

# Versuch 50

## $\alpha$ -Zerfall und radioaktive Innenluft

---

# Experiment 50

## $\alpha$ -Decay and Radioactive Indoor Air

### 1 Grundlagen

#### Radioaktiver Zerfall

Atomkerne sind aus Nukleonen, d.h. aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen zusammengesetzt. Die Anzahl der Protonen ist die Ordnungszahl des entsprechenden Elements, die gesamte Nukleonenzahl bestimmt im Wesentlichen die Masse des Kerns. Die Masse des Protons unterscheidet sich von derjenigen des Neutrons nur um etwas mehr als ein Promille. Atomkerne mit gleicher Protonenzahl aber unterschiedlicher Neutronenzahl nennt man Isotope. Fast alle durch chemische Prozesse gewonnenen Elemente sind Gemische aus mehreren Isotopen. Viele Isotope der Elemente am oberen Ende des periodischen Systems sind instabil. Sie wandeln sich unter Aussendung von Partikeln in andere, meist wieder instabile Kerne, um. Bei diesen Partikeln handelt es sich entweder um *Elektronen* oder *Positronen* ( $\beta$ -Zerfall) oder um *positiv geladene Kerne des Helium-Atoms* ( $\alpha$ -Zerfall). Beim  $\beta$ -Zerfall wird entweder unter Aussendung ei-

### 1 Basics

#### Radioactive decay

Atomic nuclei comprise of positively charged protons and neutral neutrons, which are collectively called **nucleons**. This total nucleon number determines the mass of the nucleus and can be found in any chart of nuclei. The number of protons in the nucleus alone is known as the *atomic number* for that element. The *rest mass* of the neutron is 939.56 MeV whilst for the proton it is 938.27 MeV. Although very close in value, this difference in mass arises from the constituent parts which make up the proton and neutron.

Atomic nuclei with the same number of protons but different numbers of neutrons are called isotopes. Almost all elements obtained by chemical processes are mixtures of several isotopes. Many isotopes of elements at the top (i.e. heavy) end of the periodic table are unstable. To make the nucleus more stable, sometimes these nuclei spit out a particle and re-structure themselves to a more favourable energy state.

nes Elektrons ein Neutron in ein Proton umgewandelt ( $\beta^-$ -Zerfall), oder ein Proton wird unter Emission eines Positrons (positiv geladenes Antiteilchen des Elektrons) in ein Neutron umgewandelt ( $\beta^+$ -Zerfall). Die Ordnungszahl des Atoms erhöht, respektive vermindert sich dabei um 1. Da sich dabei die Nukleonenzahl nicht ändert und weil ein Elektron ca. 2000 mal leichter ist als ein Nukleon, ändert sich beim  $\beta$ -Zerfall die Masse des Atoms nur unwesentlich. Bei der Emission eines  $\alpha$ -Teilchens, welches 2 Protonen und 2 Neutronen besitzt, bleibt ein Kern zurück, dessen Masse um rund 4 Atommasseneinheiten (amu) und dessen Ordnungszahl um 2 vermindert ist.

Neben den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen wird beim radioaktiven Zerfall noch eine dritte, ausserordentlich durchdringende Strahlung ( $\gamma$ -Strahlung) beobachtet. Es handelt sich dabei um sehr kurzwellige, d.h. energiereiche elektromagnetische Strahlung. Oft führt nämlich der  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall nicht zum energetisch tiefsten Zustand im Restkern. Ist der Restkern *angeregt*, d. h. besitzt er einen Energieüberschuss, so geht er unter Aussendung von  $\gamma$ -Strahlen in den Grundzustand über.

Da, wie schon erwähnt, der beim  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall entstehende Kern im allgemeinen selbst wieder instabil ist, führt der radioaktive Zerfall zu *genetischen Reihen*, von denen zwei (ausgehend von  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$ ) in Abb. 1 und 2 dargestellt sind. Da sich beim  $\alpha$ - beziehungsweise  $\beta$ -Zerfall die Massenzahlen um 4 respektive 0 Einheiten ändern, kann es vier voneinander unabhängige genetische Reihen für Elemente geben, deren Atomgewichte die ganzzahligen Werte

$$4n, 4n + 1, 4n + 2, 4n + 3$$

besitzen. In der Natur kommen drei Reihen vor, welche vom Uran ( $238 = 4n + 2, n = 59$ ), vom Actino-Uran ( $235 = 4n + 3, n = 58$ ) und vom Thorium ( $232 = 4n, n = 58$ ) ausgehen.

These emitted particles can be *electrons* ( $\beta^-$ ), *positrons* ( $\beta^+$ ) or *alpha* ( $\alpha$ ) particles. In the case of  $\beta$  decay, either a neutron converts into a proton while simultaneously emitting an electron ( $\beta^-$  decay), or a proton converts into a neutron while emitting a positron (positively charged antiparticle of an electron -  $\beta^+$  decay). For  $\beta$  decay the atomic number either increases or decreases by 1 respectively. Given that the number of nucleons does not change and because one electron is about 2000 times lighter than a nucleon, the mass of the atom in  $\beta$ -decay changes insignificantly.

An  $\alpha$  particle is essentially a  $^4\text{He}$  nucleus without electrons, making it positively charged. It comprises of 2 protons and 2 neutrons, thus during  $\alpha$  decay, the remaining nucleus has its mass reduced by 4 atomic unit mass (amu) - the standard unit used for mass in nuclear physics, where  $1\text{amu} = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ Kg}$  - and its atomic number reduced by 2.

In addition to the  $\alpha$ - and  $\beta$ -radiation, a third remarkable, highly penetrating radiation called  $\gamma$ -radiation is observed in radioactive decay. The radiation is short-wave, i.e. high-energy electromagnetic radiation. Often the  $\alpha$ - or  $\beta$ -decay alone do not lead to the atom of the remaining nucleus being in the lowest energy state. The remnant nucleus exists in an *excited state* and has excess energy. To relieve itself of this excess energy, it will therefore emit  $\gamma$ -radiation.

Since the nucleus produced by the  $\alpha$ - or  $\beta$ -decay is generally itself unstable, it can be that the produced nuclei are unstable and when they in turn decay, their products are unstable.

When the decay products from  $\alpha$ - or  $\beta$ -decay are radioactive, and those products also produce further radioactive nuclei, we have a **decay chain or series**. Two examples of such decay chains (starting from  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$ ) are shown in Fig. 1 and 2. Because in  $\alpha$ - or  $\beta$ -decay, the mass number changes from 4 to

Elemente der vierten Reihe ( $4n + 1$ ) sind durch künstliche Kernumwandlung erzeugt worden.

Die Radioaktivität, wohl eine der folgenreichsten Entdeckungen in der Geschichte der Physik, wurde 1896 von BECQUEREL zufällig entdeckt (Belichtung einer neben Pechblende aufbewahrten photographischen Platte). Die Existenz natürlich radioaktiver Kerne kann nur bedeuten, dass *einzelne Substanzen* seit der Entstehung der Erde radioaktiv strahlen. Dieses Erkenntnis gestattet eine Abschätzung des Alters der Erde (ca.  $5 \times 10^9$  Jahre). Neben BECQUEREL gehören hauptsächlich die britischen Physiker RUTHERFORD und SODDY sowie die damals in Frankreich arbeitende Polin Marie CURIE zu den Pionieren der Erforschung der Radioaktivität.

