieses Jahrhunderts und dann langsam abnahm. Vor rund 1000 Jahren war die C-14-Konzentration relativ niedrig, stieg dann aber wieder leicht an. Diese Schwankungen werden der sich ändernden Aktivität der Sonne zugeschrieben. Daraus folgt nämlich eine Änderung der Intensität der auf die Erde auftreffenden kosmischen Strahlung und somit der C-14-Produktion.

Mit Beginn der Industrialisierung vor ca. 300 Jahren wurde mit dem Verbrennen von fossilen Brennstoffen (Kohle, Öl) begonnen. Da solche Verbrennungen viel Kohlenstoff freisetzen, aber der entsprechende Kohlenstoff kein C-14 mehr enthält (z.B. ist das C-14 in der Kohle längst schon zerfallen), sank die C-14-Konzentration nun wieder ab (ca. 3 %). All diese Schwankungen bewegen sich im Bereich von ca. 10%!



**Bild 4:** Änderung der atmosphärischen C-14-Konzentration in den letzten 10000 Jahren (BC=Before Christ, AD=Anno Domini) bestimmt durch Messungen an Baumringen.  $\Delta C-14$  bedeutet dabei die Abweichung der C-14-Konzentration von einem Standardwert in Promille. Der Standardwert beträgt dabei  $1.2 \cdot 10^{-12}$  (Niklaus 1993)

Mit der Entdeckung der Atombombe und den darauffolgenden Atombombentests in den letzten 50 Jahren, wurden künstlich viele radioaktive Isotope erzeugt. Auch zusätzliches C-14 wurde nun in den CO<sub>2</sub>-Kreislauf gebracht. Dies führte zu einem immensen Anstieg der C-14-Konzentration in der Atmosphäre. In den 60-er Jahren wurden dadurch doppelt so grosse Werte der C-14-Konzentration gemessen wie vor den Atombombenexperimenten. Wo läge dieser Wert in der obenstehenden Grafik?

Jawohl! Der Wert liegt weit über der Grafik. Das bedeutet auch, dass die C-14-Konzentration sich in den letzten 50 Jahren fast 10-mal so stark verändert hat, wie in den vorangegangenen 10000 Jahren.

**Aufgabe A.5:** Bei der Datierung einer mayanischen Schriftrolle wird eine C-14-Konzentration von  $1.5 \cdot 10^{-12}$  gemessen. Was für ein Alter ordnen Sie diesem archäologisch interessanten Fund zu?

### 3. Die Messmethoden

Wie bestimmt man eigentlich das Verhältnis zwischen C-14 und C-12?

#### 3.1 Konventionelle C-14-Datierung

Eine Probe wird üblicherweise chemisch so aufbereitet, dass aus dem interessierenden Objekt reiner Kohlenstoff gewonnen wird. Dieser Kohlenstoff wird dann zu Kohlendioxid CO<sub>2</sub> verbrannt. Das CO<sub>2</sub> wird dann direkt in einen Geiger-Müller-Zähler eingefüllt. Die beim  $\beta$ -Zerfall des C-14-Kerns freiwerdende Energie ionisiert eine grosse Menge von Gasmolekülen, die dann über die Hochspannungselektroden als elektrischer Puls detektiert werden (vgl. Kap. 3.1).

Die Anzahl Pulse pro Zeiteinheit entspricht dann der C-14-Aktivität der Probe, d.h. man bestimmt die Anzahl C-14-Zerfälle in der Probe während einer bestimmten Messzeit und erhält daraus über die Zerfallskonstante die absolute Anzahl C-14-Isotope in der Probe:

Die Aktivität A einer Probe ist gegeben durch

$$A = \lambda \cdot N = -dN/dt.$$

Für C-14 ist:  $T_{1/2} = 5730 \text{ y}$

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 1/8267 \text{ y}^{-1}$$

Eine moderne Probe aus 1 g Kohlenstoff enthält  $6 \cdot 10^{10}$  C-14-Atome (modern ist hier ein Fachbegriff und bedeutet C-14/C-12 =  $1.2 \cdot 10^{-12}$ . D.h. modern entspricht der atmosphärischen C-14-Konzentration, die vor den Atombombenexplosionen bestand, höhere C-14-Konzentrationen, wie sie seither herrschen, werden als übermodern bezeichnet). Multipliziert man die Anzahl C-14-Atome mit  $\lambda$ , so ergibt das eine Aktivität von 13.8 Zerfällen pro Minute.

**Aufgabe A.6:** Wieviele Zerfälle pro Minute sind in einer Kohlenstoff-Probe der Masse 1 mg zu erwarten, wenn die Probe 57000 Jahre alt ist?

Umgekehrt kann man nun aus der Masse der Kohlenstoffprobe und der gemessenen Zerfallszahlrate das Verhältnis zwischen C-14 und C-12 bestimmen.

Um die Zerfallszahlrate genau zu bestimmen, muss man nun aber möglichst viele Zerfälle zählen.

Dies ist deshalb der Fall, da der radioaktive Zerfall ein statistischer Prozess ist, d.h. dass mehrere eigentlich identische Messungen nicht immer dieselbe Anzahl Zerfälle ergeben.

Der statistische Fehler bei N gezählten Zerfällen ist dabei gegeben durch  $\sqrt{N}$ .

Die Schwankungen sind also so, dass man mit 100 gezählten Ereignissen einen Fehler von 10 % in Kauf nehmen muss. Um einen Messfehler von 1 % zu erreichen, müssen 10000 Ereignisse erfasst werden.

Die konventionelle C-14-Datierung erfordert also wegen der langen Halbwertszeit von C-14 und der sehr kleinen C-14-Konzentration lange Messzeiten und grosse Probenmengen.

Mit der konventionellen C-14-Methode zählt man während einer bestimmten Zeit die Anzahl radioaktiver Zerfälle in einer Kohlenstoffprobe mit bekannter Masse. Daraus erhält man das C-14/C-12-Verhältnis und kann das Alter der Probe bestimmen. Leider sind die Zerfälle so selten, dass diese Methode viel Geduld braucht.

### **3.2 Was ist ein Massenspektrometer?**

Ein Massenspektrometer ist ein Gerät, das die Masse einzelner Atome oder Moleküle sehr genau bestimmen kann. Dazu muss man aus der Probe ionisierte Atome oder Moleküle gewinnen und diese anschliessend elektrostatisch beschleunigen. Dann kann man durch magnetische Ablenkung die Masse dieser Ionen berechnen (Zentripetalkraft = Lorentzkraft vgl. dazu Aufgabe 3.11 in Kapitel 3).

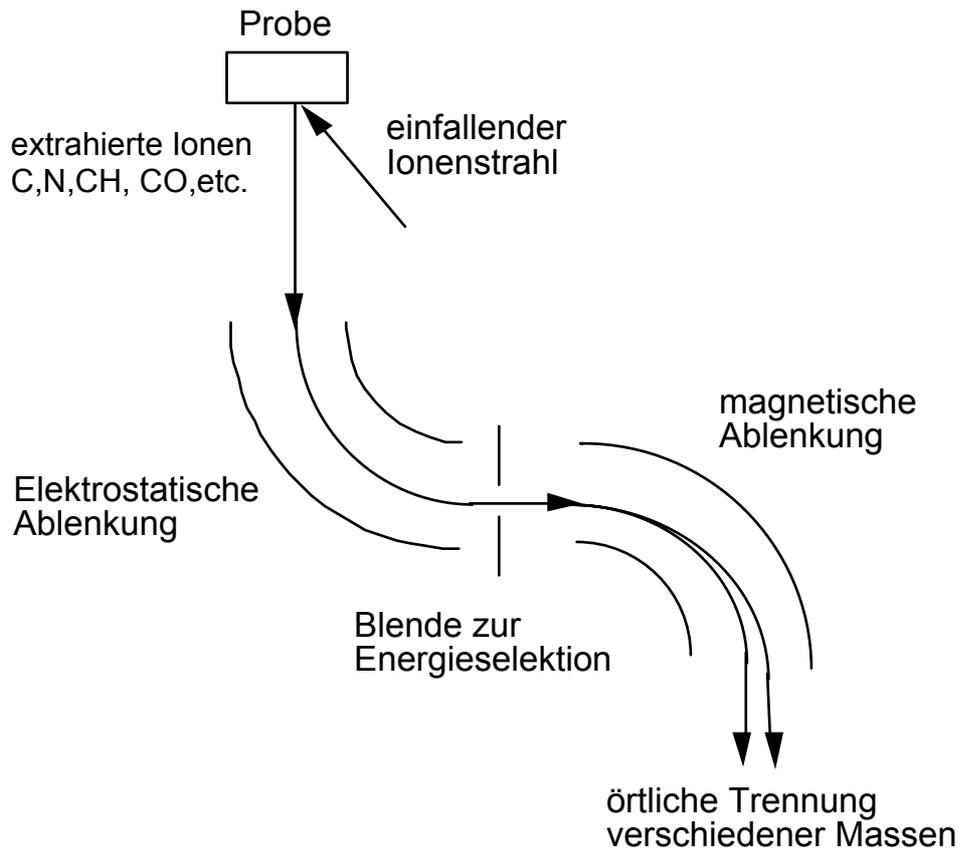


Bild 5: schematischer Aufbau eines konventionellen magnetischen Massenspektrometers

- Ionen erhält man z.B. dadurch, dass man die Probe bis zum Verdampfen erhitzt und den Dampf mit Elektronen beschiesst. Eine weitere Methode ist der Beschuss der Probe (in unserem Fall ein Stück Graphit) mit einem Ionenstrahl: Dabei werden viele neutrale, aber auch einige geladene Teilchen aus der Probe losgelöst.
- Die Ionen werden anschliessend mit einer Spannung von einigen kV beschleunigt. Um die Energie der Ionen genau festzulegen werden die Ionen in einem Elektrostaten abgelenkt und durch eine Blende geführt. So erhält man einen Ionenstrahl, in dem alle Ionen exakt dieselbe Energie haben. Darauf folgt eine magnetische Ablenkung. Dabei erhält man die Masse des Teilchens aus seinem Bahnradius.
- Leider ist es so, dass das C-14 so selten ist, dass die Zählraten der Moleküle  $^{13}\text{CH}$  und  $^{12}\text{CH}_2$  viel höher sind als die des C-14. Das hat zur Folge, dass das C-14-Signal in den anderen Signalen untergeht!

