

## **Hinweis des Autors**

**Die vorliegende Zusammenstellung von Texten auf CD entstand aus Vorträgen zum Themenbereich „Radioaktivität“ an Pädagogischen Instituten der Städte Nürnberg und München, an der Lehrerfortbildungsakademie Dillingen und bei regionalen Lehrerfortbildungen sowie am Physikwochenende an der Universität Erlangen. Die Exkursion wurde im Rahmen des Deutschen Geographentages in Regensburg 1998 und für das Physik-Didaktikseminar an der Universität Erlangen durchgeführt.**

**Alle Zusammenstellungen und Folienvordrucke können für den Unterricht frei genutzt werden. Bei aus anderen Büchern übernommenen und veränderten Zeichnungen wurde darauf ein Hinweis gegeben. Die Tabellen sind in der Regel aus mehreren Büchern zusammengestellt oder aus dem Internet übernommen, wobei sich die Web-Adressen mittlerweile meist geändert haben. Von Quellenangaben habe ich deshalb abgesehen. Die Daten wurden jedoch sorgfältig recherchiert, für etwaige Fehler kann keine Haftung übernommen werden.**

**Bitte bedenken Sie auch, dass die Texte geistiges Eigentum des Autors sind und den Copyright-Bestimmungen unterliegen. Seien Sie fair und unterlassen Sie unautorisierte Weitergaben und Veröffentlichungen. Für Anregungen bin ich gerne dankbar.**

**Regenstauf, im November 1999**

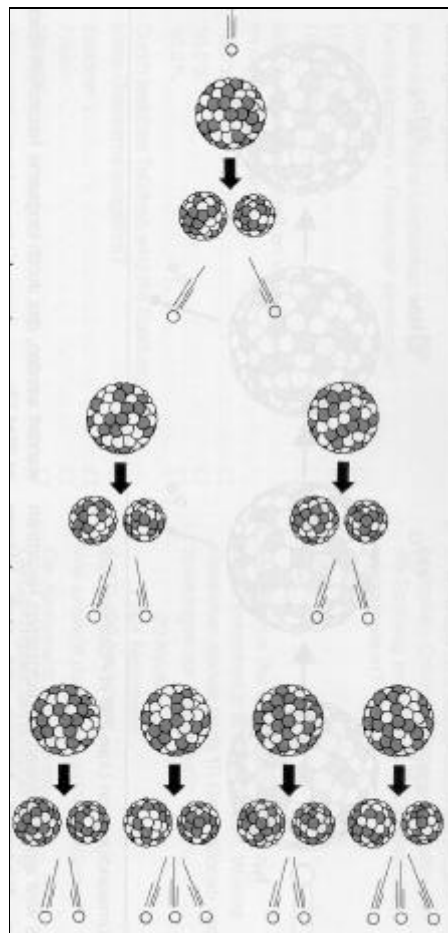
**Rudolf Geipel**

Rudolf Geipel



*Von* **BECQUEREL,**  
*ANTOINE-HENRI*

*zum* **Becquerel,**  
*(Bq, SI-Einheit)*



**Radioaktivität**  
**in**  
**Geschichte, Natur und Technik**

**Verständnis durch Experimentieren**

## Einleitung

### Von der Aus-Strahlung in andere Fachgebiete bis zum richtigen Umgang

Wie kaum ein anderes Teilgebiet der Physik ist die Radioaktivität geeignet, Verknüpfungen zu anderen Fachgebieten zu schaffen. Von ihrem Wesen her und hinsichtlich der Erklärung ihrer Erscheinungen ist sie in den Gebieten der Physik und Chemie angesiedelt. In die Biologie gehört die Tatsache, dass die Entwicklung des Menschen stets unter einer natürlichen Strahlenexposition terrestrischen und kosmischen Ursprungs stattfand. Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen und der Entwicklung der Kerntechnik ist hierzu noch eine zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition hinzugekommen. Die Geschichte der Radioaktivität liest sich spannend wie jeder Kriminalroman und beeinflusste die letzten 100 Jahre unserer Vergangenheit nachhaltig. Sie hatte in höchsten Maße politische, moralische und soziale Auswirkungen. Anwendungen findet die Radioaktivität im Umweltschutz, in der Medizin, in der Messtechnik und in der Materialtechnik, um nur einige zu nennen.

Daneben ist die Radioaktivität aber auch wie kein anderes Fachgebiet durch waffentechnischen Missbrauch, durch die potentielle Gefährlichkeit ihrer Anwendungen sowie durch polemische Darstellungen im Widerstreit politischer Gegner in Misskredit gebracht worden. Der Unterricht in Schulen muss deshalb Schüler befähigen, wertneutral zu erkennen, wie radioaktive Strahlung entsteht und welche biologischen Wirkungen sie hat, wie man sich vor radioaktiver Strahlung schützen kann und dass wir vom Anbeginn unseres Lebens mit radioaktiver Strahlung leben müssen. Ziel muss es auch sein, den Schüler auf die Verantwortung des Wissenschaftlers für die Verwertung der Ergebnisse seiner Forschung aufmerksam zu machen und ihm die Wissensgrundlagen für eine sachliche, gesellschaftliche Diskussion und die damit verbundene Einflussnahme auf technische Erfindungen zu vermitteln. Die Problematiken "Radioaktive Strahlung - Gefahren und Nutzen" sowie "Kernkraftwerke - ja oder nein?" stehen also im Mittelpunkt des Physikunterrichts. Die damit zusammenhängenden Fragen können aber nicht nur rein wissenschaftlich von Physik und Chemie her geklärt werden, die physikalisch-technischen, biologisch-ökologischen und politisch-wirtschaftlichen Aspekte können nur fächerübergreifend behandelt werden.

Dabei stehen zur Klärung der Zusammenhänge oft nur wenige Versuche zur Verfügung, die meisten verbieten sich aufgrund ihrer Gefährlichkeit. Bei allen diesen Versuchen ist die Strahlenschutzverordnung zu berücksichtigen. Die Lehrmittelfirmen bieten dazu oft nur aufwendige und teure Versuchapparaturen an, der Einsatz von radioaktiven Präparaten macht entsprechende Sicherheitsvorkehrungen und die Bestellung eines Strahlenschutzbeauftragten notwendig. Der Unterricht wird sich deshalb oft nur auf Informationsvermittlung unter Einsatz von Filmen, Dias, Arbeitstransparenten, Computersimulationen oder Modellen beschränken. Umso wichtiger ist es, einfache, möglichst ungefährliche und leicht nachvollziehbare Handversuche zu entwickeln, um die Materie durchschaubarer zu machen. Im Blickpunkt standen dabei vor allem historische Versuche, die mit modernen Hilfsmitteln nachvollzogen werden sollen. Bei allen Versuchen wurde darauf geachtet, Materialien zu verwenden, die aus der Umgebung der Schülerinnen und Schüler (im folgenden abkürzend als Schüler angesprochen) stammen, die leicht beschaffbar und nicht zu teuer sind und die man im Sinne der Strahlenschutzverordnung als ungefährlich einstufen kann.

Neben Präparaten aus dem täglichen Leben wurden in den Versuchen auch Mineralstufen und Erzproben verwendet. Radioaktive Mineralstufen sind in der Regel anzeige- und genehmigungsfrei, wenn der Gehalt an natürlichem Uran oder Thorium bestimmte Grenzen nicht überschreitet (siehe dazu die Strahlenschutzverordnung, Anlage IV, Tabelle IV.1, 4. Spalte). Dies trifft wiederum in der Regel auf Mineralien bis etwa 600 g zu. Dennoch sollte man die Grenzen enger fassen und folgende Tatsachen sowie Hinweise berücksichtigen. Hier ergibt sich aus den Versuchen bereits eine gute Überleitung zu Strahlenschutzpraktiken, die oftmals sehr einfach, aber dennoch wirkungsvoll sein können.

Stark strahlend sind in der Regel Stücke, die Pechblende, ein primär entstandenes Uranerz (Uranoxid  $\text{UO}_2 - \text{U}_3\text{O}_8$ ), enthalten. Pechblende ist das wichtigste Uranerz und findet sich z.B. in kleinen Lagerstätten in Ostbayern (Nabburg-Wölsendorfer Flussspatrevier, Fichtelgebirge, Mähring), im Schwarzwald (Menzenschwand) oder im größeren Maße im Sachsen und Thüringen (Johann-Georgen-Stadt, Aue, Schlema, Ronneburg usw.). Alle diese Lagerstätten sind nicht abbauwürdig bzw. stillgelegt worden. Interessant dürfte hierbei der Hinweis sein, dass die SDAG (Sowjetisch-Deutsche Aktien-Gesellschaft) Wismut-Aue einer der größten Uranförderer der Welt war. Bis 1990 fördert die SDAG Wismut 220 000 Tonnen Uran und lag damit knapp hinter Kanada mit 240 000 t und den führenden USA mit 334 000 t an dritter Stelle der Welturanförderung. Bei Pechblendeproben aus derartigen Fundgebieten oder aus tschechischen Lagerstätten (Jachymov = St. Joachimsthal, Przibram) lässt sich ein hoher Anteil von stark durchdringender, weitreichender Gammastrahlung beobachten. Ursächlich verantwortlich dafür ist nicht das Uran, sondern das Radium als Zerfallsprodukt des Urans. Technisch aufgearbeitete Uranverbindungen, z.B. Uranpigmentfarben in Fliesen oder in Urangläsern bzw. Uranmetall selbst, enthalten kein oder nur extrem wenig Radium. Sie sind deshalb wesentlich weniger stark strahlend. Durch Oxidation bildeten sich aus Pechblende sekundäre Uranminerale, die häufig als dünne Beläge von oft leuchtenden Farben dem Gestein aufsitzen. Sie sind in der Regel schwach strahlend. Als stark strahlend kann man Proben einstufen, bei denen in 20 cm Entfernung ein Strahlenmessgerät das 20-fache der Umgebungsstrahlung anzeigt, das entspricht etwa der Dosisleistung während einer Flugreise in rund 10 000 m Flughöhe.

Von der Strahlungsintensität zu unterscheiden ist die Kontaminationsfähigkeit. Sie beruht vor allem darauf, ob ein Mineral porös und bröckelig ist oder sich leicht abreiben lässt. Bei Kontaminationen mit dem Staub oder dem Abrieb radioaktiver Minerale kann es zu einer Inkorporation kommen, die in der Regel viel gefährlicher ist als das kurzzeitige Ausgesetztsein einer starken Strahlung. Vor allem die Einlagerung in die Lunge und die wohl durch die Alphastrahlung verursachte Schädigung des empfindlichen Lungengewebes kann im schlimmsten Fall zum Lungenkrebs führen. Stark kontaminierend sind vor allem die sogenannten Uranglimmer, das sind Mineralien, die aufgrund ihrer vollkommenen Spaltbarkeit krümelig und bröselig sind. Sie sondern durch Anfassen kleine Partikel ab, die an den Händen haften bleiben und von dort aus in den Körper gelangen können. Deshalb ist der sorglose Umgang mit stark kontaminierenden Mineralien zu vermeiden, sie sind staubdicht aufzubewahren und nach jeder Handhabung sollte man sich gründlich die Hände waschen. Es verbietet sich von selbst, beim Hantieren mit stark kontaminierenden Stoffen nicht zu essen, zu trinken oder zu rauchen. Auch das Zerkleinern, das Anschleifen und Anpolieren, alles, was Staub verursacht, sollte unterbleiben bzw. nur im freien Gelände und bei entsprechendem Atemschutz erfolgen.

Für Versuche ist es günstiger, bereits angeschliffene, radioaktive Erzproben oder Mineralstufen zu erwerben. Mit ein bißchen Glück und Ausdauer ist dies auf Mineralienbörsen möglich. In jedem Fall sollte man mit einem Messgerät überprüfen, wie stark die Stufe strahlt. Die Kontamination auf der angeschliffenen und polierten Seite von Erzproben ist praktisch gleich Null, größer ist die Gefahr einer Kontamination meist auf der nicht angeschliffenen Rückseite. Es empfiehlt sich deshalb, diese Rückseite mit einer Lack-Schutzschicht zur Unterbindung von Kontamination zu versehen.

Eine dritte Klassifizierung bezieht sich auf die Abgabe von Radon. Dies trifft vor allem auf angewitterte und poröse Proben zu, die viel Radium enthalten. Sie sind stark radon-exhalierend. Unter die stark radon-exhalierenden Stoffe können auch natürliche oder technische Baustoffe fallen, darunter z.B. Bauxit, Leichtbausteine, die z.B. Granulat aus schwedischem Schwarzschiefer oder aus Schlacken enthalten, fränkischer Burgsandstein, Granite im Bayerischen Wald oder Baustoffe aus Gesteinen der thüringisch-sächsischen Uranbergbauggebiete. Räume, in denen stark radon-exhalierende Stoffe aufbewahrt werden, sind entsprechend häufig und gut zu lüften.

Bezüglich der Inkorporation radioaktiver Stäube und der Radon-Exhalation lässt sich wieder eine gute Überleitung zu zivilisatorisch bedingten Strahlenschäden finden. Im Bergbau war schon im Mittelalter unter den Bergleuten die sogenannte "Schneeberger Krankheit", eine Lungenerkrankung, gefürchtet, die die Ärzte Dr. F. H. HÄRTING aus Schneeberg und Dr. W. HESSE aus Schwarzenberg im Jahr 1879 als Lungenkrebs erkannten. Der Lungenkrebs ist Folge der Einlagerung von radioaktiven Staubpartikeln und von Zerfallsprodukten des Radons, der sogenannten Radontöchter Polonium-218, Blei-214 und Wismut-214, in der

Lunge. Eine erhöhte Radonbelastung wird aber auch in alten Häusern im Bayerischen Wald, im Oberpfälzer Wald, im Fichtelgebirge, im Schwarzwald und in den thüringisch-sächsischen Uranbergbaugebieten befürchtet. Hier sind vor allem die Kellerräume stark belastet, da die Grundmauern häufig unter Verwendung einheimischer Gesteine errichtet wurden, die radioaktive Mineralien enthalten.

Diese Beispiele zeigen, dass auch bei natürlichen, radioaktiven Proben Gefahren vorhanden sind. Beim Umgang mit radioaktiven Mineralstufen oder Erzproben sind deshalb in jedem Fall die folgenden Regeln zu beachten:

1. Möglichst kleine Stücke verwenden. Stücke in staubsicheren, dicht schließenden Behältnissen aufbewahren und nur bei Bedarf entnehmen.
2. Abstand halten und sich in der Nähe der Proben nur kurz aufhalten.
3. Immer mit Strahlungsmessgeräten die Dosisleistung kontrollieren.
4. Stark radioaktive Stufen nicht in Wohnräumen bzw. Klassenzimmern lagern oder ausstellen. Räume, in denen sich stark radon-exhalierende Proben befinden, gut und häufig lüften.
5. Beim Hantieren mit radioaktiven Stufen nicht essen, trinken oder rauchen.
6. Radioaktive Stücke nicht zerkleinern oder anschleifen.
7. Nach dem Hantieren mit radioaktiven Stücken stets die Hände gut waschen.

Zur Einhaltung dieser Regeln sollten Schüler immer wieder angehalten werden; bei allen Versuchen mit radioaktiven Präparaten oder mit ionisierender Strahlung sollten die Schüler auf die Gefährlichkeit und die Beachtung von Sicherheitsmaßnahmen hingewiesen werden. Dabei ergeben sich aber auch Anknüpfungspunkte, um vor einer übertriebenen Hysterie zu warnen und die Schutzmaßnahmen auf einer sachlichen, von wissenschaftlichen Erkenntnissen gestützten Ebene zu diskutieren.