## Zerfallsgesetz

Es ist eine Eigentümlichkeit des radioaktiven Zerfalls, die erst im Jahre 1927 durch die Quantentheorie gedeutet wurde, dass es völlig unbestimmt ist, wann ein einzelner radioaktiver Kern zerfällt, ob in 1 Sekunde oder erst nach  $10^6$  Jahren. Es lässt sich für einen einzelnen Kern nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage machen, d. h. nur für eine Gesamtheit von sehr vielen Kernen kann ein *statistisch gültiges Gesetz* angegeben werden. Dieses lautet: Die Zahl der in einem Zeitelement  $dt$  (zwischen der Zeit  $t$  und  $t + dt$ ) zerfallenen Kerne  $dN$  ist proportional der Anzahl der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen radioaktiven Kerne  $N(t)$  und dem

0 units respectively, there can be four independent decay series for elements. Their atomic weights are the integer values:

$$4n, 4n + 1, 4n + 2, 4n + 3$$

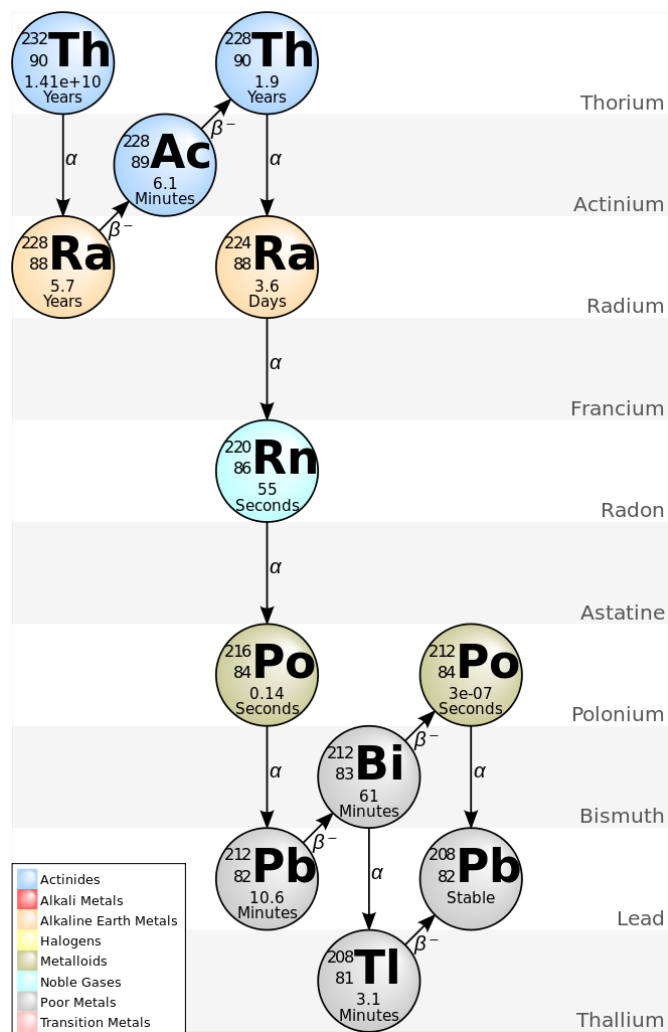
Three series exist in the nature which start with uranium ( $238 = 4n + 2, n = 59$ ), actino-uranium ( $235 = 4n + 3, n = 58$ ), and thorium ( $232 = 4n, n = 58$ ). The elements of the fourth series ( $4n + 1$ ) are produced through artificial nuclear transformation.

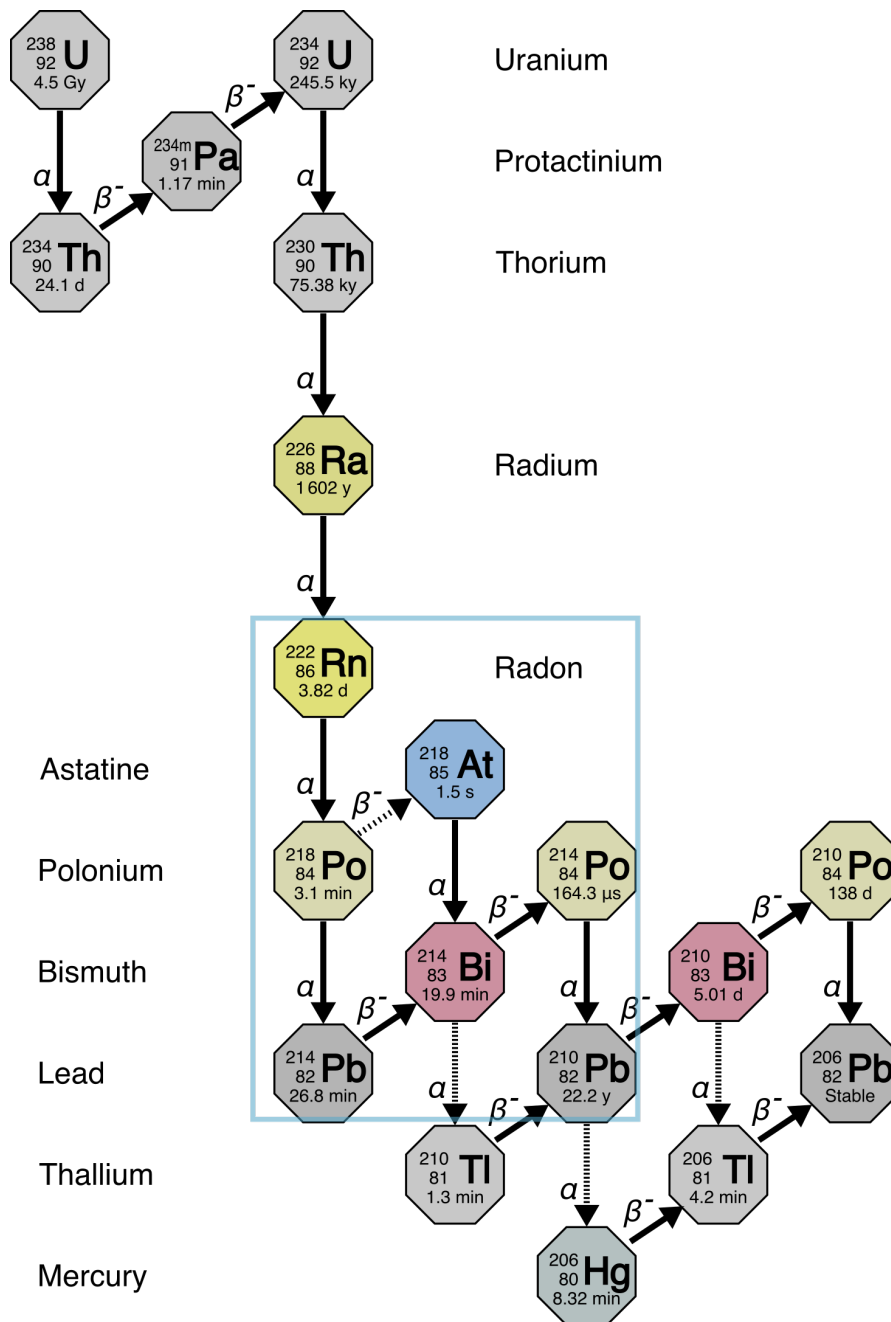
Radioactivity is perhaps one of the most momentous discoveries in the history of physics and was discovered in 1896 by BECQUEREL by chance. (exposure of a photographic plate that was stored next to pitchblende). The existence of naturally radioactive nuclei can only mean that *individual substances* these nuclei have been decaying since the formation of the earth. This realization allows an estimation of the age of the earth (about  $5 \times 10^9$  years). In addition to BECQUEREL, the British physicists RUTHERFORD and SODDY as well as the Polish chemist Marie CURIE who worked in France, are all pioneers in the field of radioactivity research.