Mit einem Massenspektrometer löst man Atome aus einer Probe heraus und bestimmt deren Masse. Grundsätzlich erscheint die Messmethode für die Bestimmung vom C-14/C-12-Verhältnis also vielversprechend.

Moleküle mit Massenzahl 14 verunmöglichen aber den Nachweis von C-14, weil dieses viel weniger häufig vorkommt.

### 3.3 Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS)

Wie ist es also möglich einzelne C-14-Atome unter Billionen von anderen Kohlenstoffatomen effizient nachzuweisen?

Die Beschleuniger-Massenspektrometrie (engl. AMS = Accelerator Mass Spectrometry) ist dafür am besten geeignet und wird nun erläutert.

Beachten Sie bitte in der Folge stets die Zeichnung der Zürcher AMS-Anlage!

- Die zu untersuchende Kohlenstoffprobe wird mit Cs-Ionen beschossen (Cs = Cäsium). Der Cs-Beschuss zeichnet sich dadurch aus, dass besonders viele losgelöste Teilchen negativ geladen sind. Man erhält also einen recht grossen Anteil an negativen Kohlenstoffionen.
- Die negativen Ionen werden vor dem Niederenergie-Magneten mit einer Spannung von 40 kV beschleunigt.
- Der Niederenergiemagnet bewirkt, dass verschieden schwere Ionen verschieden stark abgelenkt werden. Damit sind neben den C-14-Ionen noch ionisierte Moleküle der Masse 14 im Ionenstrahl vorhanden (z.B.  $^{12}\text{CH}_2$ )

Soweit entspricht die Anlage eigentlich einem normalen Massenspektrometer wie in Abschnitt 3.2. Was nun noch folgt, dient hauptsächlich der Zerstörung von Molekülen, die den C-14-Nachweis in gewöhnlichen Massenspektrometern verunmöglichen.

- In der Mitte des eigentlichen Tandem-Beschleunigers liegt eine Spannung von 5.2 MV. Die negativen Ionen werden also stark dahin beschleunigt. Dort treffen sie dann mit hoher Energie auf eine Folie. Die Folie ist jedoch so dünn, dass die Teilchen sie fast ohne Energieverlust durchdringen. Allerdings verlieren die Ionen einige Elektronen und werden dadurch positiv geladen. Positiv geladene Ionen werden von der positiven Spannung abgestossen und deshalb gleich nochmals beschleunigt.

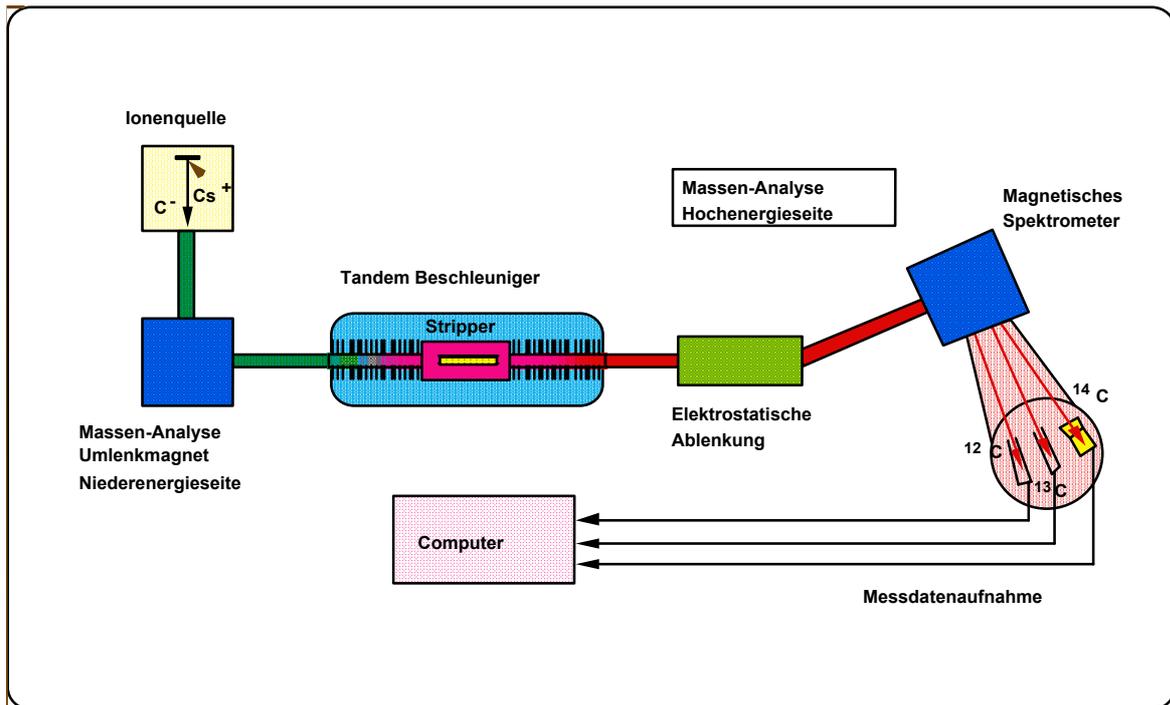


Bild 6: AMS-Anlage der ETH Zürich

- Wichtig ist, dass beim Durchdringen der Folie Moleküle in ihre Einzelatome geteilt werden. Am Ausgang des Beschleunigers hat man also positiv geladene C-14-Ionen und positiv geladene Fragmente ursprünglicher Molekülonen der Masse 14 (z.B. C-13, C-12, H). Diese Fragmente haben beim Austritt aus dem Beschleuniger andere Energien und andere Massen als die C-14-Ionen.
- Durch eine elektrostatische und eine magnetische Ablenkung können diese Fragmente nun leicht vom interessierenden C-14 getrennt werden.

Um nun das C-14/C-12-Verhältnis zu bestimmen, muss abwechselnd die C-14-Zählrate und der C-12-Strom auf der Hochenergieseite gemessen werden.

Die AMS-Anlage der ETH-Zürich benötigt für die Altersbestimmung eine Probenmenge von ca. 1 mg. Dies ist besonders bei sehr wertvollen Funden interessant, da die Entnahme einer so kleinen Probe den Fund nicht schädigt.

Eine moderne Probe ( $C-14/C-12 = 1.2 \cdot 10^{-12}$ ) liefert eine C-14-Zählrate von ca. 50 C-14-Atomen pro Sekunde.

**Aufgabe A.7:** Wie lange muss man eine 11460 Jahre alte Probe in Zürich messen um eine statistische Genauigkeit von 10% zu erreichen?  
Wielange geht eine solche Messung mit der konventionellen Methode, wenn die Probenmenge 1 mg Kohlenstoff beträgt?

Mit der Beschleuniger-Massenspektrometrie zählt man also direkt die radioaktiven Mutteratome. Man wartet nicht wie bei der konventionellen C-14-Methode, bis die C-14-Atome zerfallen, sondern man löst die C-14-Atome aus der Probe heraus und zählt sie im Detektor. Gleichzeitig werden auch die herausgelösten C-12-Atome gezählt. Das C-14/C-12-Verhältnis ist damit bestimmt.

### 3.4 Vergleich AMS - konventionelle C-14-Datierung

Zusammenfassend sollen nun nochmals die zwei Messmethoden mit ihren Hauptmerkmalen gegenübergestellt werden:

**Messung:** Die konventionelle C-14-Methode misst die Anzahl Zerfälle von C-14 pro Zeiteinheit und die exakte Masse der Probe. Die AMS-Methode bestimmt direkt den Anteil an C-14-Atomen in einer Kohlenstoffprobe.

**Probenmenge:** Die Probenmenge für eine AMS-Messung muss mindestens 0.5 mg Kohlenstoff betragen, mehr ist nicht notwendig. Bei der konventionellen C-14-Datierung dagegen ist die Probenmenge proportional zur Aktivität. Das bedeutet, dass die Messzeit für dieselbe Genauigkeit umso kleiner wird, je grösser die Probenmenge ist. Die Zählrohre sind jedoch nicht für Probenmengen über 10 g ausgelegt.

**Messzeit:** Die übliche Messzeit bei AMS ist kürzer als eine halbe Stunde. Bei der konventionellen Methode dauert eine Messung üblicherweise einige Tage bis Wochen.

**Präzision:** Die erreichbare Präzision beträgt bei beiden Methoden 0.2 -0.5 %.

**Altersbereich:** Beide Methoden können das Alter von bis zu 50000 Jahre alten Proben bestimmen.

## 4. Das Messresultat

Wie wir gesehen haben, misst man mit der AMS-Methode direkt das C-14/C-12-Verhältnis. Mit der konventionellen C-14-Methode bestimmt man die C-14-Aktivität (Anzahl Zerfälle pro Zeiteinheit). Kennt man dazu noch die Masse der Kohlenstoffprobe, so erhält man damit leicht das C-14/C-12-Verhältnis.

Dieses Verhältnis hat, da es ein Messwert ist, nur beschränkte Genauigkeit. Damit kann auch das wahre Alter (oder Kalenderalter), das daraus bestimmt wird, nur als Altersbereich angegeben werden.

Wie man vom C-14/C-12-Verhältnis zum Kalenderalter kommt, soll noch kurz erläutert werden:

Das C-14/C-12-Verhältnis wird durch eine standardisierte Umrechnung in ein sogenanntes Radiokarbon-Alter umgewandelt. Das Radiokarbon-Alter ist also ein anderes Mass für die C-14-Konzentration und hat ebenfalls einen gewissen Fehler (Messfehler müssen bei Umrechnungen immer mitberücksichtigt werden!).