Bei jedem Umgang mit radioaktiven Präparaten und mit ionisierender Strahlung sind Messungen unerlässlich. Das Messgerät sollte eine hohe Empfindlichkeit besitzen und auch noch Alpha-Strahlung messen können. Um es auch mobil einsetzen zu können, sollte es zudem handlich, leicht und netzunabhängig sein. Für die Messungen sind Messzeitvorgaben ebenso wie die Anzeige in verschiedenen physikalischen Einheiten wünschenswert. Daneben sollte das Messgerät auch noch preiswert sein.

Für die Messungen wurde deshalb ein GM-Endfensterzählrohr "Inspector" der Firma S.E. International Inc., USA, erhältlich über das Technische Büro Schütz, Hainbuchenweg 9, D-64668 Rimbach, Preis ca. 800 DM, verwendet. Dieses Endfensterzählrohr ist geeignet, selbst geringe Strahlungsraten von Alpha-, Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlung zu messen. Die hohe Empfindlichkeit beruht auf dem großen Fenster mit einem Durchmesser von 45 mm. Die Fläche des Fensters beträgt somit rund  $16 \text{ cm}^2$  und ist damit mehr als fünfmal so groß wie bei sonstigen einfachen Endfensterzählrohren mit ca.  $3 \text{ cm}^2$ . Mit dem Inspector kann man die Impulsrate zeitabhängig messen, dazu lässt sich die Messzeit von 1 Minute in bestimmten Intervallen bis 24 Stunden vorwählen. Weiter sind Messungen der Dosisleistung in Impulsen/Minute bzw. Impulsen/Sekunde und in Mikrosievert/Stunde, aber auch die Kalibrierung mittels eines Kalibrierstrahlers und der Anschluss an externe Geräte, z.B. an einen PC, möglich. Aufgrund seiner Genauigkeit, die auch im Vergleich mit wesentlich teureren Profimessgeräten wie dem Living Level Monitor LLM 500 getestet wurde, und seiner Empfindlichkeit sowie des großen Fensters scheint er im Preis-Leistungs-Verhältnis zu den besten Geräten für den Schuleinsatz zu zählen. Die Messung wird beim Inspector auf einem LCD-Display angezeigt, auf dem auch die Betriebsart und weitere Informationen sichtbar sind.



Bild 1: Endfensterzählrohr Inspector

# 1 Vorbemerkungen zur Bedeutung der Radioaktivität

## 1.1 Der Lehrplanbezug

Der Lehrplan sieht vor:

„Bei der Behandlung der Radioaktivität müssen die Schüler erkennen, dass das Atommodell, mit dessen Hilfe sie bisher viele Erscheinungen besser verstehen und erklären konnten, weiter ausgebaut werden muss; sie lernen deshalb eine Struktur des Atomkerns kennen, mit der die Radioaktivität erklärt werden kann. Die Schüler sollen wissen, dass es verschiedene Arten radioaktiver Strahlung gibt, und sie sollen erfahren, dass diese entsteht, wenn gewisse Atomkerne zerfallen. Sie sollen auch biologische Wirkungen und medizinische Anwendungen radioaktiver Strahlung kennenlernen und befähigt werden, Maßnahmen zum Schutz vor radioaktiver Strahlung zu erklären.“

Die Schüler sollen damit befähigt werden, moderne technische Entwicklungen und ihre Auswirkungen zu verstehen und zu beurteilen. Gerade bei einem so brisanten wie gleichermaßen sensiblen Thema, das immer wieder im Kreuzpunkt öffentlicher Diskussionen steht und das wie kaum ein anderes unter oftmals verfälschten Darstellungen leidet, ist es notwendig, sachlich fundierte, genaue und vor allem verständliche Informationen zu geben. Dazu ist es bei der Komplexität und der Schwierigkeit des Themengebietes aber auch notwendig, gutes Anschauungsmaterial, leicht verständliche und einsichtige Erklärungen, aber auch nachvollziehbare, einfache und ungefährliche Experimente anzubieten, die das Gehörte „begreifbar“ machen. Darüber hinaus bietet die Radioaktivität aber auch eine große Chance. Wie in kaum einem anderen Gebiet lassen sich vielfältige Verknüpfungen von der Physik und z.T. auch von der Chemie zu anderen Fachgebieten herstellen und es ist ein breiter Raum für handlungsorientiertes Lernen vorhanden.

## 1.2 Handlungsorientiertes und fächerübergreifendes Lernen

Bisher war der Umgang mit der Radioaktivität wegen der Gefährlichkeit auf wenige Versuche beschränkt, die zudem überwiegend Lehrerversuche waren. Neue Versuche, entwickelt von Prof. H. v. Philipsborn, Universität Regensburg, beschäftigen sich auf gefahrlose, leicht nachvollziehbare Weise mit der Umweltradioaktivität und sind auch von Schülern durchzuführen. Einige dieser Versuche werden in dieser Zusammenstellung kurz erläutert.

Aber nicht nur zur Umwelt, auch zu vielen anderen Fächern bestehen Bezüge. Gesundheitliche Auswirkungen und Gefährdungen schlagen eine Brücke zur Biologie. Das Atommodell aus der Chemie muss weiterentwickelt und verfeinert werden, um neue Abläufe erklären zu können. Kenntnisse aus der Mathematik zur Potenz- und Logarithmusrechnung sowie zu Exponentialfunktionen werden benötigt, um die Zerfallsprozesse rechnerisch zu erfassen. Bei vielen radioaktiven Prozessen handelt es sich um zufällig ablaufende, also statistische Prozesse. Die Informatik bietet hier mit Simulationprogrammen ein wichtiges Hilfsmittel zur Veranschaulichung solcher Prozesse. Die Geschichte der Radioaktivität ist ein bestimmendes Element in der Weltgeschichte, radioaktive Techniken haben enorme Auswirkungen in sozialer und moralischer Hinsicht. Anknüpfungspunkte für Diskussionen finden sich so in Sozialkunde, in Religionslehre oder in Ethik und im Deutschunterricht. Gerade der Deutschunterricht bietet viele unterschiedliche Texte zur kritischen Auseinandersetzung mit der Radioaktivität und ihren

vielfältigen Folgen. Technische Anwendungen, z.B. in der Medizin mit Diagnostik und Therapeutik, in der Materialuntersuchung oder in der Energiewirtschaft schaffen die Verbindung zum praxisorientierten Lernen.

Eigenarbeit der Schüler und somit Handlungsorientierung ist z.B. bei der Sammlung von Daten zur Umweltradioaktivität in der eigenen Region oder zu ausgesuchten Themenbereichen gefragt. Die statistischen Landesämter, das statistische Bundesamt, die Strahlenschutzbehörden, Universitäten, Landkreise, Städte und Gemeinden, aber auch Krankenhäuser, Energieversorgungsunternehmen oder größere Firmen sind hier die Ansprechpartner. Der Themenbereich „Radioaktivität“ eignet sich somit vorzüglich für fächerübergreifende Projektarbeiten.

Auf eine Informationsquelle möchte ich in diesem Zusammenhang besonders hinweisen, auf das Internet. Hier finden sich viele gute Seiten zum Themenbereich „Radioaktivität“, einige dieser Seiten werden im folgenden aufgelistet.

### **Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernkraftwerke in der Schweiz**

<http://www.hsk.psi.ch/>

### **University of Michigan**

<http://www.physics.isu.edu/radin/cover.htm>

### **GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit**

<http://www.gsf.de/>

### **Zentrale für Unterrichtsmedien**

[www.zum.de](http://www.zum.de) dazu besonders: [www.zum.de/dwu/](http://www.zum.de/dwu/)

### **Umweltschutz in Bayern**

[www.bayern.de/umwelt/](http://www.bayern.de/umwelt/)

### **Deutsches Klimarechenzentrum**

[www.dkrz.de/schule/energie/enk-21.html](http://www.dkrz.de/schule/energie/enk-21.html)

### **Energieversorgung Schwaben**

[www.evs.de/schule/umaterial/fohlen/fohlen.html](http://www.evs.de/schule/umaterial/fohlen/fohlen.html)

### **Radioaktivität in Baden-Württemberg**

[www.uis-extern.um.bwl.de/abt3/radio95/bericht.htm#inhalt](http://www.uis-extern.um.bwl.de/abt3/radio95/bericht.htm#inhalt)

### **Universität Regensburg**

[www.rchsg19.chemie.uni-regensburg.de/AK\\_R+U/html/links/linksd.html](http://www.rchsg19.chemie.uni-regensburg.de/AK_R+U/html/links/linksd.html)

### **ETH Zürich**

[educeth.ethz.ch/physik/leitprog/radio/einfuehr.html](http://educeth.ethz.ch/physik/leitprog/radio/einfuehr.html)

Viele weitere Links durch Suchen mit einer Suchmaschine, z.B. ALTAVISTA, unter dem Stichwort RADIOAKTIVITÄT o.ä.



# 2 Grundlegend: Das Atommodell

## 2.1 Das Vorstellungsvermögen

In der Einführung wird noch einmal auf das erste einfache Atommodell eingegangen und dabei aber auch versucht, den Schülern die Dimensionen klarzumachen, denn gerade in der Atom- und Kernphysik ist es oftmals schwierig, sich die Zahlen vorzustellen.

Alle Stoffe sind aus kleinsten stofftypischen Teilchen, den Atomen, aufgebaut, die so klein sind, dass man sie mit bloßem Auge, aber auch mit einem normalen Lichtmikroskop nicht sehen kann. In jeder Körperzelle und in jedem Wassertropfen gibt es eine unvorstellbar große Zahl von Atomen.

1 Wassertropfen enthält ca.  $10^{21} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$  Atome.

Diese Zahl ist für uns nicht vorstellbar. Aber wir können sie veranschaulichen. Die Entfernung von der Erde zur Sonne beträgt rund 150 000 000 km. Nehmen wir an, da die Atome ja sehr klein sind, dass 1 000 000 Atome nebeneinander 1 mm ergeben, dann würden alle Atome des Wassertropfchens aneinandergereiht immer noch mehr als die sechsfache Entfernung Erde - Sonne ergeben.

Wichtig sind für die Schüler genaue Grundkenntnisse und Modellvorstellungen, die sie befähigen, mit den physikalischen Begriffen umzugehen. Das Kernmodell sollte deshalb gut gegliedert erarbeitet und veranschaulicht werden.

## 2.2 Das Kernmodell:

1. Ein **Atom** besteht aus einem **Kern** und einer **Hülle**.
2. Der **Kern** ist sehr klein. Er ist aus elektrisch positiv geladenen **Protonen** und aus elektrisch neutralen **Neutronen** zusammengesetzt. Protonen und Neutronen werden zusammen als **Nukleonen** bezeichnet.
3. Die **Hülle** wird durch elektrisch negativ geladene **Elektronen** gebildet.
4. Das **Atom** ist nach außen hin **elektrisch neutral**, d.h. die Zahl der Protonen im Kern ist gleich der Zahl der Elektronen in der Hülle. Hat ein Atom zu viele oder zuwenig Elektronen in der Hülle, so ist es nicht mehr elektrisch neutral, sondern negativ oder positiv geladen; es wird als **Ion** bezeichnet.
5. Atome, die chemisch gleich reagieren, gehören zum gleichen Element. Die verschiedenen Elemente unterscheiden sich durch die Anzahl der Protonen im Kern. Die Protonenzahl ist charakteristisch für ein bestimmtes Element und wird als Ordnungszahl oder **Kernladungszahl** bezeichnet.
6. Wenn sich zwei oder mehrere Atome verbinden, entsteht ein **Molekül**. Zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom verbinden sich z. B. zu einem Wassermolekül  $\text{H}_2\text{O}$ .

7. In der Natur kommen 92 Elemente vor, beginnend mit Wasserstoff mit einem Proton im Kern und endend mit Uran mit 92 Protonen im Kern. Elemente werden durch eine Abkürzung (chemisches Symbol) gekennzeichnet.
8. Die Atome eines Elements können unterschiedliche Anzahlen von Neutronen in ihrem Kern haben. Sie werden dann als **Isotope** des Elements bezeichnet. Chemisch verhalten sich die Isotope eines Elements bis auf feine Unterschiede gleich, sie unterscheiden sie jedoch in ihren physikalischen Eigenschaften. Insgesamt sind heute ca. 2000 Isotope bekannt. Für Atomkerne gleicher Zusammensetzung hat man den Begriff **Nuklid** geprägt.
9. In der **Nuklidschreibweise** wird vor dem chemischen Symbol oben die Ordnungszahl (= Protonenzahl) und unten die Nukleonenzahl (Summe von Protonen und Neutronen) angegeben.
10. Nur etwa 250 der ca. 2000 Isotope sind stabil, die anderen zerfallen ohne Einfluss von außen. Sie sind **radioaktiv**. Den radioaktiven Zerfall von Isotopen kann man nicht aufhalten oder beeinflussen. Bei ihm entstehen als Folgeprodukte oft Atome eines anderen Elements, die entweder stabil oder wieder radioaktiv sein können.

**Tabelle 1: Isotope des Wasserstoffs**

gewöhnlicher Wasserstoff	schwerer Wasserstoff	überschwerer Wasserstoff
${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$
1 Proton	1 Proton	1 Proton
kein Neutron	1 Neutron	2 Neutronen
1 Elektron	1 Elektron	1 Elektron
kommt in der Natur vor	kommt in der Natur vor	zunächst künstliches Isotop, wurde dann aber auch in der Natur entdeckt

**Tabelle 2: Beispiele von Isotopen, die in der Natur vorkommen**

Kohlenstoff ${}^{12}_6\text{C}$	6 Protonen	6 Neutronen	stabil
Kohlenstoff ${}^{13}_6\text{C}$	6 Protonen	7 Neutronen	stabil
Kohlenstoff ${}^{14}_6\text{C}$	6 Protonen	8 Neutronen	radioaktiv
Blei ${}^{204}_{82}\text{Pb}$	82 Protonen	124 Neutronen	stabil
Radon ${}^{222}_{72}\text{Rn}$	86 Protonen	136 Neutronen	radioaktiv
Radium ${}^{226}_{88}\text{Ra}$	88 Protonen	138 Neutronen	radioaktiv
Uran ${}^{235}_{92}\text{U}$	92 Protonen	143 Neutronen	radioaktiv
Uran ${}^{238}_{92}\text{U}$	92 Protonen	146 Neutronen	radioaktiv

Es ist immer interessant, etwas „Verwunderliches“ über einen neuen Begriff zusammenzutragen. Solche Besonderheiten bleiben oft gut im Gedächtnis haften, sie bewirken aber auch, dass das Wissen über den Begriff gespeichert wird. Hierzu einiges zu den Isotopen:

- ⇒ Gewöhnlicher Wasserstoff und **Deuterium** sind stabil, aber **Tritium** ist radioaktiv. Ähnlich verhält es sich bei Kohlenstoff, bei dem das Kohlenstoffisotop  $^{12}_6\text{C}$  und das Kohlenstoffisotop  $^{13}_6\text{C}$  stabil sind, das Kohlenstoffisotop  $^{14}_6\text{C}$  ist dagegen radioaktiv.
- ⇒ Cäsium besitzt mit  $^{133}_{55}\text{Cs}$  nur ein stabiles Isotop, hat aber 30 radioaktive Isotope, darunter  $^{134}_{55}\text{Cs}$  und  $^{137}_{55}\text{Cs}$ , die beide künstlichen Ursprungs sind.  $^{137}_{55}\text{Cs}$  wurde vor allem nach dem Unfall von Tschernobyl als gefährliches Folgeprodukt negativ bekannt.
- ⇒ Es gibt kein stabiles Isotop von Radon oder Uran.