## Decay law

A feature of radioactive decay, which was clarified by the quantum theory in 1927, is that whether the decay time of a particular nucleus is 1 second or  $10^6$  years is indefinite. It is possible to make just one probability statement for a single nucleus, which means a *statistically valid law* can be determined only for a set of many nuclei. This is: The number of nuclei  $dN$  that decay in a time element  $dt$  (between time  $t$  and  $t + dt$ ) is proportional to the number of radioactive nuclei  $N(t)$  present at that time and the time element  $dt$  itself:

$$dN = -\lambda N(t) dt . \quad (1)$$

Abbildung 1:  $^{232}\text{Th}$  Zerfallsreihe —  $^{232}\text{Th}$  decay chain.

Abbildung 2:  $^{238}\text{U}$  Zerfallsreihe —  $^{238}\text{U}$  decay chain.

Zeitelement  $dt$  selbst:

$$dN = -\lambda N(t) dt. \quad (1)$$

Das Minuszeichen berücksichtigt, dass beim Fortschreiten in der Zeitrichtung, also bei positivem  $dt$ , die Zahl  $N(t)$  der Atome abnimmt, d. h.  $dN$  negativ ist. Durch Integration ergibt sich das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$N_0$  ist dabei die Zahl der zur Zeit  $t = 0$  vorhandenen Atome,  $\lambda$  eine für jede radioaktive Substanz charakteristische Konstante, die Zerfallskonstante (Dimension: 1/Zeit). Sie ist unabhängig von allen physikalischen und chemischen Bedingungen, denen die Atome unterworfen sind, also insbesondere unabhängig von der Temperatur, der Konzentration und dem Alter der Atome. Nach der mittleren Lebensdauer

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

ist die Zahl der anfänglich vorhandenen Atome offenbar auf den e-ten Teil abgeklungen. Auf die Hälfte klingt sie ab nach der *Halbwertszeit*  $\vartheta$ , die sich ergibt aus

$$N(\vartheta) = N_0 e^{-\lambda \vartheta} = N_0/2$$

d.h.

$$\vartheta = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

## Natürliche Strahlenexposition in der Schweiz

Wir alle sind ständig radioaktiver Strahlung aus natürlichen und zum Teil auch künstlichen Quellen ausgesetzt. Ein Teil der Energie dieser Strahlung kann bei der Absorption im Körper Schaden anrichten, insbesondere am genetischen Material, was zu Krebs oder Erbschäden

The minus sign shows that as time passes, (i.e. when  $dt$  is positive) the value of  $N(t)$  of the atoms decreases, which means,  $dN$  is negative. The decay law is derived by integration:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Where  $N_0$  is the number of atoms at time  $t = 0$  and  $\lambda$  is a constant characteristic of each radioactive substance, called **the decay constant** (dimension: 1/time). The decay constant is independent of all the physical and chemical conditions to which atoms are subjected. For example it is constant regardless of temperature, concentration and age of the atoms.  $\tau$ , is the **average lifetime** of particle decay and is related to  $\lambda$  via:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Which is the expected average lifetime for a radioactive atom within a sample. Some will naturally decay before or after this time - but this is the average value (see Figure 2).

The radioactive **half life**,  $\vartheta$ , - which should not be confused with  $\tau$  - is a property of radioactive nuclei which describes the tendency of the nucleus to "decay" (see Fig. 2). It is also related to the decay constant,  $\lambda$  by:

$$N(\vartheta) = N_0 e^{-\lambda \vartheta} = N_0/2$$

i.e.

$$\vartheta = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

This means, that after one half-life, the number of nuclei existing in a sample has been reduced by half its original value.

## Natural exposure to radiation in Switzerland

We are all constantly exposed to radioactive radiations emitted by natural and also partly artificial sources. Part of the radiation energy

führen kann. Um sinnvoll über die Strahlenbelastung und den allenfalls notwendigen Strahlenschutz zu diskutieren, muss man die wichtigsten natürlichen und künstlichen Quellen kennen.

Es hat sich gezeigt, dass der grösste Anteil an der allgemeinen Strahlenbelastung der schweizerischen Bevölkerung vom Radonisotop  $^{222}\text{Rn}$  und seinen Zerfallsprodukten stammt. Dieses radioaktive Edelgasisotop ist zwar natürlichen Ursprungs, kann aber in der Innenluft von Gebäuden gegenüber der Umgebungsluft deutlich angereichert sein. Man spricht daher beim Radon von einer zivilisatorisch verstärkten Strahlenbelastung.

Um die Strahlenbelastung zu quantifizieren, wird unter anderem die Aktivität verwendet: Die *Aktivität* ist die Anzahl Zerfälle pro Zeiteinheit. Sie wird in Becquerel (Bq) gemessen: 1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde.

Radon ist ein farb- und geruchloses radioaktives *Edelgas*. Es ist das einzige gasförmige Zerfallsprodukt in den drei Zerfallsreihen von  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$ . Da die Halbwertszeiten dieser Nuklide im Vergleich zum Alter der Erde nicht kurz sind, finden wir sie zusammen mit ihren Zerfallsprodukten auch heute noch in messbaren Mengen. Die instabilen Nuklide zerfallen unter  $\alpha$ - und  $\beta$ -Emission über mehrere Zwischenprodukte bis zu den stabilen Blei-Isotopen  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . In jeder der drei Zerfallsreihen kommt ein Radon-Isotop vor ( $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ). Nur  $^{222}\text{Rn}$  hat eine genügend lange Halbwertszeit (3.8 Tage), um aus dem Gestein und Boden ins Grundwasser oder in die Luft zu wandern. Daher rührt die Radioaktivität in Häusern vor allem von  $^{222}\text{Rn}$  und seinen Folgeprodukten her. Die Hauptquelle von  $^{222}\text{Rn}$  ist dabei der Boden. Andere Quellen sind Baumaterial, Wasserversorgung (Quellwasser) und Erdgas.

In diesem Versuch soll die Konzentration von  $^{222}\text{Rn}$  in zuvor beprobter Raumluft mit ei-

can be absorbed by the body and cause damage, particularly genetic disorders or cancers. In order to discuss the radiation exposure and the necessary protection, it is essential to know the most important natural and artificial sources.

It has been shown that the largest share of the general radiation exposure to the Swiss population is from the radon isotope  $^{222}\text{Rn}$  and its decay products. Although this radioactive noble gas isotope is originally natural, it can be significantly enriched in the indoor air of buildings (as opposed to the ambient air). Radon is therefore referred to as civilizing reinforced radiation exposure.

To quantify the radiation exposure, it is important to understand the definition of **Activity**. **Activity** is the amount of decomposition per time unit. It is measured in 'Becquerel'. 1 Bq is equivalent to 1 decomposition per second.

Radon is a colorless and non-odorous radioactive noble gas. It is the only gaseous decay product in the three decay series of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ . Since the half-life of these nuclides are not short, compared to the age of the earth, we still find them today in measurable quantities together with their decay products. The unstable nuclides decay under  $\alpha$ - and  $\beta$ -emission via several intermediate products up to the stable lead isotopes  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . In each of the three decay series, a radon isotope appears ( $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ). Only  $^{222}\text{Rn}$  has a long enough half-life (3.8 days) to migrate from the rock and soil into groundwater or into the air. Therefore, the radioactivity in houses mainly comes from  $^{222}\text{Rn}$  and its secondary products. The main source of  $^{222}\text{Rn}$  is the soil. Other sources include construction materials, water supply (spring water) and natural gas.