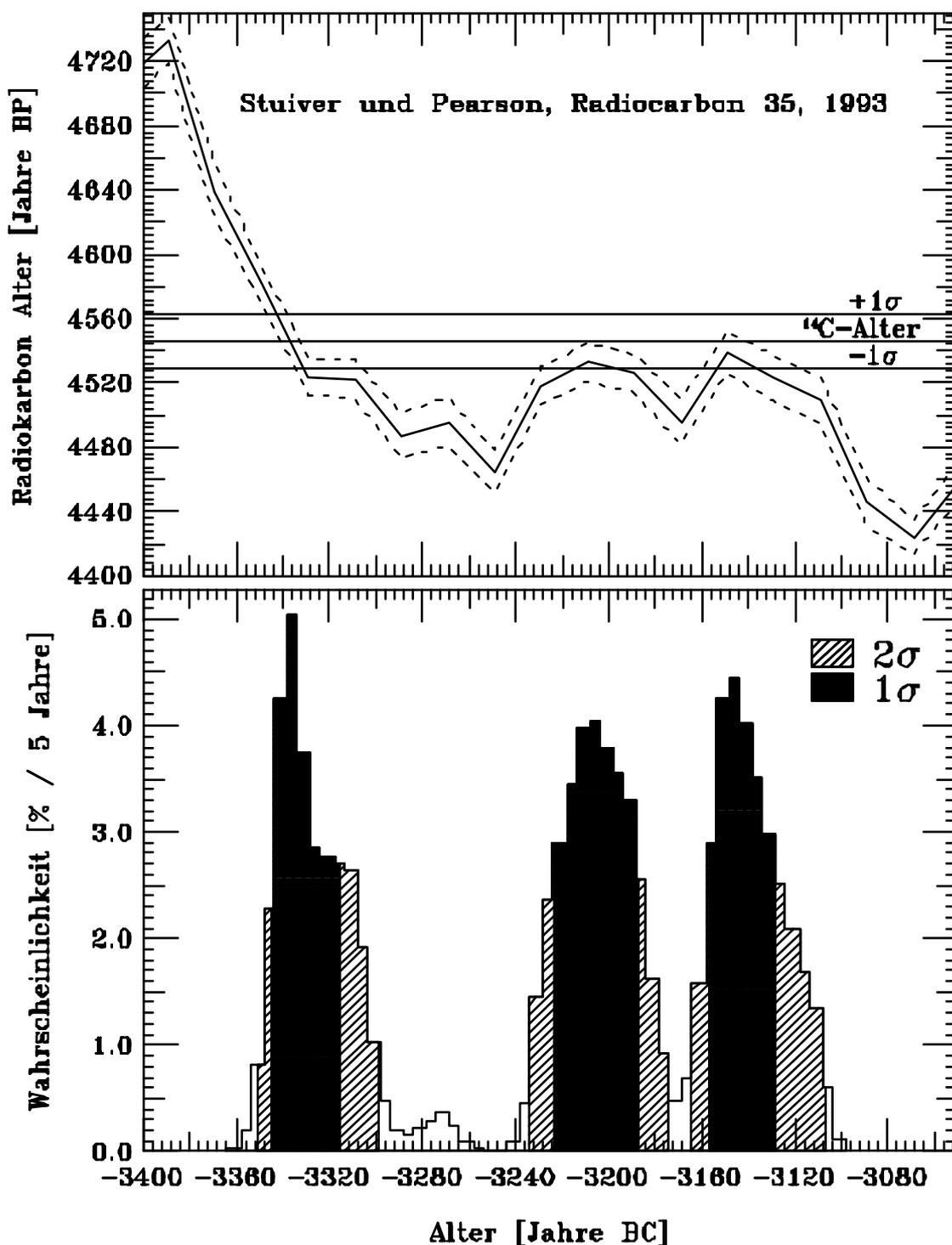
Gemessene Baumringe, deren Alter bekannt ist, erlauben eine Zuordnung des Radiokarbon-Alters zu einem wahren Alter.

Man muss also bei einer Probe das C-14/C-12-Verhältnis messen, diesen Wert in das Radiokarbon-Alter umrechnen und schauen welche Baumringe dasselbe Radiokarbon-Alter haben. Das wahre Alter dieser Baumringe ist dann auch das wahre Alter der Probe! Aufgrund der zeitlichen Schwankungen der C-14-Konzentration in der Atmosphäre ist es leider möglich, dass z.B. 2 verschieden alte Baumringe das gleiche Radiokarbon-Alter haben. Hat eine gemessene Probe eben dieses Radiokarbon-Alter, so ist eine eindeutige Alterszuordnung nicht mehr möglich. Es kommen die zwei verschiedenen Alter dieser Baumringe für das Alter der Probe in Frage.

In Bild 7 ist die Altersbestimmung vom Ötzi dargestellt. Die oben diskutierte Vorgehensweise soll daran veranschaulicht werden:

Die gemessene C-14-Konzentration von Kohlenstoff-Proben vom Ötzi ergeben ein Radiokarbon-Alter von 4546 Jahren (horizontale Linie im oberen Bild). Der Messfehler lässt nun einen ganzen Bereich im Radiokarbon-Alter als möglich zu (obere und untere horizontale Linie). Man sucht nun die Baumringe mit entsprechendem Radiokarbon-Alter (Zick-Zack-Linie ebenfalls mit Fehlerbalken). An den Schnittpunkten des Radiokarbon-Alters der Probe (mit Messfehler) mit der Zick-Zack-Linie der Baumringe (mit Messfehler) liegt das mögliche Alter der Probe (horizontale Achse). In 3 Zeitbereichen überlappt das Radiokarbon-Alter mit den Baumringwerten. Es sind also 3 Zeitbereiche für das Alter vom Ötzi möglich. Durch detaillierte Rechnungen sind die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Alterswerte vom Ötzi bestimmbar (unteres Bild). Hier muss man sich offensichtlich mit der Aussage begnügen, dass der Ötzi ein Alter zwischen 5400 und 5100 Jahren hat.

Gletschermann vom Hauslabjoch 4546 ± 17 BP



By CalibETH 1.5b

Copyright ETH Zuerich

Bild 7: Die Messung des C-14/C12-Verhältnisses beim Ötzi und das daraus folgende Radiokarbonalter ergeben durch den Vergleich mit den Baumringwerten drei mögliche Zeitbereiche für das wahre Alter vom Ötzi. Die drei Zeitbereiche sind ähnlich wahrscheinlich, sodass man sich mit der Aussage begnügen muss, dass der Ötzi zwischen 5400 und 5100 Jahre alt ist. (Prinot-Fornwagner, Niklaus 1994)

## 5. Ein Beispiel: Der Bundesbrief

An der ETH wurde anlässlich der 700-Jahr-Feier der Eidgenossenschaft der Bundesbrief datiert. Ob die Feier berechtigt war, lesen Sie im folgenden Artikel von W. Wölfli und G. Bonani. Dieser Artikel ist im Original-Wortlaut wiedergegeben. Er wurde aus den Mitteilungen des Historischen Vereins des Kantons Schwyz entnommen (Heft 84, 1992). Wir danken den Autoren und dem Historischen Verein des Kantons Schwyz für die Druckerlaubnis.

## Datierung des Bundesbriefes mit der Radiokarbonmethode

### 1. Einleitung

Der auf anfangs August 1291 datierte Bundesbrief ist, gemessen an seiner Bedeutung, ein eher unscheinbares Pergamentblatt von 320x200 mm Umfang. Es umfasst 17 Schriftzeilen und bildet, umgeben von verschiedenen später verfassten Bundesbriefen, das zentrale Ausstellungsobjekt im Saal des Bundesbriefarchivs zu Schwyz<sup>1</sup>. 1760 wurden erstmals der lateinische Text und die deutsche Übersetzung im Druck herausgegeben. Wo und von wem der Bundesbrief geschrieben wurde, ist heute nicht mehr auszumachen. Auf Grund verschiedener paläographischer und textlicher Merkmale sind neuerdings einige Historiker zum Schluss gelangt, dass dieses Dokument möglicherweise gar nicht 1291, sondern erst viel später, im 15. Jahrhundert, geschrieben, aber mit dem Datum des Ereignisses und nicht mit dem des Schreibens versehen wurde.

Ausgelöst durch diese Kontroverse entstand der Wunsch, das Alter des Pergaments mit Hilfe der Radiokarbonmethode zu überprüfen. Im folgenden wird zuerst das Prinzip dieser Altersbestimmungsmethode beschrieben. Anschliessend werden die Probenahme, Probenaufbereitung und das Resultat dieser Untersuchung beschrieben und diskutiert.

### 2. Die Radiokarbonmethode

Die in den Jahren 1946/47 von Libby und seinen Mitarbeitern entwickelte Radiokarbon- oder C-14-Methode nützt die Tatsache aus, dass in der oberen Atmosphäre unserer Erde durch Reaktionen von Sekundärneutronen der kosmischen Strahlung mit Stickstoff laufend das langlebige radioaktive Kohlenstoffisotop C-14 produziert wird. Zusammen mit den dort schon vorhandenen stabilen Kohlenstoffisotopen C-12 (99% Häufigkeit) und C-13 (1% Häufigkeit) gelangt es über den CO<sub>2</sub>-Kreislauf und die Nahrungskette in alle lebenden Organismen.

Das eingelagerte und langsam zerfallende C-14 wird durch den Stoffwechsel laufend ersetzt, d.h. die C-14-Konzentration bleibt konstant, solange der Organismus lebt. Sie entspricht, wenn man von biologischen Fraktionierungseffekten absieht, dem jeweiligen atmosphärischen Wert. Mit dem Tod hört der Austausch mit der Umwelt auf. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die C-14-Konzentration mit fortschreitender Zeit mit bekannter Rate ab. Durch Messung der in einer Probe noch vorhandenen C-14-Konzentration kann somit das Todesjahr von allen Lebewesen bestimmt werden.

Die C-14-Konzentration in organischen Proben kann auf zwei Arten bestimmt werden, entweder durch Messung der spezifischen Aktivität oder durch die Messung des C-14/C-12-Isotopenverhältnisses. Beide Grössen werden stets relativ zum Wert einer Standardprobe ermittelt. Dieser sogenannte NBS-Standard hat eine spezifische Aktivität von 14 Zerfällen pro Minute und Gramm Kohlenstoff, was einem Isotopenverhältnis von ziemlich genau  $C-14/C-12=10^{-12}$  entspricht. Gemäss einer internationalen Vereinbarung wird zur Berechnung des Alters immer noch die alte, von Libby bestimmte Halbwertszeit von 5568 Jahren und nicht der inzwischen genauer bestimmte Wert von  $5730\pm 40$  Jahren benützt. Die so gewonnene Grösse wird als konventionelles C-14-Alter bezeichnet und in Jahren BP (before present) angegeben, wobei 1950 AD (Anno Domini) als Bezugsjahr genommen wird.