# 3 Fächerübergreifend: Die Geschichte der Radioaktivität

## 3.1 Die primordiale Radioaktivität

Die Geschichte der Radioaktivität beginnt natürlich mit der Entstehung unseres Sonnensystems und damit der Entstehung der Elemente sowie der Entstehung der Radionuklide in der Erdkruste. Vor rund 5 Milliarden Jahren bildeten sich in der Erdkruste Nuklide wie die Uranisotope  $^{238}_{92}\text{U}$  und  $^{235}_{92}\text{U}$ , das Thoriumisotop  $^{232}_{90}\text{Th}$ , das Kaliumisotop  $^{40}_{19}\text{K}$  und das Rutheniumisotop  $^{87}_{44}\text{Ru}$  aus. Diese Art der Radioaktivität wird auch als primordiale Radioaktivität bezeichnet. Das Isotopenverhältnis von  $^{235}_{92}\text{U}$  zu  $^{238}_{92}\text{U}$  lag damals bei 30:1, heute bei 0,0071:1. Von der Geburt unserer Erde bis vor rund einer Milliarde Jahren war Natururan also spalt- und waffenfähig. Aufgrund der kürzeren Halbwertszeit von  $^{235}_{92}\text{U}$  mit 0,7 Milliarden Jahren gegenüber 4,5 Milliarden Jahren bei  $^{238}_{92}\text{U}$  verschob sich im Laufe der Jahrtausende das Verhältnis zugunsten von  $^{238}_{92}\text{U}$ .

## 3.2 Der erste natürliche Kernreaktor

Die Tatsache, dass bis vor rund 1 Milliarde Jahren Uran von Natur aus spalt- und waffenfähig war, führte nach Meinung vieler Fachleute zu einem prähistorischen Ereignis, das zeigt, welche nach unserem heutigen Verständnis hochtechnisierten Vorgänge ohne Zutun des Menschen in der Natur möglich sind.

Vor 1,7 Milliarden Jahren soll ein natürlicher Atom-Reaktor im Gebiet der heutigen Republik Gabun in Afrika in Betrieb gewesen sein. Er war vermutlich über mehrere hunderttausend Jahre aktiv und verbrauchte während dieser Zeit sechs Tonnen Uran. Dieser „natürliche Atomreaktor“ wurde erst 1972 von einem französischen Geologen entdeckt. Zunächst fiel auf, dass gegenüber anderen Uranlagerstätten Unterschiede im Gehalt von  $^{235}_{92}\text{U}$  auftraten. Diese Differenz konnte nur dadurch erklärt werden,  $^{235}_{92}\text{U}$  einer Kernspaltung ausgesetzt war. Genauere Untersuchungen ergaben, dass zudem eine auffällig hohe Anzahl an Kernspaltungsprodukten vorhanden war. Damit ein derartiger Naturreaktor in Betrieb sein konnte, musste eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. In technischen Atomreaktoren ist  $^{235}_{92}\text{U}$  angereichert, hier war  $^{235}_{92}\text{U}$  von Natur aus in höherer Konzentration vorhanden. Rückrechnungen ergaben, dass der Gehalt bei 3% gelegen haben muss. Diese 3% an  $^{235}_{92}\text{U}$  waren genug, um eine Kettenreaktion in Gang zu bringen, die kritische Masse war überschritten. Dabei wirkte das reichlich vorhandene, in die geologische Formation eingedrungene Grundwasser als Moderator und Kühlmittel. Das Vorkommen von Neodym ist ein weiteres Indiz für die Theorie eines natürlichen Atomreaktors, die nachgewiesenen Gehalte entsprechen denen von technischen Reaktoren und unterscheiden sich deutlich von den sonstigen natürlichen Gehalten. Es gilt sogar als erwiesen, dass der Reaktor seinen eigenen Brennstoff „herstellte“, indem er durch Beschließung von  $^{238}_{92}\text{U}$  mit Neutronen das leichter spaltbare Plutonium  $^{239}_{94}\text{Pu}$  herstellte. Lange, bevor die Menschen ihren ersten Atomreaktor bauten, hatte also die Natur die Kernspaltung bereits vorweggenommen.

### 3.3 Die Entdeckung des Urans

Unser eigentlich historischer Gang durch die Radioaktivität fängt mit der Entdeckung des Urans durch MARTIN HEINRICH KLAPROTH, Inhaber der Simonschen Apotheke zu Berlin, an. Der 1743 in Wernigerode im Harz geborene Apotheker arbeitete an der Analyse des Minerals Pechblende aus der Grube Georg Wagsfort („Georg, wage es fort“, Silberbergwerk seit 1680) zu Johanngeorgenstadt im sächsischen Erzgebirge. Seit der Mitte des 18. Jahrhunderts war der Charakter der Pechblende umstritten. KLAPROTH legte am 24.09.1789 das Ergebnis seiner Untersuchungen den 24 Mitgliedern der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften unter dem Titel „Uranit, ein neues Halbmetall“ vor. Die Namengebung erfolgte „nach dem Beyspiel der alten Philosophen“ von einem Planetennamen. Er wählte dafür den am 13. März 1781 von dem Militärmusiker FRIEDRICH WILHELM HERSCHEL entdeckten Planeten Uranus. Seinen 1789 geprägten Namen Uranit wandelte KLAPROTH später in Uranium um. Übrigens entdeckte KLAPROTH auch die Elemente Titan und Zirkonium.

Die folgenden Jahre brachten Beschäftigungen mit dem neuen Element, die Herstellung von metallischem Uran, die erste Atomgewichtsbestimmung, sein Einsatz in der Herstellung intensiver, leuchtender Farben, die Herstellung von Uranglas: von 1789 bis 1898, dem Jahr der Entdeckung des Radiums, erschienen mehr als 850 Publikationen über Uran und seine Anwendungen. In der Zwischenzeit hatte man Uranminerale auch in den berühmten Joachimsthaler Silbergruben entdeckt. Diese Silberlagerstätte war für die Wirtschaft des 16. Jahrhunderts von europäischer Bedeutung. Hier hat der große Universalgelehrte GEORGIUS AGRICOLA sein Standardwerk über den Bergbau „De re metallica“ geschrieben. Um 1515 wurden die ersten Silberfunde gemacht und es setzte in der Folge ein Silberrausch ein. Hauptsächlich sächsische Bergleute, aber auch solche aus Böhmen und Tirol zogen unter dem Ruf „Ins Thal, ins Thal, mit Mutter, mit all!“ nach Joachimsthal. 1534 hatte Joachimsthal 18200 Einwohner, zum Vergleich hatten damals Dresden 6500 und Leipzig 10000 Einwohner. Hier wurde der Joachimsthaler geprägt, der dem Taler seinen Namen gab und von dem sich auch der Name „Dollar“ ableitet. Lange Zeit blieb es dann um Joachimsthal ruhig bis zur Entdeckung des Urans und zur Gründung der k. k. Uranfabrik im Jahr 1855. Bis ins Jahr 1898 wurden in Joachimsthal ca. 1600 Tonnen Uranfarben mit einem Verkaufswert von 3 Millionen Gulden erzeugt und das Joachimsthaler Uranerz rückte zunächst in den Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses.

### 3.4 BECQUERELS „Uranstrahlen“

Die eigentliche Geschichte der Radioaktivität beginnt dann im Jahr 1896 mit der Entdeckung einer neuen Strahlung. Ihr war die Entdeckung der Röntgenstrahlen vorausgegangen und sie wurde durch RÖNTGENS Entdeckung erst ausgelöst. Am 08.11.1896 beobachtete CONRAD WILHELM RÖNTGEN (1845 – 1923) bei seinen Experimenten eine Strahlung, der er den Namen X-Strahlung (im englischen Sprachgebrauch immer noch als „x-rays“ bezeichnet) gab. Die Physiker GOLDSTEIN und CROOKES hatten die Kathodenstrahlen untersucht und auch RÖNTGEN arbeitete mit einer Crookeschen Röhre, einer Hochvakuum-Glasröhre mit einer Drahtkathode und einer Kupferanode. Beim Beschießen der Anode mit Elektronen hoher Energie wollte er eigentlich die Fähigkeit der Kathodenstrahlen, Materialien zum Fluoreszieren zu bringen, untersuchen, entdeckte dabei aber eine Strahlung, die scheinbar in der Lage war, Materie zu durchdringen. Für diese Entdeckung erhielt Röntgen 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Schnell erkannte man die medizinische Bedeutung der Röntgenstrahlung und viele Forscher beschäftigten sich mit dieser neuen Strahlung.

Auch der französische Physiker ANTOINE-HENRI BECQUEREL (1852 – 1908) interessierte sich für die Röntgenstrahlung, denn er vermutete einen Zusammenhang von Röntgenstrahlung und Fluoreszenz, seinem eigentlichen Arbeitsgebiet. Er legte dazu Kaliumuranyl-Kristalle auf eine mit schwarzem Papier umwickelte Photoplatte in das Sonnenlicht. Er nahm an, dass der Kristall durch das Sonnenlicht zum Fluoreszieren gebracht wird und die dabei erzeugten Röntgenstrahlen die Photoplatte schwärzen. Da die Photoplatte einen dunklen Fleck aufwies, nahm er an, dass die Fluoreszenz Röntgenstrahlung erzeugt. An den nachfolgenden bewölkten Tagen konnte er seine Experimente nicht fortführen, er legte aber eine bereits vorbereitete Platte und einen Kristall in eine Schublade. Um sicherzugehen, dass ohne Einwirkung von Sonnenlicht keine Reaktion erfolgt, entwickelte er diesen Film und entdeckte einen Grauschleier. Es musste also eine Strahlung vorhanden sein, die nichts mit Fluoreszenz oder Sonnenstrahlen zu tun hat. Weitere Versuche erbrachten, dass nur Stoffe, die Uran enthielten, die Photoplatte schwärzten. Damit war klar, dass Uran ein „strahlendes“ Element ist, die Strahlung wurde zunächst als Becquerel- oder Uran-Strahlung bezeichnet. BECQUEREL versuchte in der Folge, das Rätsel dieser Uranstrahlen zu lösen, eine junge Polin half ihm dabei.

### 3.5 Marie und Pierre Curie

Am 7. November 1867 bringt die Frau des Physiklehrers JOSEF SKLODOWSKI ihr fünftes Kind zur Welt, MARIA SALOMEA SKLODOWSKA. Mit vier Jahren lernt die kleine Maria lesen, ist die Klassenbeste und muss nach dem Abschluss des Gymnasiums zunächst als Gouvernante dazu beitragen, die Familie zu ernähren. 1891 geht die 24-Jährige nach Paris, um Physik und Chemie zu studieren. Sie heiratete den Physiker PIERRE CURIE und nennt sich selbst fortan MARIE SKLODOWSKA-CURIE. Im Jahr 1897 bringt sie nicht nur ihre erste Tochter Irène zur Welt, die in die Fußstapfen ihrer Mutter treten sollte, sondern beginnt auch ihre Doktorarbeit mit der Untersuchung der mysteriösen Uranstrahlung, ein wahrlich gewagtes Unterfangen, denn bisher war es in Europa noch keiner Frau gelungen, ihre Promotion abzuschließen. Zusammen mit ihrem Mann Pierre untersucht sie systematisch die Stärke der Aktivität der neuen Strahlung und stellt fest, dass die Aktivität nur von der Menge des enthaltenen Urans abhängt, somit nichts mit chemischen Bindungen zu tun hat, sondern eine atomistische Eigenschaft ist. Bei der Untersuchung fällt ihr auf, dass zwei uranhaltige Minerale, Pechblende und Chalkolit, ungewöhnlich hochaktiv sind. Sie schließt daraus, dass sie ein anderes Element enthalten, das weitaus aktiver als Uran ist. Tatsächlich stoßen sie auf zwei neue Elemente, das Radium und das Polonium, und MARIE CURIE prägt für sie den Namen „radioaktiv“. Für ihre Arbeiten über Radioaktivität erhält sie zusammen mit ihrem Mann und HENRI BECQUEREL 1903 den Nobelpreis. Ihr Ziel gilt der Reindarstellung des Radiums, denn nur in reinem Zustand wird ein Element von der Chemie als gesichert angesehen. Wenn man sich vorstellt, dass in einer Tonne Pechblende nur ca. 200 bis 250 mg Radium enthalten sind, weiß man, welche Sysiphusarbeit dahintersteckt. Auf Bitten der französischen Académie des Sciences an die österreichische Akademie der Wissenschaften, wurden MARIE CURIE die Haldenrückstände der Urangewinnung in St. Joachimsthal zur Verfügung gestellt, insgesamt wahrscheinlich mehr als 60 Tonnen. In der Zwischenzeit wird ihr Mann Pierre von einem Pferdewagen überfahren und stirbt, MARIE CURIE stürzt sich um so verbissener in ihre Arbeit. Sie erhält den Lehrstuhl für Physik ihres Mannes und schließlich gelingt es ihr 1911, 20 mg Radiumchlorid herzustellen. Dafür erhält sie noch im selben Jahr den Nobelpreis für Chemie. Sie war der erste Mensch, der zwei Nobelpreise in zwei verschiedenen Fachgebieten erhielt.

Am eigenen Leib hatten die Curies die zerstörerische Wirkung der Radioaktivität am Gewebe erfahren, Radium erlangte große Bedeutung für die Behandlung von Hautkrebs und es wurde bald fabrikmäßig hergestellt. Marie Curie erlangte Weltruhm, ihre Tochter IRÈNE JOLIOT-CURIE setzte zusammen mit ihrem Mann FRÉDÉRIC JOLIOT die Arbeit der Mutter fort und stellte

künstliche Atomarten, Transurane, her, wofür sie 1935 den Nobelpreis für Chemie erhielt. Diese Ehrung ihrer Tochter erlebte MARIE CURIE nicht mehr, sie starb 1934, allerdings konnte sie sie noch kurz vor ihrem Tod über den Erfolg ihrer Tochter und ihres Schwiegersohnes freuen.

### 3.6 Die Etappen der Entwicklung

Mit den Erfolgen von HENRI BECQUEREL sowie von Pierre und Marie Curie ist eine unumkehrbare Entwicklung eingeleitet worden, die in mehreren Etappen fortschreitet. Von **1896 bis 1920** könnte man sie als **Etappe der Atomphysik** bezeichnen, in deren Rahmen der Mensch bis 1910 zunächst die radioaktiven Elemente entdeckt und ihre Eigenschaften untersucht. Im zweiten Teil dieser Etappe von 1910 bis 1920 erforscht dann der Mensch die Atomkerne. Es folgt die **Etappe der Kernphysik**, die die Jahre von **1920 bis 1940** umfaßt und in der der Mensch die Atomkerne verändert. **Ab 1942** schließlich beginnt die **Etappe der Kernenergie**, in der der Mensch Energie aus Atomkernen gewinnt. Einige „Highlights“ dieser Etappen sollen kurz vorgestellt werden:

### 3.7 Grundlegende Erforschung der radioaktiven Strahlung

BECQUEREL arbeitete nach der Entdeckung der „Uranstrahlen“ weiterhin an den Phänomenen der radioaktiven Strahlung. Nach eingehender Untersuchung der Betastrahlen und ihrer Eigenschaften verkündete er im Jahr 1900, dass die Betastrahlen aus Elektronen bestehen. Im gleichen Jahr entdeckte der französische Physiker PAUL ULRICH VILLARD (1860 bis 1934) in den Uranstrahlen, noch eine dritte Strahlungsart, auf die Magneten keine Wirkung ausüben. Diese elektromagnetische Strahlung erhielt den Namen „**Gamma-Strahlung**“. Noch im selben Jahr vermuteten CROOKES und BECQUEREL, dass sich Uran durch Abgabe von Strahlung in andere Atome umwandelt, die stärker radioaktiv sind. Dies war der erste Hinweis, dass Radioaktivität auf die spontane Umwandlung von Atomen in andere Atome zurückzuführen ist.