In this experiment the concentration of  $^{222}\text{Rn}$



nem Szintillationszähler gemessen.

in pre-sampled ambient air is measured with a **scintillation counter**.

### Der Szintillationszähler (LSC)

In fluoreszierenden und photochemischen Substanzen erzeugen radioaktive Zerfälle Photonen (Lichtteilchen). In einem Szintillationszähler (LSC von englisch: Liquid Scintillation Counter) wird das erzeugte Licht auf Photomultiplier geleitet, die aus einer Anoden-Kathoden-Folge im Vakuum bestehen. Die erste Kathode hat ein Spannungspotential zur ersten Anode. An der ersten Anode ist ein weiteres Potential zur zweiten Anode angelegt, sodass für die zweite Anode die erste Anode zur Kathode wird. Durch das Hinzufügen weiterer Anoden erhält man eine Anoden-Kathoden-Folge. Im Multiplier trifft das Photon auf die erste Kathode auf und schlägt ein Elektron heraus. Das herausgeschlagene Elektron wird am Anfang der Anoden-Kathoden-Folge so stark beschleunigt, dass bei der nächsten Anode mehrere Elektronen herausgeschlagen werden. Jene Elektronen schlagen bei der nächsten Anode noch mehr Elektronen heraus usw, bis am Ende eine beträchtliche Anzahl Elektronen einen messbaren elektrischen Strom erzeugen. Somit ist ein Photon äquivalent zu einer bestimmten elektrischen Stromstärke, die der LSC als eine Zählereinheit (einen count) angibt. Um allfällige elektrische Veränderungen festzustellen und auszugleichen, misst der LSC gleichzeitig eine bekannte radioaktive Probe (Standard), die fest im Gehäuse eingebaut ist.

### Liquid Scintillation Counter (LSC)

In fluorescent and photo-chemical substances, radioactive decays produce photons (light particles). In a Liquid Scintillation Counter (LSC), the generated light is directed to photomultipliers, which consist of an anode-cathode sequence in vacuum. The first cathode has a potential voltage over the first anode. Another potential is applied to the second anode such that for the second anode, the first anode becomes the cathode. By adding more anodes, one obtains an anode-cathode sequence. In the multiplier, the photon strikes the first cathode and ejects an electron. At the beginning of the anode-cathode sequence, the ejected electron is accelerated so much that several electrons are ejected at the next anode. These electrons eject more electrons at the next anode, it goes on, until at the end a considerable number of electrons produce a measurable electrical current. Thus, a photon is equivalent to a certain electric current that the LSC indicates as a counting unit. To determine and balance for possible electrical changes, the LSC simultaneously measures a known radioactive sample (standard), which is permanently installed in the casing.

## 2 Aufgaben

1. Man bestimme die Radonkonzentration in der beprobten Raumluft.
2. Benutzen Sie einen Geigerzähler, um eine Stelle mit besonders hoher Radioaktivität dem ETH Campus am Hönggerberg

## 2 Tasks

1. Determine the Radon concentration in the sampled room air using the LSC and formulae provided.
2. Use a Geiger counter to find a publicly accessible location with high radioacti-



zu finden. Messen Sie dort die Anzahl Zerfälle für mindestens 2 Minuten. Wie gross ist der Fehler ihrer Messung? Wie lange müssten Sie messen, um eine Genauigkeit von 5% zu erreichen. Was ist der Fehler dieser Zeitabschätzung. Was ist Ihre Strahlenbelastung wenn sie sich dort 8 Stunden aufhalten würden. Vergleichen Sie diese mit dem in J33 aufgehängten Poster mit Beispielen von Strahlenbelastungen. Wenn Sie Zeit haben, führen Sie die gleichen Abschätzen mit dem minimalen Strahlenbelastung durch, die Sie auf dem Campus gefunden haben.

3. (Optional) Man bestimme die Radonkonzentration in einer Wasserprobe.

vity on the Höggerberg campus.. Measure the number of decays for at least 2 minutes. What is the error of your measured radioactivity. How long would you need to measure to reduce this error to 5%? What is the error of this estimated time? What would be your radiation exposure at this place if you stayed there for 8 hours. Compare your results with the sample radiation exposures shown on the poster in HPP J33. Time permitting do the same estimate using location of the minimal radiation exposure you found on campus.

3. (Optional) Determine the Radon concentration in a water sample.

### 3 Durchführung

#### Beprobung der Raumluft: In der Woche vor dem Versuchstag

Jede Gruppe erhält in der Woche vor dem Versuch (am Vorbereitungstag) einen Pico-Rad-Detektor (PRD). Dieser muss für mindestens 3 Tage (72 Stunden) möglichst in halber Zimmerhöhe in der Mitte des Raumes aufgestellt werden. In dieser Zeit absorbiert die Aktivkohle das Radon aus der Luft gemäss der Eichkurve  $G_A$ . **Beginn (Öffnung des PRD, Zeit  $t_0$ ) und Ende (Verschliessen des PRD, Zeit  $t_1$ ) der Exposition sind unbedingt zu notieren.**

Im Raum Zürich ist die Radonbelastung eher gering und die gemessenen Werte werden nur sehr wenig vom Untergrund (Nullprobe) abweichen. Wenn möglich sollte der PRD daher in einem Raum aufgestellt werden, in dem eine gewisse Radonbelastung zu erwarten ist (siehe [www.bag.admin.ch](http://www.bag.admin.ch)). Da Radon aus dem Gestein austritt sind insbesondere bodennahe Messstellen (Keller) belastet.

### 3 Implementation

#### Probing a room: During the week before the day of measurements

Each group receives a Pico Wheel Detector (PRD) the week before the experiment. It should be set up for 2 to 3 days (at least 24 hours) half-way from the ceiling height in the middle of the room if possible. During this time, the activated carbon absorbs the radon from the air according to the calibration curve  $G_A$ . **The beginning (opening of the PRD, time  $t_0$ ) and end (closure of the PRD, time  $t_1$ ) of the exposure must be written down.**

In Zurich area, the radon pollution is rather low and the measured values will only deviate very slightly from the subsurface (blank sample). If possible, the PRD should be placed in a room where a certain amount of radon pollution is expected (see [www.bag.admin.ch](http://www.bag.admin.ch)). As radon escapes from the rock, ground-level measuring points (cellars) are particularly loaded.

### Zugabe des Lösungsmittelcocktails einen Tag vor dem Versuchstag

Der PRD muss am Tag vor dem Versuchstag bei Andreas Eggenberger (HPP J14) abgegeben werden, damit er den Lösungsmittel-Cocktail dazugeben kann. Durch die Zugabe des Cocktails werden die  $^{222}\text{Rn}$ -Teilchen aus der Aktivkohle gelöst und über die Dampfphase in den Cocktail transferiert. Der Zeitpunkt der Zugabe des Lösungsmittel-Cocktails (Zeit  $t_2$ ) wird notiert.