Das Problem der Radiokarbonmethode liegt in der Forderung, dass die in der Natur vorkommenden, äusserst geringen spezifischen Aktivitäten bzw. Isotopenverhältnisse mit extrem hoher Genauigkeit gemessen werden müssen. Ein Messfehler von 1% führt, umgerechnet auf das Alter, zu einer Unsicherheit von plus/minus 83 Jahren, wobei die Wahrscheinlichkeit, das konventionelle C-14-Alter in diesem Streubereich, dem sogenannten ein Sigma ( $1\sigma$ ) Fehler, zu finden, bloss 68% beträgt.

Apparativ am einfachsten ist die Messung der Aktivität einer Probe, weil dazu lediglich ein gut abgeschirmtes Geiger-Müller-Zählrohr oder ein Szintillationszähler benötigt wird. Diese von Libby eingeführte Messtechnik hat aber den Nachteil, dass für eine einwandfreie Datierung viel Material, mindestens einige Gramm Kohlenstoff, benötigt wird und erst noch lange Messzeiten in der Grössenordnung von Tagen, wenn nicht Wochen, in Kauf genommen werden müssen. Mit der 1977 entdeckten Beschleunigermassenspektrometrie-Methode (AMS, Abkürzung für Accelerator Mass Spectrometry) entfielen diese Einschränkungen, weil hier nicht auf den seltenen radioaktiven Zerfall gewartet wird, sondern die in einer Probe vorhandenen C-14-Atome mit hoher Effizienz einzeln gezählt werden. Das ist allerdings nur mit einem erheblichen instrumentellen Aufwand möglich. Anstelle eines einfachen Teilchenzählers wird eine speziell für diese Aufgabe ausgerüstete Teilchenbeschleunigeranlage benötigt. Dieser Nachteil wird aber kompensiert durch die Tatsache, dass auf diese Weise Proben von wenigen Milligramm Kohlenstoff innerhalb von wenigen Minuten mit hoher Präzision datiert werden können. Die Reduktion der Probenmengen um drei und die Verkürzung der Messzeiten um zwei bis drei Grössenordnungen eröffnete der C-14-Methode ein breites Spektrum neuer Anwendungsmöglichkeiten, die von praktisch zerstörungsfreien Altersbestimmungen historisch und archäologisch wichtiger Objekte über die Messung der Sonnenaktivitäten bis hin zur Entschlüsselung der Klimageschichte unserer Erde reichen. Eine ausführliche Beschreibung des Prinzips der AMS-Methode und ihrer vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten findet man in der Fachliteratur<sup>2</sup>.

### 3. Probennahme, Probenaufbereitung, Messung und Resultate

Die Probennahme fand am 5. Juni 1991 im Bundesbriefarchiv in Schwyz statt (Fig. 1). Ein ca. 15 mm breiter Streifen (Plica) des unteren, unbeschriebenen Endes des Bundesbriefs ist umgelegt und im Bereich der übereinanderliegenden Teile durchgehend an drei Stellen so geschlitzt, dass Bänder durchgezogen und die drei Siegel (dasjenige von Schwyz fehlt heute) daran befestigt werden konnten. Durch eine kaum wahrnehmbare Verbreiterung der durch die Plica verdeckten Schlitze konnten drei Kleinstproben im Gesamtgewicht von 12.1 Milligramm entnommen werden, ohne die äussere Erscheinung des Dokumentes im geringsten zu beeinträchtigen. Die Proben wurden fotografiert, gewogen und anschliessend im Labor mechanisch mit Ultraschall und chemisch schrittweise, zuerst im Säurebad (HCl), dann mit Lauge (NaOH) und schliesslich nochmals mit Säure gereinigt, um allfällige Kontaminationen mit Huminsäure und/oder Karbonaten zu eliminieren. Jede Teilprobe wurde im Vakuum zu CO<sub>2</sub> oxydiert und schliesslich mit Hilfe einer katalytischen Reaktion an Kobalt zu graphitähnlichem Kohlenstoff reduziert. Sie



Abbildung 1: Probennahme im Bundesbriefarchiv am 5. Juni 1991, Prof. Dr. Willy Woelfli (links) und Dr. Georges Bonani (rechts).

wurden im Rahmen einer im Mittel alle vier Wochen stattfindenden C-14-Messperiode, zusammen mit weiteren 120 Proben (inkl. Standards, d. h. Material mit einer bekannten C-14-Konzentration, und Blanks, d.h. Material ohne C-14) datiert. Von jeder Probe wurden die C-14/C-12- und C-13/C-12-Isotopenverhältnisse relativ zu den entsprechenden Standardwerten bestimmt. Beide Werte können mit der von uns angewendeten Messtechnik an derselben Probe gleichzeitig bestimmt werden. Die relative Abweichung des gemessenen  $\sigma$

C-13-Werts in ‰ von demjenigen des C-13-Standards ( $\sigma$  C-13 = 0‰) gibt Aufschluss über die Grösse allfälliger biologischer und physikalischer Fraktionierungseffekte und muss bei der Berechnung des konventionellen C-14-Alters berücksichtigt werden<sup>3</sup>. Für die drei vom Bundesbrief stammenden Teilproben wurden die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Resultate ermittelt:

| Lab. Nr.   | Probenlabel | Konvent. C-14-Alter (yr BP) | $\sigma$ C-13 (‰) |
|------------|-------------|-----------------------------|-------------------|
| ETH-7804-1 | BB-1        | 706±47                      | -20.5±1.4         |
| ETH-7804-2 | BB-2        | 683±45                      | -18.3±1.0         |
| ETH-7804-3 | BB-3        | 714±45                      | -21.7±1.0         |

Die gewichtete Mittelung dieser drei unabhängigen Messresultate liefert für das konventionelle C-14-Alter des Bundesbriefpergaments einen Wert von 700±35 Jahren BP. Obwohl das konventionelle C-14-Alter zufälligerweise genau dem erwarteten Alter entspricht, ist dies noch nicht das Endresultat, weil noch zwei wichtige Korrekturen angebracht werden müssen, die sich im vorliegenden Fall aber glücklicherweise fast vollständig kompensieren. Die erste Korrektur betrifft, wie bereits erwähnt, die zur Berechnung des konventionellen Alters benützte "Libby"-Halbwertszeit von 5568 Jahren. Sie muss durch den genaueren Wert von 5730 Jahren ersetzt werden. Diese Korrektur vergrössert das Probenalter um rund 3%. Die zweite Korrektur berücksichtigt die Tatsache, dass das C-14-Inventar in der Atmosphäre nicht wie bei der Berechnung des konventionellen Alters zunächst angenommen wird, über alle Zeiten konstant gewesen war. Auf Grund von sehr sorgfältigen und hochpräzisen Messungen der C-14-Konzentrationen im Holz von langlebigen amerikanischen Borstenkiefern und europäischen Eichen, deren Jahrringsequenzen bisher lückenlos über die letzten 10'000 Jahre aneinandergereiht werden konnten, wissen wir, dass die C-14-Produktion in diesem Zeitraum erheblich, und zwar sowohl kurzzeitig wie auch im Langzeittrend von dem dem Basisjahr 1950 zugeordneten Wert abweicht. Im 13. Jahrhundert lag die C-14-Produktionsrate etwas tiefer als 1950, d.h. die Berücksichtigung dieses Effekts "verjüngt" das Probenalter. Für die mathematisch nicht ganz triviale Umwandlung des konventionellen C-14-Alters, unter Berücksichtigung des durch eine Gaussverteilung charakterisierten Messfehlers, in das entsprechende Kalenderalter stehen Rechenprogramme zur Verfügung<sup>4</sup>. Das Resultat dieser Transformation ist in Fig. 2 dargestellt. Die obere Hälfte zeigt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem konventionellen C-14-Alter und dem Kalenderalter als Folge der zeitlich variierenden Produktionsschwankungen in dem hier interessierenden Bereich. Die drei horizontalen Linien markieren das experimentell ermittelte konventionelle C-14-Alter mit dem zugehörigen  $1\sigma$ -Fehlerbereich. In der unteren Hälfte der Figur ist die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung für den entsprechenden wahren Altersbereich unter Berücksichtigung der Produktionsschwankungen dargestellt. Der dunkel schraffierte Bereich entspricht dem  $1\sigma$ -Fehlerbereich und sagt aus, dass das gesuchte Alter mit einer

Wahrscheinlichkeit von rund 68% irgendwo zwischen den Grenzen dieses Bereichs liegen muss, d.h. zwischen 1265 AD und 1295 AD. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 32% kann das wahre Alter auch ausserhalb liegen, allerdings nicht beliebig weit vom Mittelwert entfernt. Verdoppelt man nämlich den  $1\sigma$ -Fehler um einen Faktor 2, d.h. auf  $2\sigma$ , dann erhöht sich die Wahrscheinlichkeit auf 95%, das wahre Alter im entsprechend erweiterten Bereich zu finden. Dieser Bereich ist in der Figur durch seine einfache Schraffur erkennbar. Als Folge des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen dem konventionellen C-14-Alter und dem wahren Alter wird im vorliegenden Fall der erlaubte Altersbereich nicht einfach nur vergrössert, sondern sogar in zwei getrennte Bereiche aufgetrennt. Das Integral über beide Bereiche liefert die Wahrscheinlichkeit, das wahre Alter in einem dieser Bereiche zu finden mit folgendem Ergebnis: Mit einer Wahrscheinlichkeit von 85% liegt das wahre Alter zwischen 1252 und 1312 AD. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 15% könnte es aber auch irgendwo zwischen 1352 und 1385 AD liegen.