Ein Jahr später, also im Jahr 1901, führte PIERRE CURIE Messungen durch, um die Wärmeenergie zu bestimmen, die von Radium in Form von Strahlung abgegeben wird. Er fand heraus, dass ein Gramm Radium in jeder Stunde eine Wärmemenge von rd. 587 Joule abgibt. Diese bei radioaktiver Strahlung abgegebene Energie lag weitaus höher als bei anderen Vorgängen, die die Menschheit bisher kannte. Es war ein erster Hinweis auf die enormen Energiepotentiale, die im Atom schlummern.

Wieder ein Jahr später, 1902, fanden die beiden britischen Wissenschaftler, der Physiker ERNEST RUTHERFORD (1871 bis 1937) und der Chemiker FREDERICK SODDY (1877 bis 1956) heraus, dass die Elemente Uran und Thorium während des Zerfalls eine Reihe von Tochtersubstanzen bildeten, die ersten **radioaktiven Zerfallsreihen** waren entdeckt.

Eine weitere Entschlüsselung gelang RUTHERFORD zusammen mit seinem deutschen Assistenten JOHANNES WILHELM GEIGER (1882 bis 1945) im Jahr 1906. Sie stellten fest, dass das **Ladung-Masse-Verhältnis bei Alphastrahlung** das gleiche wie bei einem Heliumatom, bei dem zwei Elektronen entfernt wurden, ist. Auch die Röntgenstrahlung war weiter interessantes Forschungsobjekt. Im gleichen Jahr bewies der britische Physiker CHARLES GLOVER BARKLA (1877 bis 1944), dass die Röntgenstrahlen elektromagnetische Strahlen sind. Weiter bewies er, dass die bei der **Streuung von Röntgenstrahlen** an verschiedenen Elementen entstehende charakteristische Röntgenstrahlung unterschiedliche Durchdringungsfähigkeit aufweist. Dabei beschrieb er die von ihm so genannte K-Strahlung und die L-Strahlung. Für diese Arbeit erhielt er

1917 den Nobelpreis für Physik. Auch im gleichen Jahr stellte der amerikanische Geologe CLARENCE EDWARD DUTTON (1841 bis 1912) die Hypothese auf, dass radioaktive Nester in der Erdkruste so viel Hitze entwickeln, dass sie vulkanische Tätigkeiten entwickeln können. Diese Hypothese stand am Anfang der Erkenntnis, dass durch Radioaktivität beträchtliche Wärme in der Erdkruste entsteht.

### 3.8 Erste Anwendungen und Verfeinerung der Nachweismethoden

Eine weitreichende Überlegung stellte der amerikanische Chemiker BERTRAM BOLDEN BOLTWOOD (1870 bis 1927) an. Er war überzeugt, dass Blei das Endprodukt der Uran-Thorium-Zerfallsreihe sein muss. Seiner Meinung nach müsste man aus dem Bleigehalt in Uranerzen und aus der bekannten Zerfallsrate das Alter des Erzstückes berechnen können. Die Möglichkeit der **Altersbestimmung mittels Radioaktivität** war erkannt und sollte bis heute ein weitreichendes Arbeitsgebiet erschließen.

Im Jahr 1908 erfand der Assistent von RUTHERFORD, GEIGER, ein Gerät, mit dem man Alphapartikel nachweisen und schließlich auch zählen konnte, den **Geigerzähler**. Ein weiteres wichtiges Gerät zum Nachweis radioaktiver Strahlung war dann die 1911 von dem schottischen Physiker CHARLES THOMSON REES WILSON (1869 bis 1959) entwickelte **Nebelkammer**. Es war gelungen, die Bahnen radioaktiver Teilchen sichtbar zu machen. Für diese Arbeit erhielt WILSON im Jahr 1927 den Nobelpreis für Physik.

Im gleichen Jahr wie WILSON, 1911, gelang es dem amerikanischen Physiker ROBERT ANDREWS MILLIKAN (1868 bis 1953) in seinem berühmten **Millikan-Versuch**, den seither unzählige Schüler des Leistungskurses Physik und Physik-Studenten nachvollzogen haben, die **elektrische Elementarladung** zu bestimmen. Auch er erhielt den Nobelpreis für Physik, und zwar im Jahr 1923. Noch eine Grundlage für einen Physik-Nobelpreis, verliehen 1936, wurde im Jahr 1911 gelegt: Der österreichische Physiker VIKTOR FRANZ HESS (1883 bis 1964) entdeckte die **kosmische Strahlung**. Und noch eine große Theorie wurde im gleichen Jahr formuliert: RUTHERFORD legte sein **Rutherfordsches Atommodell** vor. Praktisch die gesamte Masse des Atoms ist in seinem Kern konzentriert, der positiv geladen ist. Die Hülle wird von Elektronen gebildet, deren negative Ladung die positive des Kerns kompensiert, so dass das Atom nach außen hin elektrisch neutral ist. Der größte Teil des Atoms besteht jedoch aus leerem Raum.

Nun ging es Schlag auf Schlag weiter. 1912 entdeckte der deutsche Physiker MAX THEODOR FELIX VON LAUE (1879 bis 1960) die **Beugung von Röntgenstrahlung** am Kristallgitter und nahm das Beugungsmuster auf einer fotografischen Platte auf. Damit war die Grundlage geschaffen, die Feinstruktur von Kristallen zu bestimmen, aber auch chemische Substanzen zu identifizieren, z.B. Minerale. Der britische Chemiker FREDERICK SODDY formulierte die **Verschiebungssätze der Radioaktivität** und führte die **Isotope** ein, wofür er 1921 den Nobelpreis für Chemie erhielt. Im gleichen Jahr stellte der dänische Physiker NIELS HENDRIK DAVID BOHR (1885 bis 1962) sein berühmtes **Bohrsches Atommodell** auf, in dem er zum ersten Mal die Quantentheorie auf das Atom anwandte.



### 3.9 Die Erforschung der Elementarteilchen

1914 kam RUTHERFORD zu dem Schluss, dass es keine kleineren positiv geladenen Teilchen als Wasserstoffkerne gibt. Er nannte deshalb den Wasserstoffkern „**Proton**“. Bereits 1905 hatte ALBERT EINSTEIN (1879 bis 1955) seine **spezielle Relativitätstheorie** vorgelegt, als deren Folge sich seine berühmte Gleichung  $E = m \times c^2$  ergibt. Nun veröffentlichte er 1916 die **allgemeine Relativitätstheorie**. Im Periodensystem der Elemente waren immer noch Lücken. 1917 entdeckten der deutsche Chemiker OTTO HAHN (1879 bis 1968) und die österreichische Physikerin LISE MEITNER (1878 bis 1968) das **Proactinium**, das Element mit der Ordnungszahl 91.

Zwischenzeitlich beschäftigte man sich nicht nur mit der Erforschung grundlegender Strukturen und der Entschlüsselung des Aufbaus der Materie, die neu gefundenen Phänomene fanden auch Anwendungen. Der ungarische Chemiker KARL VON HEVESY (1885 bis 1966) hatte als erster die Idee, radioaktive Substanzen als **Tracer** einzusetzen, um zum Beispiel den Weg des Wassers bei der Aufnahme durch Pflanzen zu verfolgen.

Das Jahr 1919 brachte die erste Kernreaktion. Beim Beschuß von Stickstoff mit Alphateilchen konnte RUTHERFORD auf einem Zinksulfidschirm helle Szintillationen beobachten. Seine Beobachtungen führten ihn zu dem Schluss, dass bei seinem Versuch ein Helium- und ein Stickstoffkern in einen Wasserstoff- und einen Sauerstoffkern umgewandelt werden. Die erste **künstliche Kernreaktion** war gelungen.

Im Jahr 1923 gelang in der Untersuchung der elektromagnetischen Strahlung ein entscheidender Durchbruch. Zunächst wies der amerikanische Physiker ARTHUR HOLLY COMPTON (1892 bis 1962) den **Teilchencharakter** von Wellen nach, anschließend behauptete der französische Physiker LOUIS-VICTOR-PIERRE-RAYMOND DE BROGLIE (1892 bis 1987), dass jedes Teilchen auch eine Materiewelle besitzt und somit **Wellencharakter** aufweist. Der **Dualismus Teilchen-Welle** war geboren und sollte die Quantenphysik noch viele Jahre beschäftigen. In der Folge schufen in den Jahren 1925 und 1926 der deutsche Physiker WERNER KARL HEISENBERG (1901 bis 1976) mit seiner Matrizenmechanik, der österreichische Physiker ERWIN SCHRÖDINGER (1887 bis 1961) und der deutsche Physiker MAX BORN (1882 bis 1970) mit seiner probabilistischen Betrachtungsweise die **Quantenmechanik**. Quantenmechanik und Relativitätstheorie sind die beiden großen theoretischen Grundlegungen in der Physik des 20. Jahrhunderts. 1927 legte HEISENBERG schließlich seine berühmte **Unschärferelation** vor, mit der er bewies, dass es nicht möglich ist, Impuls und Position eines Teilchens gleichzeitig genau zu bestimmen.

Die Vielzahl an Entdeckungen macht es unmöglich, alle an dieser Stelle zu erfassen. Es ist ein breiter Bogen von der Anwendung der Quantenmechanik auf die chemische Bindung über den Raman-Effekt, die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern, die Untersuchung von Sauerstoff-Isotopen, die Antimaterie, das Neutrino, das Deuterium bis hin zur Entdeckung des Neutrons. Dem englischen PHYSIKER JAMES CHADWICK gelang 1932 die **Entdeckung des Neutrons**, wofür er 1935 den Nobelpreis erhielt. In Folge dieser Entdeckung wies HEISENBERG darauf hin, dass der Atomkern aus Protonen und Neutronen bestehen muss, nicht aus Protonen und Elektronen, wie es 1914 postuliert worden war.

### 3.10 Die künstliche Radioaktivität und die erste Kernspaltung

Der große Bogen spannte sich weiter, vom Positron über das Elektronenmikroskop bis zur **künstlichen Radioaktivität**, die wieder einen Meilenstein darstellt. Im Jahr 1934 wandelten die französischen Physiker IRÈNE JOLIOT-CURIE (1897 bis 1956, die Tochter von Marie Curie) und ihr Mann FRÉDÉRIC JOLIOT Aluminiumatome durch Beschuß mit Alphateilchen in ein künstliches Phosphorisotop um. Im folgenden Jahr, 1935, folgte eine weitere wichtige Entdeckung, der kanadisch-amerikanische Physiker ARTHUR JEFFREY DEMPSTER (1886 bis 1950) wies die Existenz des Uran-Isotops  $^{235}_{92}\text{U}$  nach.

Im Jahr 1939 war es dann so weit, eine Entdeckung sollte die Welt weitreichend verändern. OTTO HAHN und LISE MEITNER beschossen Uran mit Neutronen, um ein Radium-Isotop hervorzubringen. Dabei arbeiteten sie auch mit dem chemisch sehr ähnlichen Barium. Die Arbeit wurde zunächst unterbrochen, da die Jüdin LISE MEITNER vor den Nationalsozialisten nach Schweden flüchten musste. OTTO HAHN arbeitete im weiteren mit dem deutschen Chemiker FRITZ STRAßMANN (1902 bis 1980) zusammen und stellte schließlich fest, dass durch den Neutronenbeschuß von Uran ein radioaktives Barium-Isotop gebildet wird. Der Urankern musste in zwei Teile zerfallen sein, ein Vorgang, der später als **Kernspaltung** bezeichnet wurde. HAHN war sich dieser Theorie als etwas Unerhörtes bewußt. Er veröffentlichte wohl seine Ergebnisse, erwähnte aber die Kernspaltung nicht.

In der Zwischenzeit war LISE MEITNER zu den gleichen Ergebnissen gekommen und sie veröffentlichte ihre theoretischen Überlegungen. Über ihren Neffen OTTO ROBERT FRISCH (1904 bis 1979) und NIELS BOHR gelangte diese Nachricht nach Amerika, wo sich die These, eine Kernspaltung sei das Ergebnis des Neutronenbeschusses von Uran, rasch bestätigte. Bereits 1932 war dem in Ungarn geborenen Physiker LEO SZILARD (1898 bis 1964) die Idee gekommen, es könne eine **nukleare Kettenreaktion** geben. Dabei müßte sich durch die Schnelligkeit des Ablaufs einer solchen Kettenreaktion die freigesetzte Energie im Bruchteil einer Sekunde zu einer gewaltigen Dimension aufsummieren.

### 3.11 Kernenergie und Atombombe

Die Idee einer **Atombombe** war geboren. Aber erst die Kernspaltung lieferte die Grundlagen dazu. 1941 ordnete der amerikanische Präsident ROOSEVELT das sogenannte **Manhattan-Projekt** an, die Entwicklung einer Atombombe. Dem aus Italien stammenden Physiker ENRICO FERMI (1901 bis 1954) wurde die Leitung des Projekts übertragen. Er baute dazu zunächst einen **Atommeiler** aus Uran und Uranoxid mit Graphitblöcken. Das Graphit diene der Verlangsamung der Neutronen. Als Neutronenabsorber diene Cadmium. Durch Herausziehen der Cadmiumstäbe wurde die Kettenreaktion in Gang gesetzt, durch Hineinschieben wieder unterbrochen. Am 2. Dezember 1942 kam unter der Tribüne des Football-Stadions der Universität Chicago, wo der Atommeiler aus Geheimhaltungsgründen aufgebaut war, die erste kontrollierte Kettenreaktion in Gang und wurde wieder unterbrochen. Es ist der erste **Kernreaktor** und damit der **Beginn des Atomzeitalters**. Die Entwicklung war nicht mehr aufzuhalten. Am 16. Juli 1945 vor Sonnenaufgang wurde 100 Kilometer nordwestlich der Stadt Alamogordo in New Mexico die erste **Atombombe** auf Plutoniumbasis (eigentlich Kernspaltungsbombe) gezündet. Ihre Sprengkraft entsprach 20 000 Tonnen TNT, die Wissenschaftler hatten nur 5 000 Tonnen TNT prognostiziert. Am 6. August 1945 warfen die Amerikaner die erste Atombombe auf die japanische Stadt **Hiroshima** und am 9. August eine zweite auf **Nagasaki**. Sie beendeten den zweiten Weltkrieg und läuteten gleichzeitig den Kalten Krieg und das Wettrüsten ein.

Im Jahr 1949 folgte die erste sowjetische Atombombe und 1952 zündeten die Amerikaner die erste **Wasserstoffbombe**. Angesichts dieser dramatischen und für die Menschheit bedrohlichen Entwicklung verblissen die vielen positiven Aspekte der Kernphysik, zu denen auch die Entwicklung der ersten **Atomuhr** im Jahr 1949 durch den amerikanischen Physiker HAROLD LYONS (geb. 1913) gehört. Bedeutung erlangte auch das radioaktive Kohlenstoff-Isotop  $^{14}_6\text{C}$ , sowohl durch die Altersbestimmung mit Hilfe der **Radiocarbonmethode**, erstmals durch den amerikanischen Chemiker WILLARD FRANK LIBBY (1908 bis 1980) genutzt, als auch durch den Einsatz als Tracer beim Aufbau von Cholesterinmolekülen im Jahr 1949 durch den deutsch-amerikanischen Biologen KONRAD EMIL BLOCH (geb. 1912). Die Entwicklung der Kernenergie geht weiter, oft unter dem Aspekt des Wettrüstens und nicht immer in Hinsicht auf die Energiegewinnung: 1951 wird der erste **Brutreaktor** gebaut, die ersten „**friedlichen**“ **Kernreaktoren** gibt es ab dem Jahr 1954 und die Entwicklung geht weiter bis hin zu den heutigen Umweltdebatten mit der problematischen Entsorgung der radioaktiven Abfälle.