### 3.1 Bestimmung der Radonkonzentration in der beprobten Raumluft

#### Der PRD

Das passive Messelement für die Radonkonzentration besteht aus einem Kunststofffläschchen mit eingebautem Aktivkohlefilter im Flaschenhals. Dieser *Pico-Rad-Detektor* (PRD) wurde für 3 Tage (mindestens 72 Stunden) in einem Raum exponiert. In dieser Zeit absorbiert die Aktivkohle das Radon aus der Luft (gemäss der Eichkurve  $G_A$ , Fig. 5a). Über die Dampfphase des nachher zugeführten Lösungsmittel-Cocktails werden  $^{222}\text{Rn}$ -Teilchen aus der Aktivkohle in den Cocktail transferiert (Kurve  $G_D$ , Fig. 5b). Im LSC werden die Photonen, die vom Cocktail durch die  $\alpha$ -Zerfälle erzeugt werden, gezählt.

#### Messung mit dem LSC

Die Radonzerfälle in der zuvor exponierten Probe werden mit einem der beiden in Versuchsraum aufgestellten Flüssig-Szintillations-Zähler (LSC) gemessen. Der genaue Messvorgang hängt dabei vom verwendeten LSC ab und ist der Anleitung im Versuchsraum zu entnehmen. Der Beginn der Messung ist zu notieren (Zeit  $t_3$ ). Die Zerfälle sollen insgesamt

### Adding the cocktail the day before the experiment

Bring the PDF to Andreas Eggenberger (HPP J14), who will add the solvent cocktail to the PRD.

By adding a solvent cocktail to the PRD,  $^{222}\text{Rn}$ -particles are released from the activated carbon and transferred to the cocktail via the vapor phase. The time of adding the solvent cocktail (time  $t_2$ ) should be written down.

### 3.1 Determination of the Radon concentration in the sampled air with the LSC

#### How the PRD works

The passive measuring element of radon concentration consists of a plastic vial with a built-in activated carbon filter located in the vial neck. This pico-wheel-detector (PRD) is exposed in a room from 2 to 3 days (at least 24 hours). As previously mentioned, the **beginning (opening of the PRD, time  $t_0$ ) and end (closure of the PRD, time  $t_1$ )** should be noted down. During this time, the activated carbon absorbs the radon from the air (according to the calibration curve  $G_A$ , Fig. 3a). After the addition of the added solvent cocktail,  $^{222}\text{Rn}$  particles are transferred from the activated carbon into the cocktail (curve  $G_D$ , at a rate that follows that shown in Fig. 3b). In the LSC, the photons produced by the  $\alpha$  decays in the cocktail are counted.

#### Using the LSC detector

The radon decays in the previously exposed sample (PRD) are measured with one of the two liquid scintillation counters (LSC) set up in the experiment room. **The beginning time of the measurement should be written down**

dreimal jeweils über einen Zeitraum von 10 min gemessen werden. Daraus wird die mittlere Zählrate  $N$  bestimmt. Die Messung des Untergrunds erfolgt mit einer Nullprobe: Diese besteht aus einem nicht exponierten PRD, der mit dem Cocktail gefüllt und sofort wieder verschlossen wurde. Die Nullprobe sollte jeweils zwischen den Proben gemessen und die mittlere Untergrundzählrate  $N_U$  bestimmt werden.

### Berechnung der Aktivität im säkularen Gleichgewicht

Da der PRD für mindestens 72 Stunden geöffnet war und der Lösungsmittel-Cocktail am Tag vor dem Experiment zugegeben wurde können wir annehmen, dass für Adsorption und Desorption ein Gleichgewicht erreicht wurde. Dies vereinfacht die Berechnung der Radonkonzentration. Abb. 5a kann man entnehmen dass sich die Radonkonzentration kaum mehr ändert wenn der PRD mehr als 72 Stunden geöffnet war. Dies ist auch der Fall für die Desorption wenn der Lösungsmittel-Cocktail schon am Tag vor der Messung hinzugegeben wurde (Abb. 5b).

Unter der Annahme dass  $^{222}\text{Rn}$  instantan in den Cocktail transferiert wurde und wir lange genug warten bis sich  $^{222}\text{Rn}$  und dessen Zerfallsprodukte (bis zu  $^{210}\text{Pb}$ ) im Gleichgewicht befinden, sollten genau 3 Alphazerfälle gemessen worden sein. Die Aktivität von  $^{222}\text{Rn}$  in der Luft,  $A_1^0$ , ist also ein Drittel der gemessenen Aktivität  $A_g$ :  $A_g = 3A_1^0$ .

### Näherung für die $^{222}\text{Rn}$ Aktivität

Details zur hier verwendeten Näherung können dem Anhang entnommen werden.

Zur Zeit  $t_3$  gilt für die Aktivität im LSC

(time  $t_3$ ). The decays from the PRD sample should be measured three times in total and in between a background measurement taken **each measurement lasts a period of 10 min.** This way the mean count rate,  $\langle N \rangle$ , is determined as the average of the three values. The background is measured with a blank sample: this consists of a non-exposed PRD, which was filled with the cocktail and immediately closed again. The **mean background counting rate**  $\langle N_U \rangle$  should also be calculated.

### Calculating the activity assuming secular equilibrium

As the PRD was exposed for at least 72 hours and the cocktail added the day prior to experiment we can assume equilibrium was reached in both cases making mathematical calculations simpler. Fig. 5a shows that the Radon concentration in the probe barely changes if it has been exposed for more than 72 h). The same is true if the LSC cocktail has been added the day before (Fig. 5b) measurement takes place.

If we suppose that the  $^{222}\text{Rn}$  was transferred instantaneously to the LSC cocktail and then we wait for a sufficiently long time to obtain secular equilibrium between  $^{222}\text{Rn}$  and its secondary products (up to  $^{210}\text{Pb}$ ) to be produced, we can say during this time exactly 3  $\alpha$ -decays are counted. Thus the activity of  $^{222}\text{Rn}$  in air,  $A_1^0$ , is simply one-third of the detected value  $A_g$ , i.e:  $A_g = 3A_1^0$ .

### Estimated value $^{222}\text{Rn}$ for activity

You can compare the above result with the following rough mathematical estimate. For further details about this estimate see the Appendix. At time  $t_3$ , the following activity exists in the LSC cocktail:

$$\begin{aligned} A_g &= A_1^0 B(t_3 - t_2) \\ &= RgG_A(t_1 - t_0)e^{-\lambda_1(t_2 - t_1)} B(t_3 - t_2) \end{aligned}$$

Cocktail:

$$A_g = A_1^0 B(t_3 - t_2) \\ = RgG_A(t_1 - t_0)e^{-\lambda_1(t_2 - t_1)}B(t_3 - t_2)$$

wobei

R = zu bestimmende Radonaktivität

g = Kalibrationsfaktor =  $7.03 \times 10^{-3} \text{m}^3$

$G_A(t_1 - t_0)$  = abhängig von der Länge der Radonabsorption (siehe Fig. 5a).

$$B(t) = 3 - a_0 e^{-\lambda_0 t} - a_2 e^{-\lambda_2 t} - a_3 e^{-\lambda_3 t} \quad (4)$$

mit den folgenden Koeffizienten:

$$a_0 = 2 + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_0)(\lambda_3 - \lambda_0)} \\ a_2 = \frac{\lambda_0 \lambda_3}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} \\ a_3 = \frac{\lambda_0 \lambda_2}{(\lambda_0 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

Hierbei ist  $\lambda_0 = 1.67 \times 10^{-4} \text{1/s}^{-1}$  die Absorptionsrate von  $^{222}\text{Rn}$  in den Lösungsmittelcocktail.  $\lambda_1, \lambda_2$  und  $\lambda_3$  sind in Gleichung (20) im Anhang gegeben; sie hängen mit dem Halbwertszeiten der Elemente der Zerfallskette zusammen.