#### **4. Schlussfolgerungen**

Die Altersbestimmung des Bundesbriefpergaments hat zwei mögliche Zeitbereiche ergeben, wobei das angegebene Datum 1291 innerhalb des älteren und auch wesentlich wahrscheinlicheren Zeitbereichs liegt. Die Vermutung, dass der Brief erst im 15. Jahrhundert geschrieben wurde, kann auf Grund der vorliegenden Messungen mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Die Möglichkeit, dass der Brief erst in der zweiten Hälfte des 14. Jahrhunderts geschrieben wurde, kann zwar nicht völlig ausgeschlossen werden, ist aber nicht nur aus methodischen, sondern auch aus historischen Gründen wenig wahrscheinlich. In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass der vorliegende Test nur eine Aussage über das Alter des Pergaments und nicht über den Zeitpunkt des Schreibens liefert. Es ist aber wiederum sehr unwahrscheinlich, dass ein Pergament präpariert und dann viele Jahre unbeschrieben liegen blieb. Aus dem Altertum ist hingegen bekannt, dass Schriftrollen über längere Zeiträume mehrmals benützt wurden. Solche Palimpseste können heute mit einem Infrarottest leicht identifiziert werden. Es wäre angebracht, mit Hilfe eines solchen Tests diese Möglichkeit auch im Fall des Bundesbriefs auszuschliessen.

#### **5. Verdankungen**

Die vorliegende Arbeit wurde von Peter Lippuner, Redaktionsleiter Naturwissenschaft, Technik und Medizin, und Hans-Peter Sigrist, Redaktor Menschen, Technik, Wissenschaft des Schweizer Fernsehens DRS, initiiert und organisiert. Die Probennahme ermöglichten Franz Auf der Maur, Archivadjunkt, und Erwin Horat, Archivar am Staatsarchiv Schwyz. Irka Hajdas war verantwortlich für die Probenaufbereitung. Wir danken allen Beteiligten für ihren Einsatz und die erfreuliche Zusammenarbeit.

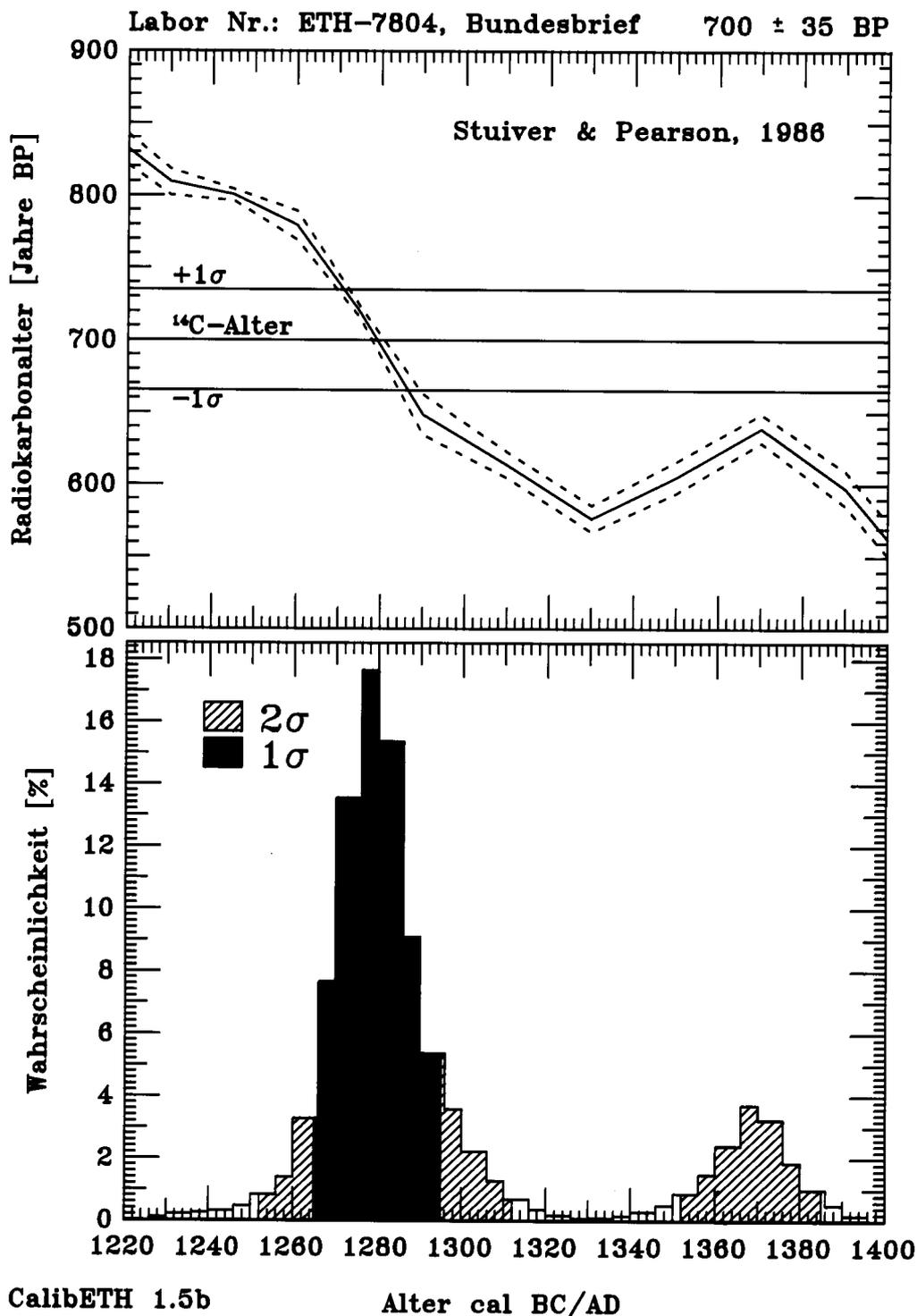


Abbildung 2: Transformation des experimentell bestimmten C-14-Alters in dem entsprechenden wahren Altersbereich unter Berücksichtigung des Messfehlers. Die obere Hälfte zeigt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem konventionellen C-14-Alter und dem Kalenderalter im hier interessierenden Bereich. Die drei horizontalen Linien markieren das gemessene C-14-Alter mit zugehörigem  $1\sigma$ -Fehler. In der unteren Hälfte ist die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung für den wahren Altersbereich in Form eines Histogramms dargestellt, und zwar für die beiden am häufigsten verwendeten Fehlergrenzen. Der  $1\sigma$ -Bereich ist schwarz markiert und bedeutet, dass das gesuchte wahre Alter mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% innerhalb dieses Bereichs liegt. Durch Verdoppelung des Fehlers ( $2\sigma$ -Fehler) vergrößert sich die Unsicherheit um den gestrichelten Bereich. Dafür steigt die Wahrscheinlichkeit auf 95%, das wahre Alter innerhalb der beiden Bereiche zu finden. Der wahrscheinlichste Wert liegt um 1280 AD herum.

## 6. Literatur

1. *Eine ausführliche Beschreibung des Dokuments findet sich in: P. Ladner, Urkundenkritische Bemerkungen zum Bundesbrief von 1291, in: Mitteilungen des Historischen Vereins des Kantons Schwyz, Heft 83, 1991, S. 93-110.*
2. *W. Woelfli, Advances in accelerator mass spectrometry, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, Vol. B29 (1987) S. 1-32.*
3. *M. Stuiver and H.A. Polach, Radiocarbon, Reporting of C-14-Data, Vol. 19 (1977), S. 355-363.*
4. *Th. Niklaus, G. Bonani, M. Simonius, M. Suter and M. Woelfli, An interactive computer program for the calibration of radiocarbon dates, Radiocarbon, Vol, 34 (1991)*

## Mediothek für den Schüler und Schülerinnen

Folgende Literatur steht in diesem Kapitel zur Wahl:

- Wölfli W., Bonani G.:  
Datierung des Bundesbriefs mit der Radiokarbonmethode  
Sonderdruck des Historischen Vereins des Kantons Schwyz  
Heft 84 (1992)
- H. Mommsen:  
Archäometrie (Seiten 230 - 234)  
Stuttgart 1986  
(Teubner-Verlag)
- Damen. P.E. et al.:  
Radiocarbon dating of the Shroud of Turin  
Nature, Vol 337, No. 6208, Seiten 611 - 615  
16. Februar 1989
- York D.:  
Die Frühzeit der Erde  
Spektrum der Wissenschaft  
März 1993 Seiten 76 - 83

## Lösungen zu den Aufgaben im Additum

### Aufgabe A.1

Sicher haben Sie im Lexikon 3 weitere Ereignisse, die Sie interessant finden, gefunden und zeitlich richtig eingeordnet.

### Aufgabe A.2

C-12 stabil

C-13 stabil

C-14  $\beta$ -Zerfall      Halbwertszeit 5730 Jahre

### Aufgabe A.3

Die Konzentration wurde 3-mal halbiert, d.h. die Probe ist  $3 \cdot 5730 = 17190$  Jahre alt.

### Aufgabe A.4

Die Messgrenze ist ca. 1000-mal tiefer als die moderne Konzentration. Nach 10 Halbwertszeiten hat die Konzentration um den Faktor  $2^{10} = 1024$  abgenommen. Damit liegt die Messgrenze ca. bei  $10 \cdot 5730 = 57300$  Jahren.

### Aufgabe A.5

$1.5 \cdot 10^{-12}$  ist eine C-14-Konzentration, die erst mit den Atombombenexplosionen erreicht wurde. Es handelt sich bei diesem Kunstobjekt also eindeutig um eine Fälschung. Diese Aufgabe ist nicht erfunden, sondern entspricht einer Messung an der ETH in Zürich!

### Aufgabe A.6

Im Vergleich zum vorangehenden Beispiel ist hier die Probenmenge 1000x kleiner (1 mg statt 1 g) und die Probe ist so alt, dass die Aktivität auch 1000x geringer ist als bei einer modernen Probe. Damit ergeben sich 1 Million-mal weniger Zerfälle! Dies sind dann gerade noch 7.25 Zerfälle in einem Jahr! Eine solche Messung ist nicht möglich.

## Aufgabe A.7

10 % Genauigkeit verlangt gemäss Statistik 100 gezählte Ereignisse.

Mit der AMS-Methode misst man bei einer modernen Probe ca. 50 C-14-Atome pro Sekunde. Die vorliegende Probe hat eine 4-mal niedrigere Konzentration und muss daher 8 Sekunden lang gemessen werden.