Die Geschichte der Radioaktivität ist spannend und liest sich wie ein Krimi. Sie ist ein Paradebeispiel für ein fächerübergreifendes Thema, das in den Bereichen der Physik, der Chemie, der Biologie, des Umweltschutzes, der Medizin, der Geschichte und der Politik angesiedelt ist.

# 4 Handlungsorientiert: Radioaktivität in der Natur

## 4.1 Der Lehrplanbezug

Handlungsorientierung ist eines der Hauptanliegen des neuen Lehrplans. Der Schüler soll stärker in den Unterricht eingebunden werden, nicht nur reagieren, sondern agieren. Radioaktivität und Handlungsorientierung, scheinbar ein Gegensatz, bedenkt man die Gefährlichkeit der radioaktiven Strahlungen, die vielen Sicherheitsvorkehrungen, die zu beachten sind. Aber Radioaktivität ist auch eine Erscheinung, mit der die Menschheit seit Beginn ihres Weges in der Welt leben muss, der sie tagtäglich ausgesetzt ist. Der Lehrplan sieht vor, dass die Verantwortung des Wissenschaftlers genauso betrachtet werden soll wie die Notwendigkeit gesellschaftlicher Information und die Einflussnahme auf technische Erfindungen. Dem steht vom Lehrplan her die sachliche und genaue Information über Vorgänge gegenüber, um an diesen Diskussionen und Überlegungen teilnehmen zu können. Hier können die Schüler handlungsorientiert arbeiten.

Verteilt über das ganze Land gibt es Meßstationen, die die Umweltradioaktivität erfassen. Vom geologischen Untergrund her kann die terrestrische Grundstrahlung auch auf eng begrenzten Gebieten durchaus unterschiedlich sein. In bestimmten Regionen finden sich radioaktive Heilwässer oder alte Bergwerkshalden, die eine leicht erhöhte Radioaktivität aufweisen. In anderen Gegenden gibt es Untersuchungen, z.B. der Bauämter, Umweltämter oder der Universitäten, über den Radon-Gehalt in Häusern und Baustoffen. Hieraus lassen sich von den Schüler gute Material- und Zahlensammlungen erstellen, aus denen die Belastung durch die Umweltradioaktivität sichtbar wird.

Einen weiteren Aspekt stellen eigene Untersuchungen von Dingen des täglichen Lebens dar. Bestimmte Lebensmittel speichern z.B. Kalium in erhöhtem Maße, sie eignen sich zum Nachweis des radioaktiven Kalium-Isotops  $^{40}_{19}\text{K}$ . Aber auch die Folgeprodukte des Radonzerfalls in der Luft oder im Wasser lassen sich mit neuen Methoden leicht nachweisen. Dies gilt ebenfalls für Baustoffe, wie z.B. die ersten schwedischen Leichtbausteine, die hohe Anteile an Gesteinskomponenten enthalten, die stärker radioaktiv belastet sind.

Die folgende Zusammenstellung soll diesen Themenkreis der Radioaktivität in der Natur und im täglichen Leben etwas näher beleuchten.

## 4.2 Einheiten in der Radioaktivität

Zur Bewertung von Strahlungen sind zunächst die gesetzlich vorgeschriebenen Größen und Maßeinheiten zu beachten.

### Ionendosis

Als Ionendosis bezeichnet man die durch die Strahlung erzeugte Ladung pro Masse der durchstrahlten Luft.

$$\text{Ionendosis} = \frac{\text{erzeugte Ladung}}{\text{Masse der durchstrahlten Luft}}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Als Einheit ergibt sich  $\frac{1\text{C}}{1\text{kg}}$ . Dies entspricht  $6,25 \cdot 10^{18}$  Elektronen- bzw. Ionenpaaren pro 1 kg Luft oder  $8,071 \cdot 10^{12}$  Paare pro 1 cm<sup>3</sup> Luft.

Früher war auch noch die Einheit Röntgen (R) gebräuchlich, es gilt:

$$1\text{R} = \frac{2,58 \cdot 10^{-4}\text{C}}{1\text{kg Luft}} \text{ bzw. } \frac{1\text{C}}{1\text{kg}} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ R}$$

Die Ionendosis ist eine Größe für die physikalische Wirkung einer Strahlung.

### Energiedosis

Auch die Energiedosis ist wie die Ionendosis eine Größe für die physikalische Wirkung einer Strahlung. Die Energiedosis gibt die absorbierte Energie pro Masse des durchstrahlten Stoffes an.

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse des durchstrahlten Stoffes}}$$

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m}$$

Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy):

$$1\text{Gy} = \frac{1\text{J}}{1\text{kg}}$$

Früher wurde die Energiedosis in Rad (rd) gemessen. Rad steht dabei als Abkürzung für „radiation absorbed dose“. Für die Umrechnung gilt:

$$1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

### Äquivalentdosis

Je größer die Energieaufnahme einer ionisierenden Strahlung ist, desto größer ist auch die biologische Wirkung. Die biologische Wirkung kann aber nicht allein durch die Energiedosis beurteilt werden, da bei gleicher Energiedosis verschiedene Strahlenarten auch unterschiedliche Effekte hervorrufen können. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirkung sind Qualitätsfaktoren  $\bar{Q}$  festgelegt worden, die auf Erfahrungswerten aus Experimenten beruhen.

Strahlenarten	$\bar{Q}$
Röntgen- und Gammastrahlung, Betastrahlung	1
Neutronenstrahlung	10
Alphastrahlung aus Radionukliden	20

Als Äquivalentdosis ergibt sich dann das Produkt aus Energiedosis und Qualitätsfaktor.

$$\text{Äquivalentdosis} = \text{Energiedosis} \cdot \text{Qualitätsfaktor}$$

$$H = D \cdot \bar{Q}$$

Als Einheit ergibt sich, da der Qualitätsfaktor einheitenlos ist, die Einheit der Energiedosis, als das Gray. Um kenntlich zu machen, dass es sich um eine Äquivalentdosis handelt, wird der Einheitenname Sievert (Sv) benutzt. Es gilt:

$$1 \text{ Sv} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}} \cdot \bar{Q}$$

Früher benutzte man als Einheit das rem (von „roentgen equivalent man“). 1 rem ergibt sich aus der Energiedosis von 1 rd multipliziert mit dem Qualitätsfaktor. Für die Umrechnungen ergibt sich:

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

### Äquivalentdosisleistung

Die Äquivalentdosisleistung ergibt sich als Quotient aus der Äquivalentdosis und der Zeitspanne, während der diese Äquivalentdosis aufgenommen wurde.

$$\text{Äquivalentdosisleistung} = \frac{\text{Äquivalentdosis}}{\text{Zeit}}$$

$$P_H = \frac{H}{t}$$

Entsprechend wie die Äquivalentdosisleistung definiert man die Energiedosisleistung und die Ionendosisleistung.

### Effektive Äquivalentdosis

Bei der Bestrahlung von Menschen werden einzelne Organe oder Gewebereiche unterschiedlich stark belastet. Organ- bzw. Teilkörperdosen liefern somit unterschiedliche Beiträge zum strahlungsbedingten Gesamtrisiko für das Eintreten einer gesundheitlichen Schädigung (z.B. Krebs, Leukämie). Man hat deshalb für Organe und Gewebe Wichtungsfaktoren festgelegt, mit denen die effektive Äquivalentdosis berechnet werden kann. Sie ergibt sich als

$$\text{Effektive Äquivalentdosis} = \sum \text{Organäquivalentdosiswerte} \cdot \text{Wichtungsfaktor}$$

Die Wichtungsfaktoren sind wie folgt festgelegt:

Organ / Gewebe	Wichtungsfaktor
Keimdrüsen	0,25
Brust	0,15
rotes Knochenmark	0,12
Lunge	0,12
Schilddrüse	0,03
Knochenoberfläche	0,03
Übrige Organe und Gewebe zusammen	0,30

### Impulsrate

Als Impulsrate bezeichnet man die Anzahl der Stromimpulse, die mit einem Zählrohr registriert werden.

### Aktivität

Das Zählrohr kann immer nur einen Teil der Strahlung erfassen, radioaktive Strahlung wird aber nach allen Seiten ausgesandt. Um angeben zu können, wie strahlungsaktiv eine radioaktive Strahlenquelle ist, wurde die Aktivität definiert.

Die Aktivität gibt die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeit an.

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$$

$$A = \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Einheit der Aktivität ist das Becquerel (Bq). Es gilt:

$$1 \text{ Bq} = \frac{1}{1 \text{ s}} = 1 \text{ s}^{-1}$$

Früher war noch die Einheit Curie (Ci) gebräuchlich:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ nCi} = 3,7 \text{ Bq}$$

Die Aktivität gibt die absolute Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeiteinheit an, unabhängig davon, wieviel strahlendes Material vorhanden ist.

Wichtig ist oft die Angabe der Aktivität bezogen auf eine bestimmte Substanzmenge. Sie wird als **spezifische Aktivität** bezeichnet. Je nach Art der Substanz unterscheidet man z.B.

**Aktivität pro Masse mit der Einheit**  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$

z.B. für Festkörper, etwa die

Aktivität von 1 g  ${}_{92}^{238}\text{U}$  oder die spezifische Aktivität der Körpermasse,

**Aktivität pro Volumen mit der Einheit  $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$**

z.B. für Gase, etwa die Aktivität von Radon-Gas in 1 m<sup>3</sup> Luft,

**oder mit der Einheit  $\frac{\text{Bq}}{\text{l}}$**

z.B. für Flüssigkeiten, etwa die Aktivität von Radon in 1 l radonhaltigem Heilwasser

**Aktivität pro Fläche mit der Einheit  $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2}$**

z.B. für kontaminierte Flächen, etwa die Flächenaktivität des Bodens nach dem Tschernobyl-Unfall in verschiedenen Regionen Deutschlands.

### 4.3 Radioaktivität in der Natur

Die in der Natur vorkommende ionisierende Strahlung lässt sich auf vier verschiedene Quellen zurückführen:

1. Die **kosmische Strahlung (cosmic radiation)** besteht weitgehend aus Teilchenstrahlung und energiereicher Protonenstrahlung und kommt aus dem Weltall. Diese eigentliche kosmische Strahlung wird auch als **kosmische Primärstrahlung** bezeichnet, da oftmals auch die radioaktiven Folgeprodukte der kosmischen Folgestrahlung zur kosmischen Strahlung gerechnet werden.

93% der kosmischen Primärstrahlung besteht aus Protonen, rund 6,3% aus Alphateilchen, der Rest aus schwereren Kernen. Die Energie der kosmischen Primärstrahlung ist außerordentlich hoch, es kommen Energiebeträge bis  $4 \cdot 10^{21}$  eV vor. Zum Vergleich: Bei irdischen Kernprozessen treten Energiebeträge bis  $10^7$  eV auf.

2. Die kosmische Strahlung verursacht in der Erdatmosphäre laufend die Bildung von Radionukliden mit relativ kurzer Halbwertszeit (**cosmogenic radiation**). Zum Unterschied von der kosmischen Primärstrahlung wird diese Art der Strahlung als **kosmische Sekundärstrahlung** bezeichnet.

Man unterscheidet bei der kosmischen Sekundärstrahlung 4 Komponenten:

- die Nukleonenkomponente mit Protonen und Neutronen,
- die Elektronenkomponente mit Elektronen, Positronen und Photonen,
- die Mesonenkomponente mit Mesonen unterschiedlicher Ladung und Masse,
- den Neutrinostrom mit Neutrinos und Antineutrinos

Die Neutronen können sich dabei in der Atmosphäre an Atomkerne anlagern und Radionuklide erzeugen, z.B. N-15 oder C-14.

Die Elektronen-Photonen-Komponente bezeichnet man auch als weiche Komponente, sie wird in der Atmosphäre z.T. absorbiert und lässt sich durch 15 cm Blei praktisch völlig abschirmen.



Mesonen entstehen beim Zusammenprall der kosmischen Primärteilchen mit den Atomkernen der Luft und sind Elementarteilchen mit Massen zwischen denen des Elektrons und des Protons. Die kosmische Sekundärstrahlung in Meereshöhe besteht zu etwa 90% aus Mesonen.

3. In der Erdkruste kommen natürliche Radionuklide mit großer Halbwertszeit vor, die sich durch radioaktiven Zerfall in inaktive Nuklide umwandeln. Man bezeichnet dies als **primordiale Strahlung**.

Man unterscheidet dabei radioaktive Urnuklide mit Zerfallsreihen, hier existieren nur noch die Thorium-, die Uran-Actinium- und die Uran-Radium-Reihe. Die Plutonium-Neptunium-Reihe ist aufgrund einer geringeren Halbwertszeit praktisch in der Natur „ausgestorben“, kann aber künstlich erzeugt werden. Daneben gibt es radioaktive Urnuklide ohne Zerfallsreihen, die z.B. durch Betastrahlung, K-Einfang oder Alphastrahlung in andere Elemente übergehen. Dazu gehören z.B. Kalium  ${}_{19}^{40}\text{K}$ , Selen  ${}_{34}^{82}\text{Se}$ , Rubidium  ${}_{27}^{87}\text{Ru}$  oder Blei  ${}_{82}^{204}\text{Pb}$ .

4. Bei der Umwandlung natürlicher Radionuklide mit langer Halbwertszeit zu inaktiven Nukliden entstehen Radionuklide mit kurzen Halbwertszeiten. Man könnte diese Art der natürlichen Strahlung auch als **primordiale Sekundärstrahlung** bezeichnen.

Das bei der Uran-Radium-Reihe entstehende Edelgas Radon zerfällt in radioaktive Tochterprodukte wie Polonium  ${}_{84}^{218}\text{Po}$ , Polonium  ${}_{84}^{214}\text{Po}$ , Wismut  ${}_{83}^{214}\text{Bi}$  oder Blei  ${}_{82}^{214}\text{Pb}$ .

Diese Strahlungsarten wirken auf alle Menschen ein. Sie sind je nach der Herkunft der Menschen unterschiedlich. Es gibt Gebiete mit höherer Radioaktivität vor allem terrestrischer Herkunft, in Deutschland sind dies z.B. Teile des Schwarzwalds, der Oberpfalz, des Fichtelgebirges und insbesondere des Erzgebirges. Auf diese Gebiete wird im Rahmen des Uranbergbaus noch einmal näher eingegangen. Weltweit sind das z.B. Regionen in Kanada, Brasilien, Indien, Australien, den USA und in Südafrika.

Einige dieser natürlichen Strahlungsquellen sollen anhand einzelner Beispiel noch einmal näher betrachtet werden.

Der menschliche Körper enthält z.B. Kalium. Es wird durch die Nahrung aufgenommen und vom Körper wieder ausgeschieden. Ein Teil der Kalium-Atome besteht aus dem primordial gebildeten Kalium  ${}_{19}^{40}\text{K}$ . Die Aktivität im Körper beträgt dabei ca. 5000 Bq, d.h. in jeder Sekunde zerfallen in unserem Körper etwa 5000  ${}_{19}^{40}\text{K}$ -Atomkerne unter Aussendung von Beta- und Gammastrahlung. Dies führt zu einer inneren Belastung im Körper des Menschen.