Die  $\alpha$ -Teilchen werden mit einem **Effizienzfaktor von  $f = 0.995$**  gemessen. Das bedeutet dass 99.5% aller radioaktiven Zerfälle im Cocktail gezählt werden. Die Gesamtzählrate N, von der die Untergrundzählrate  $N_U$  abgezogen werden muss, ist somit:

$$N = f A_g + N_U \\ = Rg f G_A(t_1 - t_0) e^{-\lambda_1(t_2 - t_1)} B(t_3 - t_2) + N_U \quad (5)$$

Daraus folgt für die Radonaktivität der Luft:

$$R = \frac{N - N_U}{g f G_A(t_1 - t_0) e^{-\lambda_1(t_2 - t_1)} B(t_3 - t_2)} \quad (6)$$

in  $\text{Bq/m}^3$ . Man vergleiche den ermittelten Wert mit den Referenzwerten.

Here we have:

R = Average radon activity, to be determined.

g = Calibration factor =  $7.03 \times 10^{-3} \text{m}^3$

$G_A(t_1 - t_0)$  = Function whose value is dependent on the time length of air exposure (see 3b).

And the function;

$$B(t) = 3 - a_0 e^{-\lambda_0 t} - a_2 e^{-\lambda_2 t} - a_3 e^{-\lambda_3 t} \quad (4)$$

With the coefficients:

$$a_0 = 2 + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_0)(\lambda_3 - \lambda_0)} \\ a_2 = \frac{\lambda_0 \lambda_3}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} \\ a_3 = \frac{\lambda_0 \lambda_2}{(\lambda_0 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

Furthermore,  $\lambda_0 = 1.67 \times 10^{-4} \text{1/s}^{-1}$  is the absorption rate of the  $^{222}\text{Rn}$  into the cocktail, and  $\lambda_1, \lambda_2$  and  $\lambda_3$  are detailed by equation 20 in the Appendix - related to the half lives of the elements in the decay sequence.

The  $\alpha$ -particles can be measured with an **efficiency factor of  $f = 0.995$** . This means that 99.5% of all radioactive decays in the cocktail are being counted. Thus the total counting rate, N, - for which we must remember to subtract the background count rate,  $N_U$ , becomes:

$$N = f A_g + N_U \\ = Rg f G_A(t_1 - t_0) e^{-\lambda_1(t_2 - t_1)} B(t_3 - t_2) + N_U \quad (5)$$

Therefore, the mean radon activity of the air is:

$$R = \frac{N - N_U}{g f G_A(t_1 - t_0) e^{-\lambda_1(t_2 - t_1)} B(t_3 - t_2)} \quad (6)$$

### 3.2 Statistische Schwankungen bei der Beobachtung von Elementarprozessen

Die Messung einer Impulsrate (Anzahl Zerfallsprozesse pro Sekunde) wird umso genauer werden, je länger gemessen wird, d.h. je grösser die Zahl der registrierten Impulse wird. Wie gross ist nun der mittlere Fehler, mit dem eine solche Messung behaftet ist: Es sei  $\langle n \rangle$  die über sehr lange Zeit gemittelte Impulsrate (also deren *wahrer Wert*, vgl. Fehlerrechnung). Wenn wir nun zu verschiedenen Malen während  $t$  Sekunden die Impulse zählen, so werden die dabei bestimmten Impulsraten nach einem statistischen Verteilungsgesetz um den wahren Wert streuen. Dieses Verteilungsgesetz wird als *Poisson-Verteilung* bezeichnet. Eine zusammenfassende Behandlung der *Poisson-Verteilung* findet man z. B. bei G. L. Squires: "Practical Physics" (Mc Graw-Hill, London). Bei einer Poisson-Verteilung gilt für den mittleren Fehler  $\langle \Delta n \rangle$  (Mittelwert des bei sehr vielen gleichen Messungen auftretenden Fehlers):

$$\langle \Delta n \rangle = \sqrt{n}$$

wobei  $n$  die Anzahl Impulse bezeichnet, welche während der Zeit  $t$  registriert wurden. Der relative Fehler wird also

$$\frac{\langle \Delta n \rangle}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

Um eine Genauigkeit von z. B. 1 % zu erreichen, muss also so lange gezählt werden, bis  $n$  die Grössenordnung  $10^4$  erreicht hat.

### 3.2 Statistical variations in the observation of elemental processes

The longer the measurement of a pulse rate (number of decay processes per second) takes, the more accurate it becomes, i.e. the greater the number of registered impulses gets. To determine the mean error of such a measurement: Let  $\langle n \rangle$  be the pulse rate averaged over a very long time (its true value, see error calculation). Now, if we count the impulses during  $t$  seconds at different times, according to the statistical distribution law, they will scatter certain impulse rates around the true value. This distribution law is called *Poisson-distribution*. A brief use of the Poisson-distribution can be found e.g. in G. L. SQUIRES: «Practical Physics» (Mc Graw-Hill, London). For a Poisson distribution, the mean error  $\langle \Delta n \rangle$  (average value of the error occurring in the case of many identical measurements) applies:

$$\langle \Delta n \rangle = \sqrt{n}$$

where  $n$  is the number of pulses registered during the time  $t$ . The relative error becomes:

$$\frac{\langle \Delta n \rangle}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

To ensure an accuracy of e.g. 1 % must be counted until  $n$  reaches the order of  $10^4$ .

## Anhang

Die relevante Zerfallsreihe geht von  $^{222}\text{Rn}$  bis  $^{210}\text{Pb}$  und kann auch aus der (im Praktikumsraum aufgehängten) Nuklidkarte herausgelesen werden. Die Übersicht in Fig. 5c dient als Orientierungshilfe für die Berechnung. Die Zeiten  $t_i$  auf der Zeitachse sind nicht massstabsgetreu.

I Zur Zeit  $t_0$  wird die Aktivkohle an der Raumluft exponiert, und bis zum Schliessen des PRD (Zeitpunkt  $t_1$ ) wird Radon adsorbiert. Falls die Aktivität der Luft während der Exposition stark schwankt, entsteht auf der Aktivkohle eine Aktivität, welche einem gewichteten Mittelwert entspricht, wobei die Aktivitäten gegen Ende der Exposition ein grösseres Gewicht erhalten. Wenn  $R$  [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] die mittlere Radon-Aktivität der Luft während der Expositionszeit ( $t_1 - t_0$ ) ist, beträgt die maximale Radioaktivität  $A'$  [ $\text{Bq}$ ] der Aktivkohle  $A' = Rg$ . Der *Kalibrierungsfaktor*  $g$  [ $\text{m}^3$ ] wurde bestimmt durch eine Messung in einem Raum mit bekannter Radioaktivität. Die Aktivität  $A'$  entspricht dem Gleichgewicht zwischen der Aktivität in der Luft und der auf Aktivkohle, das sich erst nach genügend langer Exposition einstellt. Der zeitliche Verlauf der Adsorption des Radongases in die Aktivkohle im PRD wird durch die Kurve  $G_A$  in Fig. 6 dargestellt. Aus der Eichkurve  $G_A(t_1 - t_0)$  wird herausgelesen, welcher Anteil von  $A'$  vom Expositionsbeginn  $t_0$  bis zum Expositionsende  $t_1$  eingewachsen ist.

$$A'' = A'G_A(t_1 - t_0) = RgG_A(t_1 - t_0) \quad (7)$$

II Vom Expositionsende  $t_1$  ( $A''$ ) bis zum Zeitpunkt der LSC-Cocktail-Zugabe  $t_2$  nimmt die Aktivität des Radons durch den radioaktiven Zerfall ab (2)

$$\begin{aligned} A_1^0 &= A''e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} \\ &= RgG_A(t_1 - t_0)e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} \end{aligned} \quad (8)$$

## Appendix

The relevant decay series goes from  $^{222}\text{Rn}$  to  $^{210}\text{Pb}$  and can also be extracted from the nuclei map (in the practice room). The overview on Fig. 5c provided below, serves as a guide for the calculation. The times  $t_i$  on the time axis are not scaled.