Konventionell liefert eine moderne Probe der Masse 1 g 13.8 Zerfälle pro Minute. Diese Probe hat aber eine 4-mal kleinere Aktivität und eine 1000-mal kleinere Masse. Das ergibt noch knapp 5 Zerfälle pro Tag. Um 100 Zerfälle zu messen braucht man also rund 20 Tage! Anders gesagt sind Messungen mit der konventionellen Methode nur möglich, wenn mindestens 1 g Kohlenstoff für die Messung zur Verfügung steht.

## Lernkontrolle für den Schüler

### Kontrollfrage A.1

Wie kommt C-14 in ein Pferd hinein?

Führen Sie sich das Bild der C-14-Produktion vor Augen!

### Kontrollfrage A.2

- Wieviel C-14-Atome enthält 1 g Kohlenstoff, der 5730 Jahre alt ist?
- Wie lange müssen Sie diese Probe mit der konventionellen C-14-Methode messen um 1000 Zerfälle zu detektieren?
- Wie lange geht die Messung mit der AMS-Methode, wenn Sie 1000 C-14-Atome nachweisen wollen?

a) und b) sollten Sie ohne Hilfe lösen können, für c) müssen Sie wohl im Abschnitt AMS nachschauen!

### Kontrollfrage A.3

Sie wollen eine C-14-Messung mit einer bestimmten Genauigkeit machen (z.B. 1%) Wie ändert sich die Messzeit, wenn Sie statt 1 g Probenmaterial 10 g kriegen?

- bei der konventionellen C-14-Methode
- bei der AMS-Methode

## Lösungen zu den Kontrollfragen

### Kontrollfrage A.1

- C-14 wird in der oberen Atmosphäre durch die kosmische Strahlung aus N-14 erzeugt.
- Das C-14 oxidiert zu CO<sub>2</sub> genau wie C-12.
- Das radioaktive CO<sub>2</sub> wird über die ganze Atmosphäre gleich mit dem stabilen CO<sub>2</sub> durchmischt.
- Die Pflanzen nehmen bei der Photosynthese CO<sub>2</sub> auf und geben O<sub>2</sub> ab. Sie bauen also den Kohlenstoff in ihren Organismus ein. Das läuft für C-14 genauso ab wie für C-12!
- Durch die Nahrungsaufnahme kommt der Kohlenstoff auch in das Pferd (z.B. durch das Fressen von Gras oder Möhren).
- Damit hat das Pferd dasselbe C-14/C-12-Verhältnis wie die Atmosphäre!

### Kontrollfrage A.2

1g Kohlenstoff enthält  $6 \cdot 10^{23} / 12$  Kohlenstoffatome

moderne Probe: C-14/C-12 =  $1.2 \cdot 10^{-12}$

eine 5730 Jahre alte Probe enthält halb soviel C-14 wie eine moderne Probe

==>> Die Probe enthält  $(6 \cdot 10^{23} / 12) \cdot 1.2 \cdot 10^{-12} / 2 = 3 \cdot 10^{10}$  C-14 Atome

Aktivität A =  $3 \cdot 10^{10} \cdot \lambda = 3 \cdot 10^{10} / 8267$  Zerfälle pro Jahr  
= 6.9 Zerfälle pro Minute

Für 1000 Zerfälle muss man also 145 Minuten lang messen!

Mit der AMS-Methode zählt man für eine moderne Probe 50 C-14-Atome pro Sekunde. Für die 5730 Jahre alte Probe muss man also 40 Sekunden lang messen, um 1000 Ereignisse zu registrieren.

### Kontrollfrage A.3

Bei der konventionellen Methode haben Sie bei 10x mehr Probenmaterial 10x kürzere Messzeiten.

Bei der AMS-Methode genügen einige mg Kohlenstoff zur Messung. Mehr brauchen Sie nicht! Die Messzeit bleibt unverändert!

## **Kapitel-Test für den Tutor**

Wie im Lernziel bereits erwähnt, sollen Sie drei Folien gestalten, um Ihren Mitschülern die C-14-Methode zu erläutern. Am besten machen Sie dies anhand eines Beispiels (z.B. Ötzi, Bundesbrief oder aus dem Literaturstudium: Turiner Grabtuch oder Vulkanausbruch von Thera).

Der Tutor-Test besteht, da dies ja ein Additum und kein eigentliches Kapitel ist, lediglich darin, dass Sie dem Tutor Ihre 3 Folien zeigen und dazu erläutern, was Sie Ihren Mitschülern erklären wollen.

Ihr Lehrer wird dann entscheiden, wer diesen Kurzvortrag wirklich hält.



---

## Anhang

### Anhang 1: Mediothek für die Schüler und Schülerinnen

Buch 1: Dorn-Bader: Physik in einem Band. Hannover 1989 (Schroedel-Verlag).  
*In allen Kapiteln zu benutzen.*

Buch 2: Volkmer M.: Die natürliche Strahlenbelastung. Hamburg 1980 (Leybold-Heraeus).

*Zu benutzen in Kapitel 1 und 3.*

Buch 3: Volkmer M.: Basiswissen zum Thema Kernenergie. Hamburg 1980 (Leybold-Heraeus).

*Zu benutzen in Kapitel 1.*

Buch 4: Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik. Berlin Heidelberg 1982. 14. Auflage. (Springer-Verlag).

*Zu benutzen in Kapitel 1.*

Buch 5: Dorn-Bader: Physik Oberstufe 12/13. Hannover 1986 (Schroedel-Verlag).

*Zu benutzen in Kapitel 1.*

Buch 6: Kuhn: Quantenphysik. Braunschweig. (Westermann-Verlag).

*Zu benutzen in Kapitel 1.*

Buch 7: Höfling: Physik, Band II, Teil 3. Bonn 1986 (Dümmler-Verlag).

*Zu benutzen in Kapitel 1.*

Buch 8: Gross Berhag: Atome, Kerne, Quanten. Stuttgart 1987 (Ernst Klett Verlag).

*Zu benutzen in Kapitel 2.*

Buch 9: Schenk E: Mein Name ist Becquerel. München 1993 (dtv).

*Zu benutzen in Kapitel 2.*

Buch 10: Christen Hans Rudolf: Chemie. Frankfurt am Main 1984, 12. Auflage (Moritz Diesterweg).

*Zu benutzen in Kapitel 4.*

Buch 11: Knodel, H. Bayrhuber zusammen mit U. Bässler, A. Danzer, U. Kull: Linder Biologie. Stuttgart 1986, 19. Auflage (J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung).

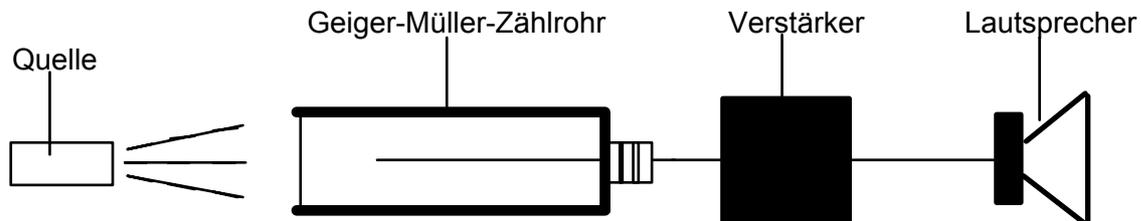
*Zu benutzen in Kapitel 4.*

## Anhang 2: Experimentier- und anderes Material für die Schüler

### Kapitel 3

Alle benötigten Geräte und Bauteile finden Sie im "Gerätesatz Radioaktivität", Katalog-Nr. 559 44 (siehe M. Volkmer: Radioaktivität im Schülerversuch. Köln 1980 (Leybold Heraeus)).

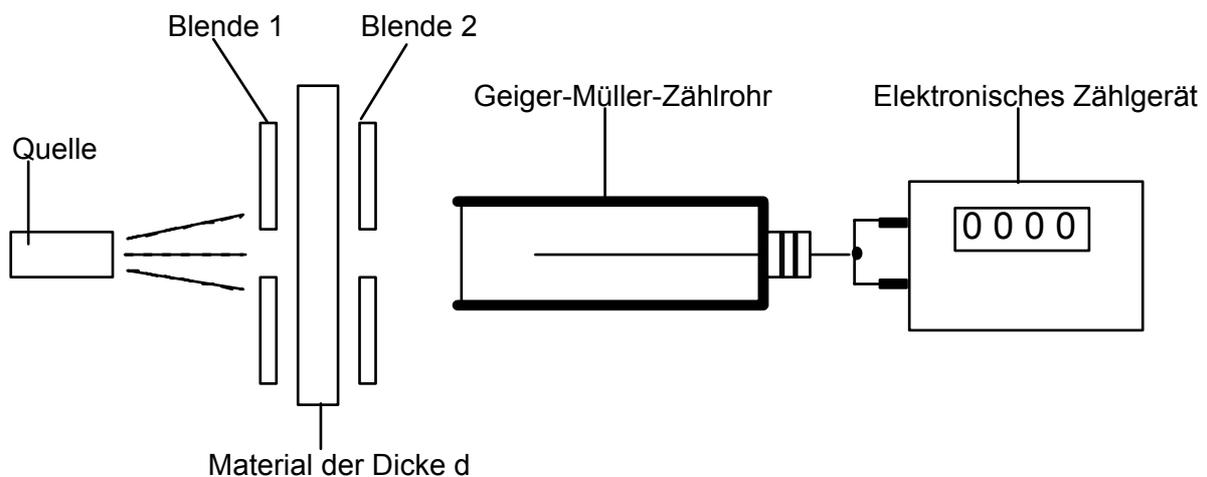
#### Experiment 3.1



Materialien:

- Geiger-Müller-Zählrohr
- Verstärker
- Lautsprecher
- geeignete radioaktive Quelle ( $\alpha$ -Strahler)

#### Experiment 3.2



Materialien:

- Geiger-Müller-Zählrohr
- geeignete radioaktive Quelle (mit  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Strahlung)
- elektronisches Zählgerät
- 2 Bleiblenen
- Abschirmmaterialien:
  - a) Papier: einige Blätter Papier (siehe Dorn-Bader 1989, 521f)
  - b) Blei: verschieden dicke Bleiplättchen (je nach Aktivität der Quelle)

---

## **Anhang 3: Vom Autor benutzte Quellen**

### **Als Grundlage benutzte Quellen**

#### **Kapitel 1**

Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik. Berlin Heidelberg 1982, 14. Auflage (Springer-Verlag).