Im Boden kommt natürliche Radioaktivität vor. Im Schnitt rechnet man für 1 kg Erde mit einer Aktivität von einigen Hundert Becquerel, wobei meist mehrere Radionuklide dazu beitragen. Die dabei ausgesandte Gammastrahlung ist Teil der natürlichen Belastung des Menschen.

**Beispiele von Radionukliden natürlichen Ursprungs mit ihren Halbwertszeiten**

Radioaktive Urnuklide ohne Zerfallsreihen				
Nuklid	Symbol	Kernladungs- zahl	Halbwertszeit	Umwandlungsart
Kalium $^{40}_{19}\text{K}$	K	19	$1,28 \cdot 10^9$ a	$\beta^-$ , K-Einfang
Selen $^{82}_{34}\text{Se}$	Se	34	$1,0 \cdot 10^{19}$ a	$\beta^-$
Rubidium $^{87}_{27}\text{Rb}$	Rb	37	$4,8 \cdot 10^{10}$ a	$\beta^-$
Cadmium $^{113}_{48}\text{Cd}$	Cd	48	$9 \cdot 10^{15}$ a	$\beta^-$
Indium $^{115}_{49}\text{In}$	In	49	$4 \cdot 10^{14}$ a	$\beta^-$
Tellur $^{123}_{52}\text{Te}$	Te	52	$1,24 \cdot 10^{13}$ a	K-Einfang
Tellur $^{128}_{52}\text{Te}$	Te	52	$1,5 \cdot 10^{24}$ a	$\beta^-$
Tellur $^{130}_{52}\text{Te}$	Te	52	$1,0 \cdot 10^{21}$ a	$\beta^-$
Lanthan $^{138}_{57}\text{La}$	La	57	$1,35 \cdot 10^{11}$ a	$\beta^-$ , K-Einfang
Neodym $^{144}_{60}\text{Nd}$	Nd	60	$2,1 \cdot 10^{15}$ a	$\alpha$
Samarium $^{147}_{62}\text{Sm}$	Sm	62	$1,06 \cdot 10^{11}$ a	$\alpha$
Samarium $^{148}_{62}\text{Sm}$	Sm	62	$7 \cdot 10^{15}$ a	$\alpha$
Gadolinium $^{152}_{64}\text{Gd}$	Gd	64	$1,1 \cdot 10^{14}$ a	$\alpha$
Lutetium $^{176}_{71}\text{Lu}$	Lu	71	$3,6 \cdot 10^{10}$ a	$\beta^-$
Hafnium $^{174}_{72}\text{Hf}$	Hf	72	$2,0 \cdot 10^{15}$ a	$\alpha$
Tantal $^{180}_{73}\text{Ta}$	Ta	73	$> 10^{13}$ a	$\gamma$
Rhenium $^{187}_{75}\text{Re}$	Re	75	$5 \cdot 10^{10}$ a	$\beta^-$
Osmium $^{186}_{76}\text{Os}$	Os	76	$2,0 \cdot 10^{15}$ a	$\alpha$
Platin $^{190}_{78}\text{Pt}$	Pt	78	$6,1 \cdot 10^{11}$ a	$\alpha$
Blei $^{204}_{82}\text{Pb}$	Pb	82	$\geq 1,4 \cdot 10^{17}$ a	$\alpha$

Im Wohnhäusern kommt das radioaktive Nuklid Radon  $^{222}_{88}\text{Ra}$  vor, das ebenfalls natürlichen Ursprungs ist. Das radioaktive Urnuklid  $^{238}_{92}\text{U}$  zerfällt im Boden über mehrere Folgeprodukte in das radioaktive Edelgas  $^{222}_{88}\text{Ra}$ . Dieses kann sich im Boden gut bewegen und somit auch in die Wohnräume gelangen. In den Wohnräumen wiederum reichert sich  $^{222}_{88}\text{Ra}$  an, so dass auch dessen radioaktive Folgeprodukte in der Atemluft angereichert sind. Diese sind nicht mehr gasförmig, sondern an Aerosole angelagert und werden beim Einatmen im Lungengewebe abgelagert.

Zunächst ist es interessant, die Äquivalentdosis zu betrachten, die ein Mensch im Laufe eines Jahres aufgrund der natürlichen Strahlung aufnimmt, und sie mit der von der künstlichen Radioaktivität verursachten zu vergleichen.

### Mittlere effektive Äquivalentdosis der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland aus dem Jahr 1993

Quelle	Äquivalentdosis in mSv
Eingeatmetes Radon einschließlich der Zerfallsprodukte	1400
Sonstige im Körperinnern gespeicherte Radionuklide	300
Terrestrische Strahlung	400
Kosmische Strahlung	300
Gerundete Summe der Äquivalentdosis aus natürlichen Strahlungsquellen	2400 ca. 60%
Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin	1500
Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	20
Berufliche Strahlenexposition	<10
Kerntechnische Anlagen	<10
Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Technik, Forschung und Haushalt	<10
Fallout von Kernwaffenversuchen	<10
Gerundete Summe der Äquivalentdosis aus künstlichen Strahlungsquellen	1560 ca. 40%
<b>Gesamtsumme</b>	<b>3960</b>

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die USA. Jedoch ist auch hier der Durchschnitt über das gesamte Land gebildet worden, aus der unterschiedlichen Struktur mögen die doch auffälligen Unterschiede hinsichtlich der künstlichen Radioaktivitätsbelastung resultieren.

### Jährliche Äquivalentdosis an radioaktiver Strahlung für einen erwachsenen US-Amerikaner

Quelle	Äquivalentdosis in mSv
Eingeatmetes Radon einschließlich der Zerfallsprodukte	2000
Sonstige im Körperinnern gespeicherte Radionuklide	390
Terrestrische Strahlung	280
Kosmische Strahlung	270
Strahlung aus Folgeprodukten der kosmischen Strahlung	10
Gerundete Summe der Äquivalentdosis aus natürlichen Strahlungsquellen	3000 ca. 83%
Gerundete Summe der Äquivalentdosis aus künstlichen Strahlungsquellen	600 ca. 17%
<b>Gesamtsumme</b>	<b>3600</b>

## 4.4 Der natürliche Atomreaktor von Oklo

Bereits im Kapitel über die Geschichte der Radioaktivität wurde der natürliche Atomreaktor vorgestellt. Er soll an dieser Stelle noch einmal beleuchtet werden und als Einstieg in die natürliche Radioaktivität dienen.

Im westafrikanischen Gabun gibt es ausgedehnte Uranlagerstätten, die seit dem Ende der sechziger Jahre abgebaut werden. Bei Gesteinsanalysen, die zur Qualitätskontrolle laufend durchgeführt werden, stellte ein französischer Geologe niedrigere Gehalte an  $^{235}_{92}\text{U}$  fest. Eine technische Verunreinigung war auszuschließen, da dazu das notwendige  $^{236}_{92}\text{U}$  fehlte. Die Abweichung war eigentlich minimal, normal 0,7202 Atomprozent, hier in Oklo 0,7171 Atomprozent. Genauere Untersuchungen wiesen dann allerdings Abreicherungen bis 0,296 Atomprozent nach, und zwar vor allem in den Zonen mit hoher Gesamt-Uran-Konzentration. Im August 1972 wurde erstmals die Vermutung geäußert, dass ein natürlicher Atomreaktor den Gehalt an  $^{235}_{92}\text{U}$  verringert haben könnte. Einen eindeutigen Beweis glaubt man, durch die Untersuchung der Spaltprodukte erhalten zu haben. Da die Erzlagerstätte von Oklo ca. 1,8 Milliarden Jahre alt ist, fand man wohl keine kurzlebigen Spaltprodukte mehr, wohl aber die langlebigen Endglieder der Zerfallsreihen. Aufgrund dieser Untersuchungen fand man an 13 Stellen Hinweise auf eine prähistorische Reaktortätigkeit.

Damit eine Kettenreaktion in Gang kommt, müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein.

1. Es muss eine hohe Urankonzentration mit einem genügend hohen Anteil an Uran-235 vorhanden sein. Rückrechnungen ergaben, dass der  $^{235}_{92}\text{U}$ -Gehalt zur Zeit der Entstehung der Lagerstätte vor 1,8 Milliarden Jahren bei mehr als 3% lag. Die Gesamt-Uran-Konzentration beträgt in Oklo an einigen Stellen mehr als 60 Gewichtsprozent. Diese besonders uranreichen Zonen weisen Mächtigkeiten bis zu 1 m Dicke und einige Meter Breite auf.
2. Es muss ein Moderator zur Abbremsung der Neutronen zur Verfügung stehen. Bei den zur Verfügung stehenden Urankonzentrationen reichte Regenwasser aus, das in die Lagerstätte eindrang.
3. Es müssen Stoffe fehlen, die Neutronen einfangen. Diese Stoffe sind erst durch die Kettenreaktion entstanden, sie müssen zu Beginn der Reaktortätigkeit weitgehend gefehlt haben.

Vermutlich erfolgte eine Kettenreaktion über mehrere hunderttausend Jahre. Dabei traten wahrscheinlich Temperaturen von ca. 180°C bis 450°C auf und es müssen zwei Kontrollmechanismen vorhanden gewesen sein.

1. Es entstanden Spaltprodukte, die in der Lage waren, Neutronen zu absorbieren, es waren aber auch Beimengungen von Lithium  $^6_3\text{Li}$ , Bor  $^{10}_5\text{B}$  und Cadmium  $^{113}_{48}\text{Cd}$  vorhanden. Diese Neutronenabsorber verhinderten, dass die Kettenreaktion lawinenartig ablief.
2. Das Regenwasser bildete einen Regelmechanismus. Verdampfte zu viel Wasser, konnten die Neutronen nicht mehr ausreichend abgebremst werden, die Anzahl der Kernspaltungen ging zurück und die Temperatur sank. Drang wieder mehr Wasser ein, wurden die Neutronen stärker abgebremst und die Zahl der Kernspaltungen stieg wieder an.

Es ist bisher nicht geklärt, woher die hohe Anreicherung an Uran stammt und wie sie geologisch entstanden ist. Bisher ist auch nicht bekannt, ob an anderen Stellen der Welt ähnliche Bedingungen vorhanden waren und ähnliche Vorgänge abliefen.

## 4.5 Uranlagerstätten und ihre Prospektion

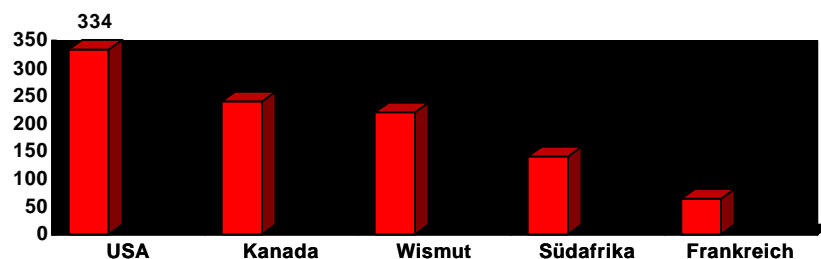
Das Element Uran kommt in rund 200 Mineralien in der Natur vor und tritt sowohl in den tieferen Zonen der Erdkruste als auch im Nahbereich der Erdoberfläche, aber auch im Meerwasser auf. In der Häufigkeit liegt es vor Platin, Gold, Silber und Wismut, allerdings sind die Gehalte oft so gering, dass eine bergmännische Gewinnung nicht lohnenswert ist. Für die reine Urangewinnung wird ein Gehalt an 0,1 bis 0,2% als wirtschaftlich angesetzt. Oft wird Uran z.B. bei der Gold-, Kupfer- oder Phosphatförderung als Nebenprodukt gewonnen, dann reichen bereits Gehalte von 0,01% aus, damit die Abbauwürdigkeit erreicht ist.

Uran tritt als Vererzung in acht Haupttypen auf:

1. Konglomerate (ca. 20% der Uranvorkommen)
2. Sandsteine (ca. ein Drittel der Uranvorkommen)
3. gangartige Vorkommen (ca. 15% der Uranvorkommen)
4. hydrothermale Gänge
5. intramagmatische Vererzungen (ca. 15% der Uranvorkommen)
6. Calcretes
7. Phosphate, Schwarzschiefer
8. Vulkanite, Calderas

Die „alte“ Bundesrepublik zählt nicht zu den uranhöufigen Gebieten, in Bayern wurden Vorkommen in Großschloppen (Oberpfalz), Mähring (Oberpfalz), Nabburg-Wölsendorfer Flussspatrevier (Oberpfalz), Schwandorf (Oberpfalz), Stockheim (Oberfranken) und Weißenstadt (Fichtelgebirge) untersucht. Bekannt sind auch die Vorkommen im Schwarzwald bei Menzenschwand und Müllenbach. In den neuen Bundesländern fand bis zum 31. Dezember 1990 ein z.T. intensiver Uranbergbau statt, so z.B. in Johannegeorgenstadt, in Aue, in Schlema, in Ronneburg, in Königstein, in Culmitzsch und in Freital. Betreiber war die „Wismut“, die 1947 als Sowjetische Aktiengesellschaft (SAG) Wismut entstanden war. Erst 1954 wurde sie auch für die DDR geöffnet und fungierte von nun an als Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft (SDAG) Wismut. Das Abkommen zwischen der Sowjetunion und der DDR wäre erst im Jahr 2000 ausgelaufen, aber die Wiedervereinigung machte dem Uranbergbau 1990 ein Ende. Die Bedeutung der Wismut veranschaulicht das folgende Diagramm.

Welturanproduktion in 1000 t bis 1990 (ausgewählte Länder)

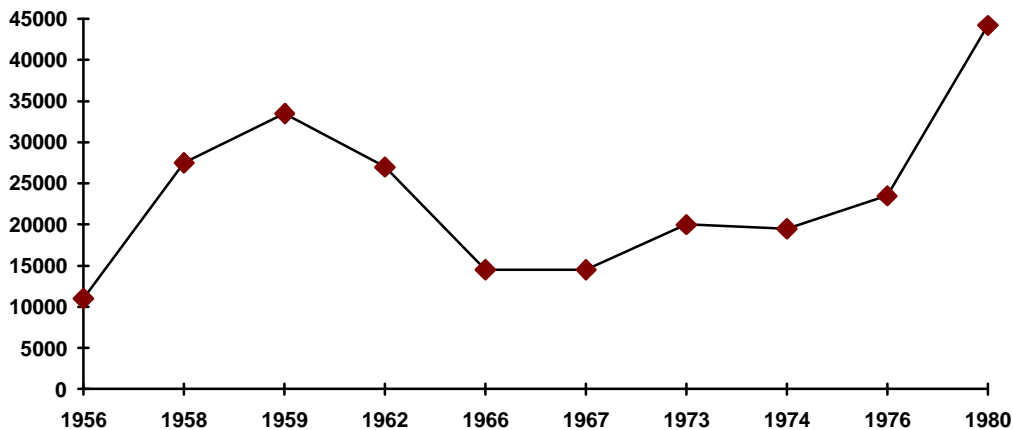


Die Gewinnung der Uranerze erfolgte in der ehemaligen DDR zum Teil im Tagebau, überwiegend jedoch im Tiefbau. In der Ganglagerstätte Schlema erfolgte der Abbau bis in eine Teufe von 1800 m. An späterer Stelle wird noch einmal auf die Strahlenbelastung durch diesen Uranbergbau eingegangen.

Die Uranförderung in der westlichen Welt erreichte 1959 mit 33 300 t Natururan einen Höhepunkt, sank dann bis 1967 auf 14 500 t ab und erreichte erst 1980 wieder einen neuen Höhepunkt mit 44 200 t Uran. Die Nachfrage ist aufgrund der Revidierung der Ausbaupläne für

Kernkraftwerke vor allem seit den achtziger Jahren zurückgegangen. Eine grobe Übersicht gibt das folgende Diagramm.