I At time  $t_0$ , the activated carbon in the room is exposed, and radon is adsorbed until the PRD is closed ( $t_1$ ). If the activity of the air fluctuates strongly during the exposure, an activity arise from the activated carbon, which corresponds to a weighted average, whereby the activities get a larger weight at the end of the exposure. If  $R$  [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] is the average radon activity concentration of the air during the exposure time ( $t_1 - t_0$ ), the maximum radioactivity  $A'$  of the activated carbon will be  $A' = Rg$ . The *calibration factor*  $g$  [ $\text{m}^3$ ] is determined by doing the measurements in a room, for which the radioactivity is known. The activity  $A'$  corresponds to a balance between the activity in the air and in the activated carbon, which takes place only after a sufficiently long exposure. The time course of the adsorption of the radon gas into the activated carbon in the PRD is shown in the curve  $G_A$  in Fig. 6. Using the calibration curve  $G_A(t_1 - t_0)$ , it can be determined which proportion of  $A'$  has grown from the beginning of the exposure  $t_0$  to the end of it  $t_1$ .

$$A'' = A'G_A(t_1 - t_0) = RgG_A(t_1 - t_0) \quad (7)$$

II From the end of exposure  $t_1$  ( $A''$ ) until the time when LSC cocktail is added  $t_2$ , the activity of radon decreases due to radioactive decay (2).

$$\begin{aligned} A_1^0 &= A''e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} \\ &= RgG_A(t_1 - t_0)e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} \end{aligned} \quad (8)$$



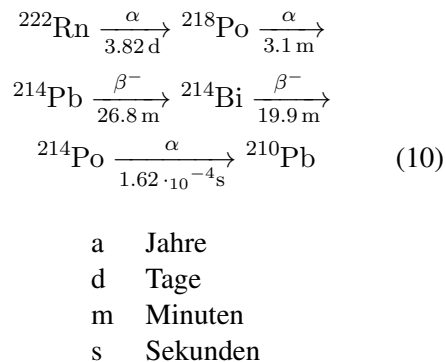
III Das Radongas wird von der Aktivkohle in den LSC-Cocktail transferiert. Bei der Zugabe des Cocktails zur Zeit  $t_2$  befindet sich noch kein Radon im Cocktail. Das Radongas wächst gemäss der in Fig. 6 dick ausgezogenen Linie  $G_D$  in den LSC-Cocktail hinein. Der Transfer ( $G_D$ ) kann, ähnlich wie das Einwachsen eines Tochterisotopes, durch ein Gesetz der Form

$$A_1(t) = A_1^0(1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad (9)$$

beschrieben werden. Hier ist

$A_1(t)$	$^{222}\text{Rn}$ -Aktivität im LSC-Cocktail zur Zeit, $t$
$A_1^0$	Ausgangs-Aktivität von $^{222}\text{Rn}$ in der Aktivkohle,
$\lambda_0$	$= 1.67 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ Adsorptionsrate von $^{222}\text{Rn}$ in den Cocktail.

$\lambda_0$  wurde aus der Kurve  $G_D$  durch Approximation bestimmt. Gleichzeitig beginnen sich auch die Folgeprodukte des Radons im Cocktail zu akkumulieren (dünne Linien im Bereich III). Im Folgenden betrachten wir die Zerfallskette von  $^{222}\text{Rn}$  bis  $^{210}\text{Pb}$  (blau eingerahmter Bereich in Fig. 1):



Jedes zerfallende  $^{222}\text{Rn}$ -Nuklid produziert also im Laufe der Zeit vier  $\alpha$ -Teilchen bis zum stabilen Nuklid  $^{206}\text{Pb}$ . Beginnt man aber mit dem reinen Nuklid  $^{222}\text{Rn}$  (d.h. ohne dessen Folgeprodukte), so dauert der Aufbau des  $^{210}\text{Pb}$ -Zerfalls zu lange. Die Aktivität von  $^{210}\text{Pb}$  kann

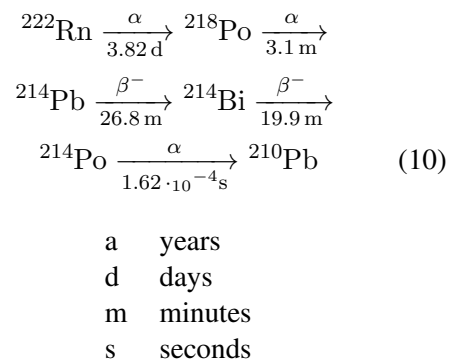
III Radon gas is transferred from the activated carbon into the LSC cocktail. At the time of Adding the cocktail  $t_2$ , radon does not still exist in the cocktail. The radon concentration grows in the LSC cocktail according to the thick line  $G_D$  in Fig. 6. The transfer ( $G_D$ ) can be described as:

$$A_1(t) = A_1^0(1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad (9)$$

Where:

$A_1(t)$	$^{222}\text{Rn}$ activity in the LSC-Cocktail at time, $t$
$A_1^0$	Initial activity of $^{222}\text{Rn}$ in the activated carbon,
$\lambda_0$	$= 1.67 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ Absorption rate of $^{222}\text{Rn}$ in the Cocktail.

$\lambda_0$  is determined using the curve  $G_D$  by approximation. At the same time, the secondary products of radon begin to accumulate in the cocktail (thin lines in area III). In the following, the decay chain from  $^{222}\text{Rn}$  to  $^{210}\text{Pb}$  is considered (blue area in Fig. 1):

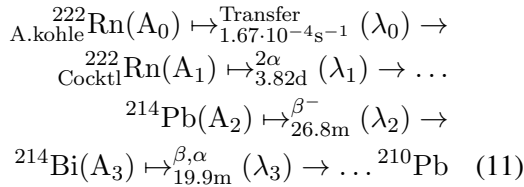


Each decaying  $^{222}\text{Rn}$ -nuclei produces four  $\alpha$  particles over time, which leads to production of the stable  $^{206}\text{Pb}$ -nuclei. However, if one begins with the pure  $^{222}\text{Rn}$ -nuclei (that is, without its secondary products), the  $^{210}\text{Pb}$  decay process takes too long. The activity of  $^{210}\text{Pb}$  can therefore be neglected in the short term in comparison to other decay rates. Conversely, the relatively short-lived isotopes ( $^{218}\text{Po}$  and in particular  $^{214}\text{Po}$ ) rapidly reach a decay



daher kurzfristig gegenüber den ändernden Zerfällen vernachlässigt werden. Umgekehrt erreichen die relativ kurzlebigen Isotope ( $^{218}\text{Po}$  und insbesondere  $^{214}\text{Po}$ ) sehr rasch ein Zerfallsgleichgewicht mit den vorangehenden Isotopen: die Aktivitäten werden gleich.