Frauenfelder H., Henley E. M.: Teilchen und Kerne. München Wien 1979 (Oldenbourg Verlag).

Persico E.: Gli atomi e la loro energia. Bologna 1978 (Zanichelli).

#### **Kapitel 2**

Dorn F., Bader F.: Physik in einem Band. Hannover 1989 (Schröedel-Verlag).

Dorn F., Bader F.: Physik Oberstufe 12/13. Hannover 1986 (Schröedel-Verlag).

Gerthsen C., Kneser H. O., Vogel H.: Physik (15. Auflage). Berlin/Heidelberg 1989 (Springer-Lehrbücher).

Henk H. H.: Die zivilisatorisch bedingte Strahlenbelastung. Hamburg 1980(Leybold-Heraeus).

Institut für Radiochemie: Nuklidkarte. Karlsruhe 1981(Kernforschungszentrum Karlsruhe).

Schenk E.: Mein Name ist Becquerel. München 1993 (dtv).

Schröder H.: Kernphysik (Studienbücher Physik). Aarau 1983 (Diesterweg/Salle-Sauerländer).

Segrè E.: Die grossen Physiker und ihre Entdeckungen. München 1981 (R. Piper & Co. Verlag).

Volkmer M.: Basiswissen zum Thema Kernenergie. Hamburg 1980 (Leybold-Heraeus).

Volkmer M.: Die natürliche Strahlenbelastung. Hamburg 1980 (Leybold-Heraeus).

#### **Kapitel 3**

Volkmer M.: Radioaktivität im Schülerversuch. Köln 1980 (Leybold-Heraeus).

Dorn-Bader: Physik in einem Band. Hannover 1989 (Schroedel-Verlag).

Niederer U.: Kernenergie: Grundlagen, Fakten, Probleme. Zürich 1990 (Universität Zürich).

Grehn J. (Hrsg.): Metzler Physik. Stuttgart 1991, 2. Auflage (J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung).

Kuhn: Physik. Band III. Braunschweig 1976 (Westermann).

Schwenk E.: Mein Name ist Becquerel. München 1993 (dtv).

#### **Kapitel 4**

Dorn-Bader: Physik in einem Band. Hannover 1989 (Schroedel-Verlag).

---

---

Knodel H., Bayrhuber H. zusammen mit Bässler U., Danzer A., Kull U.: Linder Biologie. Stuttgart 1986, 19. Auflage (J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung).

Niederer U.: Kernenergie: Grundlagen, Fakten, Probleme. Zürich 1990 (Universität Zürich).

Petzold W.: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. Stuttgart 1983 (Teubner).

Arbeitsgruppe Kinder und atomare Bedrohung: Atom. Basel 1988.

Schweizerische Physikalische Gesellschaft: Strahlung und Mensch. Zürich 1992.

Kiefer H., Koelzer W.: Strahlen und Strahlenschutz. Heidelberg 1986, 2. Auflage (Springer).

### **Additum: C-14 oder Radiokarbonmethode**

Geyh M.A.: Absolute Age Determination New York 1990 (Springer Verlag)

Niklaus T.R.: Beschleunigermassenspektrometrie von Radioisotopen Zürich 1993  
Diss. ETH Nr. 10065

Prinoth-Fornwagner R., Niklaus T.R.: The man in the ice: results from radiocarbon dating  
NIM B 92 (1994) 282 - 290

### **Zitierte Quellen**

#### **Kapitel 1**

Frauenfelder H., Henley E. M.: Teilchen und Kerne. München Wien 1979 (Oldenbourg Verlag).

Manuzio G., Passatore G.: Verso la fisica. Milano 1981 (Principato).

Niederer U.: Kernenergie: Grundlagen, Fakten, Probleme. Zürich 1990 (Universität Zürich).

#### **Kapitel 2**

Segrè E.: Die grossen Physiker und ihre Entdeckungen. München 1981 (R. Piper & Co. Verlag).

#### **Kapitel 3**

Niederer U.: Kernenergie: Grundlagen, Fakten, Probleme. Zürich 1990 (Universität Zürich).

Kuhn: Physik. Band III. Braunschweig 1976 (Westermann).

Dorn-Bader: Physik in einem Band. Hannover 1989 (Schroedel-Verlag).

Schweizerische Physikalische Gesellschaft: Strahlung und Mensch. Zürich 1992.

**Kapitel 4**

Niederer U.: Kernenergie: Grundlagen, Fakten, Probleme. Zürich 1990 (Universität Zürich).

Arbeitsgruppe Kinder und atomare Bedrohung: Atom. Basel 1988.

Petzold W.: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. Stuttgart 1983 (Teubner).

Schweizerische Physikalische Gesellschaft: Strahlung und Mensch. Zürich 1992.

Kiefer H., Koelzer W.: Strahlen und Strahlenschutz. Heidelberg 1986, 2. Auflage (Springer).

Martignoni K.: Die somatische Strahlenwirkung. PdN-B. 4/36. Jahrgang 1987.

**Additum: C-14 oder Radiokarbonmethode**

Mostler G.: Erdkundliches Lehrbuch zum DIERCKE Weltatlas, Die Erde (11. Auflage) Braunschweig 1981 (Westermann Verlag)

Knaurs Lexikon Zürich 1974  
(Buchclub Ex Libris)

Prinoth-Fornwagner R., Niklaus T.R.: The man in the ice: results from radiocarbon dating  
NIM B 92 (1994) 282-290

## Anhang 4: Kapiteltests für den Tutor

Dieser Anhang enthält die Aufgaben für den Kapiteltest mit den dazugehörigen Musterlösungen.

Sie können auch andere Fragen stellen. Das wichtigste dabei ist, dass Sie am Schluss das Gefühl haben, Ihre Schüler beherrschen den Stoff so gut, dass sie ihn einem Laien erklären können.

### Test zu Kapitel 1

#### Lernziele für den Tutor Kapitel 1

Die Schüler sollen:

1. problemlos mit den Zehnerpotenzen arbeiten können.
2. Kenntnisse von der Atomstruktur und der Kernstruktur haben. Sie sollten wissen, welche Experimente darauf hinweisen, dass die Materie aus Atomen besteht.
3. wissen, was Elemente und ihre Isotope sind.
4. wissen, warum ein Nukleon in einem Kern Bindungsenergie besitzt.

#### Test 1.1:

Was bedeuten 1 mm; 1 ps; 1 dl; 1kg?

#### Test 1.2:

Welches Bild der Materie ergibt sich nach dem Experiment von Rutherford?

#### Test 1.3:

- a) Zählen Sie einige subatomare Teilchen auf.
- b) Aus welchen Teilchen besteht der Atomkern?

#### Test 1.4:

Die Kerne bestehen ausschliesslich aus Protonen und Neutronen, deren Massen sich nur um etwa 1‰ unterscheiden. Deswegen würde man erwarten, dass die relativen Atommassen nahezu ganzzahlige Vielfache der relativen Atommasse des H-Atoms sind. Wieso ist es nicht so?

**Test 1.5:**

Sie haben in einer Aufgabe die Energiegewinnung aus Kernspaltung berechnet. Neben der Kernspaltung gibt es auch noch die Möglichkeit, durch "Verschmelzen" von Kernen Energie zu gewinnen. Man nennt dies Kernfusion. Die Kernfusion ist bis jetzt nicht wirtschaftlich, jedoch funktioniert die Sonne nach diesem Prinzip.

**Welche Nuklide eignen sich für Fusionsprozesse?**

**Lösungen: Test Kapitel 1****Test 1.1 (K1)**

$10^{-3}$  Meter;  $10^{-12}$  Sekunden; 0.1 Liter; 1000 g.

**Test 1.2 (K2)**

Die Materie ist zum grössten Teil leer. Sie besteht aus Atomen (Durchmesser ca.  $10^{-10}$  m), deren gesamte Masse praktisch in ihren Kernen (Durchmesser ca.  $10^{-15}$  m) konzentriert ist. Die Kerne haben eine Materiedichte von der Grössenordnung  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>.

**Test 1.3 (K1)**

- a) Das Proton, das Neutron, das Elektron.
- b) Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen.

**Test 1.4 (K2)**

Chemisch reine Elemente bestehen aus Isotopen. Für die Bestimmung der relativen Atommasse muss man deshalb das gewichtete Mittel der relativen Atommassen der verschiedenen Isotope nehmen.

**Test 1.5 (K3)**

Aufgrund der Abbildung 1.4 über Bindungsenergie pro Nukleon müssen leichte Kerne verwendet werden. Die Bindungsenergie pro Nukleon muss für den zusammengesetzten Kern höher sein als für die (beiden) einzelnen.

Kernfusion findet statt bis Eisen (Fe).

In der Sonne wird Wasserstoff (H) zu Helium (He) fusioniert.

## **Test zu Kapitel 2**

### **Test 2.1:**

Bei welcher Strahlungsart werden die Nukleonen weder ausgesandt noch umgewandelt?

### **Test 2.2:**

Bestimmen Sie mit Hilfe der Nuklidkarte die Halbwertszeit von N-18.

### **Test 2.3:**

Die Halbwertszeit von C-14 beträgt rund 5730 Jahre. Welcher Anteil einer C-14 Probe zerfällt innerhalb eines Jahres?

### **Test 2.4:**

Die Tochter Pb-206 könnte aus 3 verschiedenen Mutternukliden entstanden sein.

Nennen Sie die 3 Mutternuklide und die dazugehörenden Zerfallstypen.

---

**Lösungen: Test Kapitel 2****Test 2.1 (K1)**

Beim  $\gamma$ -Zerfall wird Energie aus dem Kern in Form von  $\gamma$ -Quanten emittiert. Dieser Energieabbau hat keine Veränderung der Kernzusammensetzung zur Folge.

**Test 2.2 (K2)**

Die Halbwertszeit von N-18 beträgt 0.63 s.

**Test 2.3 (K3)**

Diese beträgt  $1,21 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ . In einem Jahr zerfallen also rund  $12/100'000$  der C-14 Kerne dieser Probe.

**Test 2.4 (K3)**

Bi-206  $\rightarrow$  Pb-206. Bi-206 ist ein  $\beta^+$ -Strahler.