**Uranproduktion in der westlichen Welt bis 1980 in  
1000 t Natururan**



Die Exploration von Uranlagerstätten wird von großen Energiekonzernen vorgenommen, in Deutschland arbeiten z.B. die Esso Erz GmbH, die Deutsche BP AG und die Pathfinder Mines Corporation als Tochterfirmen ausländischer Konzerne, aber auch deutsche Gesellschaften wie Saarberg-Interplan Uran GmbH, Uranerzbergbau-GmbH und Urangesellschaft mbH.

## 4.6 Uranminerale

Uran ist - wie bereits erwähnt - häufiger als Gold, Silber oder Wismut und es gibt rund 200 Uranminerale. Viele dieser Uranminerale finden sich z.B. in Gesteinsformationen wie Granit. Dies hat wesentliche Auswirkungen auf die Strahlenbelastung in unseren Häusern infolge der unterschiedlichen Radioaktivität der Baustoffe.

Uranminerale sind den Menschen sicher seit langer Zeit bekannt, fallen sie doch häufig durch ihre besonders leuchtenden Farben auf. Die Verwendung in Farben war deshalb auch die erste Anwendung für Uranminerale. Als Beispiel diente hierzu immer ein Mosaik im Bereich einer römisch-kaiserlichen Villa bei Neapel. Das Mosaik zeigt auf strahlend-blauem Hintergrund, gefärbt mit 4,2 Massenprozent Kobalt, eine weiße Taube, eventuell als frühchristliches Symbol, und grüne Pflanzen. Das blaßgrüne Glas zur Darstellung der Pflanzen soll nach einer Analyse Uran enthalten. Bis heute wäre dies die einzige dokumentierte römische Glasprobe mit Uranzusatz. Neuere Untersuchungen behaupten jedoch mittlerweile, dass die Probe kein Uran enthält. Nachgewiesen ist aber die Verwendung von Uranfarben bei der Körperbemalung der Indianer Nordamerikas.

Von den Uranmineralien sind einige besonders bekannt geworden: Pechblende und die Uranglimmer. Als Uranpecherz, Pechblende oder Uraninit wird ein radioaktives Mineral mit der chemischen Formel  $(U, Th)O_2$  bezeichnet, das als radioaktive Zerfallsprodukte Blei, Helium und Radium enthält. Die Uranglimmer sind gelbe oder grüne, stark radioaktive Mineralien mit schichtiger Kristallstruktur, die als Oxidationsprodukte auf Uranlagerstätten vorhanden sind und durch ihre leuchtenden Farben auffallen.

# 5 Durch Experimentieren zum Verständnis: Versuche zur Radioaktivität

## 5.1 Die Philion-Platte

Bei der Philion-Platte handelt es sich um eine 2 mm dicke, weiße Polystyrol-Platte von ca. 13 cm · 20 cm Größe. Zunächst wird die Nullrate der Platte gemessen. Durch Reiben der Platte mit der Kante eines Holzes erzielt man dann auf der Platte Spannungen von ca. –20 000 V. Die geladene Platte wird auf ein Gestell, z.B. aus 4 Kunststoffstäbchen, gelegt. Sie entlädt sich im wesentlichen durch Sammeln von Ionen der Radonzerfallsprodukte. Beim Zerfall von  $^{222}_{86}\text{Rn}$  entsteht elektrisch positiv geladenes  $^{218}_{84}\text{Po}$ , das zunächst nicht an Aerosolpartikel der Luft angelagert wird, deshalb als "Kleinion" sehr beweglich ist und von der Philion-Platte angezogen wird. Die Alphastrahlung beim Radonzerfall erzeugt ionisierte Luft, die Hauptursache für die Entladung der Platte ist.



Philion-Platte auf Kunststoffgestell



Philion-Platte während des Messvorgangs

Nach einer Sammelzeit von rund 3 min in normaler Luft am geöffneten Fenster kann man bereits mit einem Endfensterzählrohr wie dem "Inspector" folgende Ergebnisse erhalten:

Messzeit jeweils		1 min
Nullrate		36 Impulse
Messung nach	3 min	296 Impulse
Messung nach	8 min	326 Impulse
Messung nach	14 min	373 Impulse

Das Ergebnis lässt sich leicht erklären, wenn man die Uran-Radium-Zerfallsreihe zu Rate zieht und nur die am häufigsten auftretende Zerfallsart berücksichtigt.

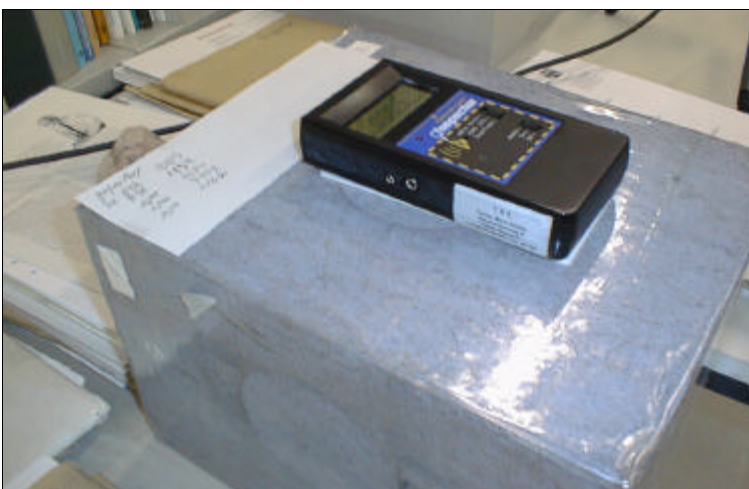
Zerfall von	Zerfallsprodukt	Zerfallsart	Halbwertszeit
$^{222}_{72}\text{Rn}$	$^{218}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	3,8 d
$^{218}_{84}\text{Po}$	$^{214}_{82}\text{Pb}$	$\alpha$	3,1 min
$^{214}_{82}\text{Pb}$	$^{214}_{83}\text{Bi}$	$\beta$	26,8 min
$^{214}_{83}\text{Bi}$	$^{214}_{84}\text{Po}$	$\beta$	19,9 min
$^{214}_{84}\text{Po}$	$^{210}_{82}\text{Pb}$	$\alpha$	164 $\mu\text{s}$
$^{210}_{82}\text{Pb}$	bis zum stabilen Endprodukt $^{206}_{82}\text{Pb}$		

Zunächst wird  $^{218}_{84}\text{Po}$  gesammelt, von dem aber nach rund 3 Minuten bereits die Hälfte wieder zerfallen ist. Es bauen sich dann die weiteren Zerfallsprodukte auf. Auch sie lassen sich auf der Platte nachweisen, z.B. über ein Gammaspektrometer.

## 5.2 Nachweis und Messung von Radon in Festkörpern

Bereits im Jahr 1900 zeigt E. Rutherford, dass Aktivkohle Radon gut adsorbieren kann. Dies kann man sich zum Nachweis der Radonexhalation von Festkörpern zunutze machen. Als "Radonlieferanten" kommen z.B. Uran-haltige, schwedische Leichtbausteine oder Mineralproben wie Pechblende in Frage.

Leichtbausteine lassen sich mit einer Säge gut auf kleinere Quaderformen bringen. Andererseits erhält man in Granitsteinbrüchen (hier ist vor allem der nordostbayerische Raum interessant) auch Quader aus  $10 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$  geschnitten. Der Quader wird in selbstklebende Buchschutzfolie von Büro aktuell, Art. Nr. 382001300, die radondicht ist, eingewickelt (zwei gegeneinander versetzte Lagen, um die Radondichtheit zu garantieren). In die Oberfläche wird eine kreisrunde Öffnung mit dem Durchmesser des Endfensterzählrohrs des "Inspectors" geschnitten. Auf eine weitere kreisrunde Folie, deren Radius rund 2 cm als die der Öffnung ist, wird in der Größe des Zählrohrfensters Aktivkohle (Körnung rund 0,9 - 1,5 mm) aufgebracht, die auf der selbstklebenden Folie haftet. Die Folie mit Aktivkohle wird über die Öffnung geklebt und kann nun mit Radon "beladen" werden. Nach Abnahme der Aktivkohlefolie kann man eine zweite gleichgroße Folie dagegenkleben und hat so ein Radonpräparat. Die Öffnung kann zur späteren Herstellung weiterer Radonpräparate wieder verschlossen werden



Direktmessung mit dem Endfensterzählrohr "Inspector" an einem Leichtbaustein-Block: Im linken Bild ist an der Seite eine kreisrunde Öffnung erkennbar, die mit einer zweiten, darübergeklebten Folie verschlossen ist. An ihr kann über Aktiv-Kohle Radon gesammelt werden. Auch der Inspector sitzt auf einem derartigen, allerdings geöffneten Fenster.



Um Radon von Mineralstücken wie z.B. Pechblende zu sammeln, benutzt man ein sehr kleines Glas mit glattgeschliffenen Rand (z.B. Pastetengläschen mit 50 oder 80 ml Inhalt). Den Rand kann man eventuell mit Schleifpapier immer feinerer Körnungen selbst glatt schleifen. In das Glas wird das Mineralpräparat gegeben, auf die Öffnung des Glases wird eine mit Aktivkohle beladene Folie wie oben geklebt. Das weitere Verfahren läuft wie oben beschrieben ab.

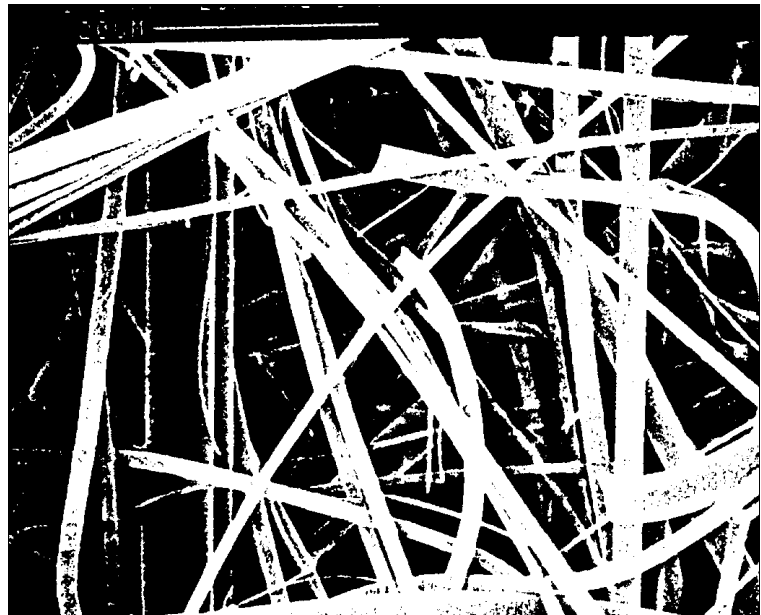
### 5.3 Nachweis und Messung von Radon im Trinkwasser

Auch im Trinkwasser befindet sich Radon, da Radongas in Wasser gut löslich ist. Je nach Herkunft des Wasser, bei Granit als umgebendes Gestein höher als z.B. bei Kalkstein, ist die Radonkonzentration unterschiedlich hoch. Sehr hohe Konzentrationen von Radon in sogenannten Radonwässern werden in Radonbädern therapeutisch verwendet, z.B. im nordostbayerischen Sibyllenbad zur Rheumabehandlung, bei entzündlichen Erkrankungen der Gelenke und der Wirbelsäule.

Im Wasser zerfällt das Radon in seine Zerfallsprodukte Po-218, Pb-214 und Bi-214, die somit auch enthalten sind. Zu ihrer Sammlung eignet sich ein Glasfaserfilter Macherey-Nagel MN 85/90. Er hält die Radonzerfallsprodukte gut zurück. Durch ein solches Filter in einem Büchner-Trichter von 0,5 l lässt man zwei bis 3 Liter normales Trinkwasser laufen. Das Glasfaserfilter wird anschließend auf einer Heizplatte getrocknet.



Filtrieren von radonhaltigem Wasser



REM-Aufnahme des Glasfaser-Filters MN 85/90

Versuche mit Regenstauffer Wasser (aus der Grenze von Jura-Kalk und Regenporphyr) erbrachten folgendes Ergebnis:

Messzeit jeweils	1 min
Wassermenge	2 l
Nullrate des Filters	46 ipmin
Messung nach Durchlauf	114 ipmin

Legt man ein Wolfram-Blech unter den Filter, werden die Elektronen der Betastrahlung reflektiert und man erhält ein höheres Signal:

Messung mit Wolfram-Blech	146 ipmin
---------------------------	-----------

Auf diese Weise lässt sich somit auch die Reflexion von Elektronen zeigen.

Weitaus höhere Impulsraten ergeben sich bei Versuchen mit Wasser aus der Katharinenquelle Sibyllenbad. Die Katharinenquelle ist eine Radonquelle mit einer Wassertemperatur von 12,1° und einer Radon-Aktivität von 4451 Bq/l. Ein Wasser, das allerdings nach dem Abfüllen schon einige Tage in einer radon-dichten PET-Flasche stand, erbrachte folgendes Ergebnis:

Messzeit jeweils	1 min
Wassermenge	1 l
Nullrate des Filters	51 ipmin
Messung nach Durchlauf	400 ipmin

## 5.4 Untersuchung von Lebensmitteln auf Kalium-40

Besondere Lebensmittel weisen hohe Gehalte an Kalium auf. Dazu getrocknete Bohnen, Sojamehl, Bierhefe, Trockenkartoffeln, getrocknete Möhren, getrocknete Pfifferlinge, aber auch getrocknete Aprikosen. Nach der Nährwert-Tabelle von Gräfe und Unzer der Ernährungsinstitute der Universitäten Wien und Gießen enthalten

100 g getrocknete Aprikosen 1370 mg Kalium.

Davon sind 0,0117% Kalium-40, d.h. 0,16 mg. Diese 0,16 mg Kalium pro 100 g Aprikosen lassen bereits ein deutlich erhöhtes Signal zu, wie die folgende Messung zeigt. Die getrockneten Aprikosen (Fa. Seeburger) wurden einer erneuten Trocknung unterzogen, wodurch sich die Masse noch einmal um rund 12% verringerte, von 199 g auf 175 g. Der Wasserverlust bewirkt gleichzeitig eine Verringerung der Dämpfung der Signale.