Allerdings sind die Halbwertszeiten der beiden  $\beta^-$ -Zerfälle von  $^{214}\text{Pb}$  über  $^{214}\text{Bi}$  zu  $^{214}\text{Po}$  so gross, dass es mehrere Stunden dauert, bis sich das Zerfallsgleichgewicht vom  $^{222}\text{Rn}$  bis zum  $^{214}\text{Po}$  einstellt. Da wir nur  $\alpha$ -Zerfälle messen, interessieren uns die Zwischenschritte mit  $\beta^-$ -Zerfällen nur insofern, als sie die Aktivität des  $^{214}\text{Bi}$  bestimmen, die sich bis zum Messzeitpunkt  $t_3$  eingestellt hat. Wir passen das Schema (10) wie folgt an:



Die gesamte  $\alpha$ -Aktivität berechnet sich somit wie folgt:

$$A_g = 2A_1 + A_3 \quad (12)$$

Dabei ist

$$A_1(t) = A_1^0(1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad (13)$$

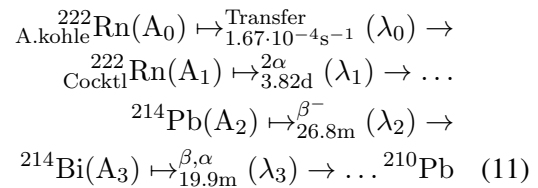
die  $^{222}\text{Rn}$ -Aktivität im Cocktail und  $A_3$  diejenige von  $^{214}\text{Bi}$ .

Die Aktivität von  $^{214}\text{Bi}$  kann durch Iteration des Zerfallsgesetz ermittelt werden. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} A_3 = A_1^0 \left( 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_0)(\lambda_3 - \lambda_0)} e^{-\lambda_0 t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_0 \lambda_3}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_0 \lambda_2}{(\lambda_0 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

equilibrium with the preceding isotopes: the activities become the same.

However, the half-lives of the two  $\beta^-$  decays from  $^{214}\text{Pb}$  over  $^{214}\text{Bi}$  to  $^{214}\text{Po}$  are so large that it takes several hours to reach the decay equilibrium from  $^{222}\text{Rn}$  to  $^{214}\text{Po}$ . Since we only measure  $\alpha$  decays, we are interested in the intermediate steps with  $\beta^-$  decays only if they determine the activity of the  $^{214}\text{Bi}$ , which has been set until the measurement time  $t_3$ . We adapt the scheme (10) as follow:



The total  $\alpha$ -activity is calculated as follows:

$$A_g = 2A_1 + A_3 \quad (12)$$

Where

$$A_1(t) = A_1^0(1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad (13)$$

is the  $^{222}\text{Rn}$ -activity in the cocktail and  $A_3$  that of  $^{214}\text{Bi}$ .

The activity of  $^{214}\text{Bi}$  can be determined by iteration of the decay law. We have:

$$\begin{aligned} A_3 = A_1^0 \left( 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_0)(\lambda_3 - \lambda_0)} e^{-\lambda_0 t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_0 \lambda_3}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_0 \lambda_2}{(\lambda_0 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

From the equations (12), (13) and (14), the following relation yields between the measured  $\alpha$ -activity  $A_g$  and of the original  $^{222}\text{Rn}$ -activity in the activated carbon:

$$A_g = A_1^0 B(t) \quad (15)$$

Aus den Gleichungen (12), (13) und (14) ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen der gemessenen  $\alpha$ -Aktivität  $A_g$  und der ursprünglichen  $^{222}\text{Rn}$ -Aktivität in der Aktivkohle:

$$A_g = A_1^0 B(t) \quad (15)$$

mit den Definitionen

$$a_0 = 2 + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_0)(\lambda_3 - \lambda_0)}$$

$$a_2 = \frac{\lambda_0 \lambda_3}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

$$a_3 = \frac{\lambda_0 \lambda_2}{(\lambda_0 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

$$B(t) = 3 - a_0 e^{-\lambda_0 t} - a_2 e^{-\lambda_2 t} - a_3 e^{-\lambda_3 t} \quad (16)$$

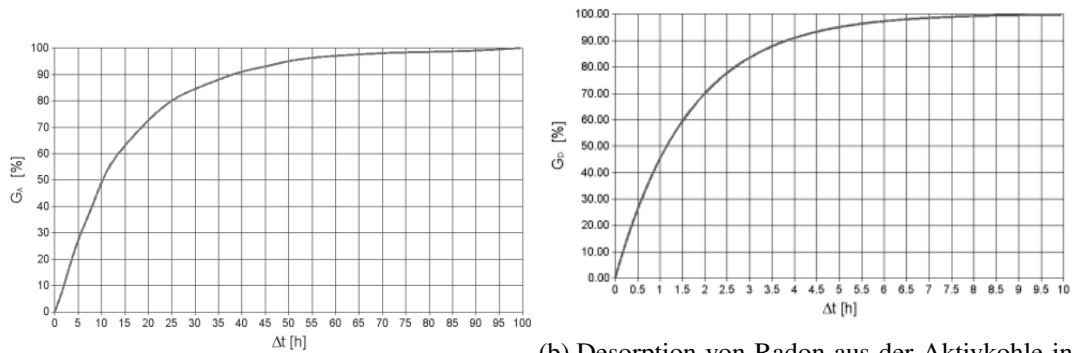
with the definitions:

$$a_0 = 2 + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_0)(\lambda_3 - \lambda_0)}$$

$$a_2 = \frac{\lambda_0 \lambda_3}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

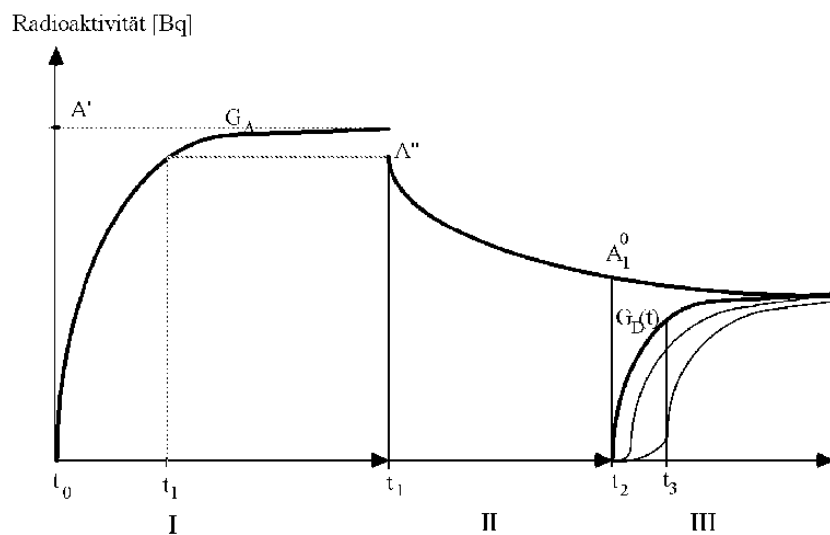
$$a_3 = \frac{\lambda_0 \lambda_2}{(\lambda_0 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

$$B(t) = 3 - a_0 e^{-\lambda_0 t} - a_2 e^{-\lambda_2 t} - a_3 e^{-\lambda_3 t} \quad (16)$$



(a) Adsorption von Rn aus der Raumluft an den Aktivkohlefilter. — Adsorption of Radon from the air on the activated carbon of PRD

(b) Desorption von Radon aus der Aktivkohle in den LSC Lösungsmittel Cocktail — Desorption of Radon from the activated carbon into the LSC cocktail



(c) Measurements

Abbildung 3: Zeitverlauf der Aktivität — Activity over time.