Tl-206  $\rightarrow$  Pb-206. Tl-206 ist ein  $\beta^-$ -Strahler.

Po-210  $\rightarrow$  Pb-206. Po-210 ist ein  $\alpha$ -Strahler.

**Test zu Kapitel 3****Test 3.1**

Was muss für die radioaktive Quelle gelten, damit die Totzeit wenig Einfluss auf die Messung der Zählrate hat?

**Test 3.2**

Wovon hängt die Reichweite der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen ab? Beschreiben Sie qualitativ die Abhängigkeit!

**Test 3.3**

a) Ein Mensch mit der Masse 70 kg enthält etwa 140 g Kalium, das zu 0.012% aus dem radioaktiven K-40 ( $T_{1/2} = 1.3 \cdot 10^9$  a) besteht. Pro Zerfall wird im Körper etwa 1 MeV Energie deponiert.

Wie gross ist die hieraus resultierende jährliche Strahlenbelastung?

b) Warum wird bei den Angaben der Strahlenwirkung die effektive Äquivalentdosis gewählt?

**Test 3.4**

Sie haben in diesem Kapitel gelernt, wie Sie aus der Energiedosis die Dosisleistung bestimmen können. Definieren Sie eine Äquivalentdosisleistung! In einem Kernforschungszentrum wird für  $\alpha$ -Strahlung eine Dosisleistung von 0.5 mGy/h gemessen. Wie gross ist dann die Äquivalentdosisleistung?

## Lösungen: Test Kapitel 3

### Test 3.1 (K2)

Die Aktivität der Quelle sollte kleiner sein als  $10^4$  Bq.

### Test 3.2 (K1)

1. Von der Energie der Teilchen:  
grössere Energie  $\Rightarrow$  grössere Reichweite
2. Von der Grösse der einfallenden Teilchen:  
grössere Teilchen  $\Rightarrow$  kleinere Reichweite
3. Von der Dichte und Atomgrösse des Absorptionsmaterials:  
grössere Dichte  $\Rightarrow$  kleinere Reichweite  
grössere Atome  $\Rightarrow$  kleinere Reichweite

### Test 3.3 (K3)

a)  $N_0$  bezeichne den radioaktiven Anteil von K-40.

$$N_0 = \frac{140\text{g} \cdot 0.012 \text{ mol}}{100 \cdot 40\text{g}} = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$$

$$A = N_0 \cdot \lambda = \frac{N_0 \ln 2}{T_{1/2}} = \frac{140\text{g} \cdot 0.012 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot \ln 2}{100 \cdot 40\text{g} \cdot 1.3 \cdot 10^9 \text{ a}} = 1.35 \cdot 10^{11} \text{ Zerfälle / a}$$

$$\text{Strahlenbelastung} = \frac{1.35 \cdot 10^{11} \text{ a}^{-1} \cdot 1 \text{ MeV}}{70 \text{ kg}} = \frac{3.08 \cdot 10^{-4} \text{ J}}{\text{a} \cdot \text{kg}} = 0.31 \text{ mSv / a}$$

b) Mit der effektiven Äquivalentdosis kann man die gesamte Strahlenwirkung auf einzelne Personen bei Ganzkörperbestrahlung beurteilen. Denn neben den unterschiedlichen Strahlungsarten wird bei der effektiven Äquivalentdosis auch die unterschiedliche Strahlungsempfindlichkeit der einzelnen Organe berücksichtigt.

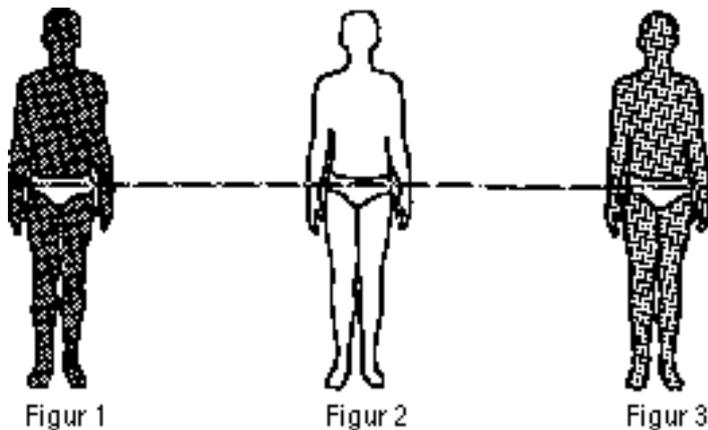
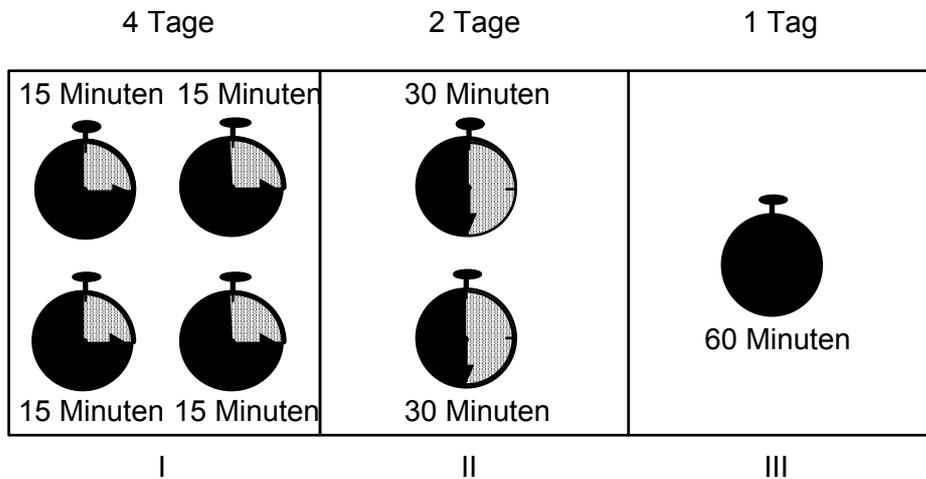
### Test 3.4 (K5)

Definition der Äquivalentdosisleistung:  $\dot{H} = \frac{dH}{dt}$  in den Einheiten Sv/s.

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} = \frac{d(Q \cdot D)}{dt} = Q \cdot \dot{D} = 20 \cdot 0.5 \frac{\text{mGy}}{\text{h}} = 10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$$

## Test zu Kapitel 4

### Test 4.1



Betrachten Sie für diese Aufgabe obige Abbildung.

- Beschreiben Sie I, II und III unter besonderer Berücksichtigung der Dosis und der Bestrahlungszeit!
- Ordnen Sie I, II und III den Figuren 1 bis 3 zu!
- Welche Bedeutung hat der Zeitfaktor?

### Test 4.2

Ein Mensch wird kurzzeitig einer Energiedosis von 150 mGy ausgesetzt. Warum ergeben sich unterschiedliche biologische Auswirkungen, wenn einmal  $\gamma$ -Strahlung und ein anderes Mal  $\alpha$ -Strahlung verwendet wird? Vergleichen Sie die gesundheitlichen Auswirkungen.

### Test 4.3

Die Art eines Strahlenschadens ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Zählen Sie mindestens vier Faktoren auf!

---

**Test 4.4**

In zwei unterschiedlichen Laboratorien A und B wird eine Dosisleistung von 0.1 mGy/h gemessen. In Labor A wird mit Röntgen- und in Labor B mit  $\alpha$ -Strahlung gearbeitet. Sie sollen in einem der beiden Labors 10 Stunden in der Woche mitarbeiten. Für welches Labor entscheiden Sie sich? Warum haben Sie sich für das Labor A bzw. B entschieden?

---

## Lösungen: Test Kapitel 4

### Test 4.1 (K3)

- a) I Ein Mensch wird einer bestimmten Dosis 4 Tage lang jeweils 15 Minuten ausgesetzt.  
II Ein Mensch wird der gleichen Dosis 2 Tage lang jeweils 30 Minuten ausgesetzt.  
III Ein Mensch bekommt diese Dosis an einem Tag in 60 Minuten verabreicht.
- b) Figur 1  $\emptyset$  III  
Figur 2  $\emptyset$  I  
Figur 3  $\emptyset$  II
- c) Je geringer die Dosis pro Zeiteinheit ist, desto geringer ist die Wirkung. Die Zellen können sich in den Bestrahlungspausen erholen. Je höher die Dosisleistung wird, desto länger müssen die Pausen werden. Andernfalls tritt eine starke Wirkung (Sonnenbrand) ein.

### Test 4.2 (K2)

$\gamma$ -Strahlung besitzt einen kleineren Q-Faktor als  $\alpha$ -Strahlung. Der Q-Faktor berücksichtigt aber gerade die Wirkung der verschiedenen Strahlungsarten in demselben Gewebe. Somit ergibt sich eine 20 mal stärkere Auswirkung für die  $\alpha$ -Strahlung gegenüber der  $\gamma$ -Strahlung.

Die Umrechnung der Energiedosis von 150 mGy ergibt für  $\gamma$ -Strahlung 150 mSv und für  $\alpha$ -Strahlung 3 Sv. Die Folgen der  $\gamma$ -Strahlung, welche eine Energie der angegebenen Größenordnung besitzt, können also nicht registriert werden. Bei einer Bestrahlung mit  $\alpha$ -Strahlung kommt es zum Ausbruch der Strahlenkrankheit mittleren Ausmasses (siehe Tabelle 4.5).

### Test 4.3 (K1)

Die Art eines Strahlenschadens ist von verschiedenen Faktoren abhängig, zum Beispiel :

- von der Strahlendosis
- von der Strahlenart
- von der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Dosis im Organismus
- von der relativen Strahlungsempfindlichkeit der Organe
- von der chemischen Zusammensetzung der Zellen
- von den Erholungsmöglichkeiten

### Test 4.4 (K3)

Die Dosisleistung beträgt 0.1 mGy/h. Man wird also pro Woche der Energiedosis von 1 mGy ausgesetzt. Für die Äquivalentdosis ergibt sich für das Labor A 1 mSv und für das Labor B 20 mSv pro Woche. Da man in Labor A einer kleineren Äquivalentdosis ausgesetzt ist als in Labor B, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines biologischen Schadens geringer. Man würde sich also für Labor A entscheiden.