Messzeit jeweils	5 min
Masse der Aprikosen	56 g
Nullrate	218 Impulse
Messung der Aprikosen	272 Impulse

Ein weiteres geeignetes Untersuchungsobjekt ist Pottasche, Kaliumcarbonat, das als Triebmittel für Kleingebäck wie Honigkuchen oder Lebkuchen verwendet wird. Eine Beispielmessung zeigt:

Messzeit jeweils	1 min
Masse der Pottasche	10 g
Nullrate	45 ipmin
Messung der Pottasche	399 ipmin

## 5.5 Rund um die Pechblende: "Fotografierte Radioaktivität"

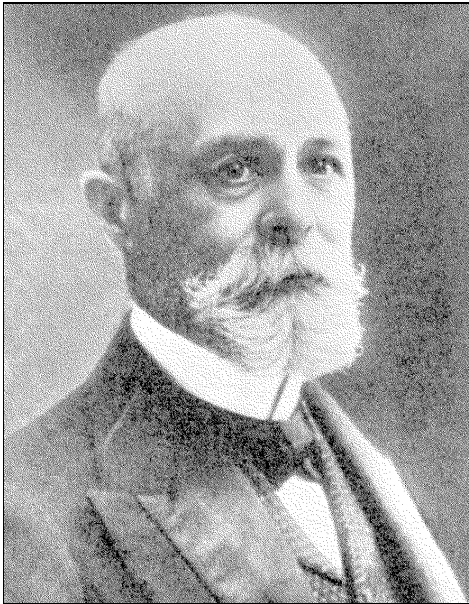


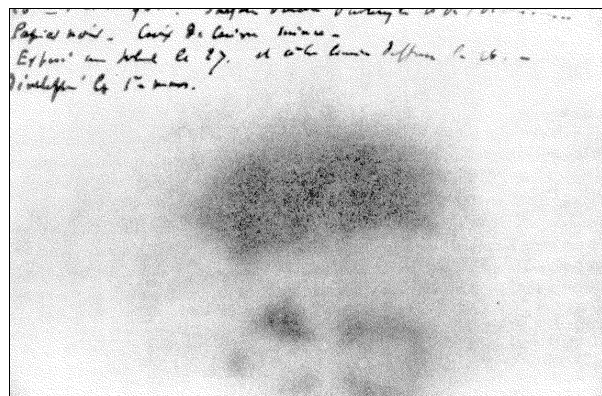
Bild 1: ANTOINE-HENRI BECQUEREL (1852 bis 1908)

Eine Autoradiographie führte zur Entdeckung der Radioaktivität. Der französische Physikprofessor ANTOINE-HENRI BECQUEREL (1852 bis 1908) hatte bereits zahlreiche Experimente über den Einfluss des Lichtes auf die Uranverbindungen veröffentlicht, als im Jahr 1895 die Röntgenstrahlung entdeckt wurde. Nach dieser Entdeckung wurde die Frage gestellt, ob nicht auch Substanzen von starker Fluoreszenz und Phosphoreszenz ähnliche, durchdringende Strahlen aussenden. Um dies zu untersuchen, benutzte BECQUEREL das ihm von seinem Vater bekannte Kaliumuranylsulfat, das im Sonnenlicht eine starke Fluoreszenz zeigt. Er schichtete dazu Kaliumuranylsulfat auf das schwarze Papier, das die unbelichteten Bromsilber-Gelatine-Platten umhüllte. Da er annahm, dass die Emission durchdringender Strahlen nach der Anregung zur Fluoreszenz oder Phosphoreszenz erfolgt, setzte er diese Packung dem Sonnenlicht aus. Aufgrund bedeckten Himmels verblieben die präparierten Platten in einer Schublade. Als die Sonne wieder schien, wurden die Versuche

fortgeführt, allerdings nicht ohne vorher ausgewechselt zu werden. Eine der Platten wurde entwickelt und zeigte im Bereich des auf die Hülle gepackten Uranylsalzes eine Schwärzung, die den photographischen Effekt beim Aussetzen im Sonnenlicht erheblich übertraf. Dieses Experiment veranlasste BECQUEREL zu der Annahme, dass von dem Uranylsalz eine Strahlung ausgeht, die von der Belichtung durch das Sonnenlicht unabhängig ist. Damit hatte BECQUEREL am 1. März 1896 eine Erscheinung entdeckt, für die MARIE SKLODOWSKA-CURIE (1867 bis 1934) den Begriff "Radioaktivität" prägte, und die erste als solche erkannte Autoradiographie durchgeführt. Autoradiographien sind somit auch die älteste Nachweismethode für radioaktive Strahlung.

Allerdings war BECQUEREL nicht der Erste, der sich mit den photographischen Effekten von Uransalzen beschäftigt. In den Jahren 1858 und 1859 hatte C. F. A. NIEPCE DE SAINT-VICTOR Kartons unter Verwendung von Uranyl Nitrat mit Zeichnungen versehen und im Dunkeln auf eine Silberchlorid-Platte gelegt. Es ergaben sich kräftige Abbildungen; jedoch erkannte NIEPCE weder das Wesen der Radioaktivität noch konnte er die Erscheinung wissenschaftlich abgrenzen, zu seiner Zeit bestanden auch noch nicht die wissenschaftlichen Möglichkeiten dazu.

Die Methode ist im Prinzip sehr einfach. So wie es auch BECQUEREL getan hat, kann man Uranerzproben oder andere radioaktive Materialien auf einen Film oder eine Fotoplatte legen und erhält nach einigen Stunden bis einigen Tagen Belichtung eine Radiographie. Die Qualität einer derartigen Radiographie lässt sich verbessern, wenn man plane Stücke verwendet, also z.B. angeschliffene und polierte Gesteins- oder Erzproben. Hierbei ist zu beachten, dass die Eigenherstellung solcher Proben mit z.T. erheblichen



Erste Autoradiographie von A.-H. BECQUEREL

Kontaminationen durch Staubentwicklung verbunden ist. Die zur Belichtung verwendeten Mineralproben wurden auf Mineralienbörsen erstanden, hier kann man nach einigem Suchen auch bereits angeschliffene Erzstücke erwerben. Als gut geeignet haben sich dabei Pechblendeproben erwiesen, bei denen die Pechblende in kleineren, gut voneinander getrennten Einsprenglingen im Gestein verteilt ist. Es sollte selbstverständlich sein, mit einem empfindlichen Zählrohr zunächst die Aktivität der Probe zu messen, da sich zu hohe Aktivitäten beim Einsatz in der Schule verbieten. Außerdem muss man darauf achten, dass die Gesteinsprobe sehr kompakt und fest ist, damit kein Abrieb entstehen kann. Ein Abreiben oder Abbröckeln kann man dadurch unterbinden, dass man die rauhe Seite der Probe mit einem Lacküberzug versieht.

Die Proben werden mit der Schliiffseite auf die Schichtseite des Films gelegt, lichtdicht verpackt und eventuell zusätzlich in einem lichtdichten Kasten aufbewahrt. Es ist besonders darauf zu achten, dass die Probe auf der Platte oder dem Film nicht verschoben wird, da sonst das Bild verwackelt und unscharf wird. Die Probe bleibt dann je nach Urangehalt und Empfindlichkeit des Films einige Stunden bis zu einigen Tagen oder gar Wochen auf dem Film.

Als Filmmaterialien werden für solche Autoradiographien in der Regel Röntgenfilme empfohlen. Sie haben den Vorteil, dass sie wesentlich empfindlicher als z.B. Planfilme 27 DIN / 400 ASA der Größe 6 cm · 9 cm sind, aber auch den Nachteil, dass sie einen Spezialentwickler benötigen. Planfilme benötigen etwa eine 3-fach längere Belichtungszeit als Röntgenfilme. Für Röntgenfilme ergeben sich bei Proben mit einem Urangehalt von über 1% Belichtungszeiten zwischen 1 Stunde und 5 Stunden. Geeignete Röntgenfilme sind z.B. Kodak X-OMAT AR Film (Preis ca. 100 DM pro 50 Blatt 13 x 18 cm ohne Entwicklung, Abgabe nur in der Packung) oder Kodak Direct Exposure Film (Preis ca. 420 DM pro 50 Blatt 13 x 18 cm ohne Entwicklung, Abgabe nur in der Packung). Für die Untersuchung von Proben mit geringen Urangehalten werden Kernspurplatten empfohlen. Anhand der Länge der Alphaspuren kann man aus der Radiographie den Urangehalt einer Probe berechnen. Kernspurplatten liefert z. Z. nur Ilford. Auch für die Kernspurplatten benötigt man einen Spezialentwickler. Außerdem muss man darauf achten, dass die empfindliche Emulsion nicht verkratzt wird; die Kernspuren würden dadurch unkenntlich werden. Diese Materialien sind z.T. sehr teuer für die Anfertigung einer einzigen Radiographie und auch aufwendig in der Handhabung.

Die vorstehend beschriebenen Verfahren haben außerdem den Nachteil, dass nicht alle Schüler am gesamten Experiment einschließlich Entwicklung teilnehmen können. Eine Methode, bei der die Schüler alle Phasen der Herstellung einer Autoradiographie mitverfolgen können, wird im



Polaroid-Sofortbild-Pack mit Uranerzprobe

folgenden erläutert. Als Grundmaterial werden Polaroid-Sofortbildfilm-Packs vom Typ 600 oder SX-70 verwendet. In einem derartigen Pack befinden sich 10 Filmbblätter in einer rechteckigen, nach oben offenen Halterung aus schwarzem Kunststoff, die nach oben durch einen Schutzdeckel aus Pappe gegen Lichteinfall geschützt sind. Dieses Film-pack befindet sich in einer innen alubeschichteten Pappschachtel. Die Kosten für zwei Film Packs bewegen sich zwischen 43 und 48 DM. Zum Entwickeln benötigt man eine

Polaroid-Sofortbild-Kamera vom entsprechenden Typ. Die Kamera SX-70 ist wohl im Handel nicht mehr erhältlich, aber mit ein wenig Glück kann man sie gebraucht erwerben. Der Typ 600 ist in der einfachsten, aber ausreichenden Form ab DM 49,00 im Fotohandel zu haben.

Das Film-pack wird aus der Schutzschachtel entnommen. Auf den Schutzdeckel aus Pappe legt man die Uranerzprobe mit der angeschliffenen Seite nach unten und fixiert das Gesteinsstück mit Hilfe von Tesafilm oder Gummibändern, so dass es nicht verrutschen kann. Dabei ist ein



Eindrücken oder Belasten des Schutzdeckels zu vermeiden, da sonst Licht eintreten und zusätzliche Lichtreflexe verursachen kann. Zur Belichtung kann man das Ganze in einen abschließbaren Kasten geben, bei besonders "misstrauischen" Schülern und "unglaublichen" Lehrkräften sollte man den Schlüssel zusätzlich z.B. dem Klassensprecher überantworten. Die Belichtungszeit liegt je nach Aktivität der Probe zwischen 8 und 48 Stunden. Im folgenden Versuch wurde eine Probe mit hoher Aktivität verwendet, um gute Ergebnisse zu erzielen. In vorausgegangenen Versuchen wurde sich einer wesentlich schwächeren Probe bedient, die ebenfalls gut verwertbare Ergebnisse zeigte, allerdings war hier die Belichtungszeit wesentlich länger. Hierzu sind vorherige Versuche notwendig, am besten sollte man mit kürzeren Zeiten beginnen und sich die Ergebnisse notieren, die dann immer wieder verwendet werden können. Die beigefügten Sofortbilder zeigen die Ergebnisse solcher Versuche.

Zur Entwicklung ist es sinnvoll, die Kamera zu präparieren. Man schneidet dazu ein kreisrundes Stück Pappe in der Größe der Objektivöffnung aus und legt es vor das Objektiv. Durch elastischen Kitt, z.B. Eternit-Kitt, kann man es befestigen, indem man die restliche Öffnung damit verfüllt. Anschließend legt man den Film pack ein und betätigt den Auslöser zehnmal. Die Bilder werden aufgrund des abgedeckten Objektivs ohne erneute Belichtung entwickelt. An dieser Stelle noch ein Hinweis zum verbrauchten Film pack. In ihm befindet sich eine leistungsstarke Batterie, die für die Schüler in dieser Form ungewöhnlich ist. Sie ist jedoch durch den Filmtransport bei weitem noch nicht verbraucht und sehr gut für weitere schulische Versuche, z.B. in Elektrizitätslehre, einsetzbar.



SX-70-Kamera mit abgedecktem Objektiv



Polierte Seite des Gangstücks mit Pechblende (schwarz)

Die Autoradiographien und die Originalaufnahme zeigen die Verteilung der Pechblende im Erzstück. Bei den schwarzen, scharf begrenzten Einsprenglingen handelt es sich um Pechblende, die ihre Formen sehr gut auf der Autoradiographie hinterlassen hat. Das abgebildete Erzstück stammt aus dem Silberbergbau im tschechischen Prizbram und wurde auf einer Mineralienbörse in Regensburg erworben. Eine Seite des Stück war bereits angeschliffen und poliert, die Rückseite wurde mit einer Lackschicht überzogen. Dennoch ist dieses Stück wie viele andere nicht unproblematisch, wie Messungen der Impulsraten zeigen. Mit dem Endfensterzählrohr Inspector wurden folgende Werte gemessen:

Messung	Impulse/min
1. Nullrate	68
2. Pechblende ohne Abschirmung	$95,54 \cdot 10^3$
3. mit Abschirmung durch Schutzdeckel aus Pappe	$64,51 \cdot 10^3$
4. mit Abschirmung durch Wolframblech	$29,44 \cdot 10^3$
5. mit Abschirmung durch Stahlblechplatte	$13,82 \cdot 10^3$
6. mit Abschirmung durch Schutzdeckel und Film pack (10 Stück Sofortbildfilm)	$12,74 \cdot 10^3$

In einer Entfernung von 20 cm wurde noch eine Impulsrate von 2540 pro Minute gemessen. Da diese Impulsrate das rund 37-fache der Umgebungsstrahlung beträgt, ist diese Probe als stark strahlend einzustufen. Etwa ab dem 20-fachen der Umgebungsstrahlung in 20 cm Entfernung wird eine Probe als stark strahlend bezeichnet. Dies entspricht etwa so viel wie bei einer Flugreise. Weitere Autoradiographien wurden mit einer anderen Pechblendeprobe und sekundären, d.h. z.B. durch Oxidation aus Pechblende entstandenen Uranmineralien wie Wölsendorfit und Zippeit angefertigt. Diese Proben weisen in 20 cm Entfernung folgende Impulsraten pro Minute auf:

Wölsendorfit	2296	33-fache Umgebungsstrahlung, stark strahlend
Pechblende	824	12-fache Umgebungsstrahlung, mittel strahlend
Zippeit	123	2-fache Umgebungsstrahlung, schwach strahlend

Je nach Belichtungszeit ließen sich mit allen Proben, auch der schwächsten, entsprechende Ergebnisse erzielen. Es steht jedoch außer Frage, dass eine stark strahlende Probe bei entsprechend kürzerer Belichtungszeit bessere und vor allem schärfere Abbildungen liefert.

Bei den Messungen der Pechblende aus Pribram/Tschechien ist folgendes zu berücksichtigen: Der Schutzdeckel aus Pappe schirmt die Alphastrahlung ab, so dass das oberste Filmblatt überhaupt nicht durch Alphastrahlung belichtet werden kann. Die Messungen zeigen zudem, dass der Anteil der Alphastrahlung an der Impulsrate rund 30%, der Anteil von Alpha- und Betastrahlung zusammen rund 70% und der Anteil der Gammastrahlung somit rund 30% betragen. Die Abschirmung durch Schutzdeckel und Filmpack hält zumindest für die untersten Filmblätter die Betastrahlung praktisch vollständig zurück. Daraus folgt, dass die Sofortbildfilme gammastrahlen-empfindlich sein müssen, da jeweils auch das unterste Blatt selbst bei kürzeren Belichtungszeiten eine deutliche Belichtung zeigt.

Im Vergleich der Serien ist zu erkennen, dass eine zu lange Belichtungszeit zu einer Überbelichtung mit starken Höfen um die jeweiligen Pechblendepartien führt. Die gleichzeitige Belichtung von 10 Bildern mag zunächst als Verschwendung erscheinen, hat jedoch auch ihren Effekt. Man sieht deutlich an der Helligkeitsabnahme der radioaktiven Partien die Abschirmung der Strahlung mit jeder weiteren Bildzwischenlage. Gleichzeitig lässt sich dabei die Streuung der Strahlung an den abschirmenden Sofortbildfilmen nachweisen. Mit jedem weiteren Bild wird das Bild aufgrund dieser Streuung unschärfer.

Das Experiment ist für die Schüler in allen Phasen verfolgbar und nachvollziehbar. Der Effekt ist offensichtlich. Autoradiographien erweisen sich als Mittel zum Nachweis radioaktiver Strahlung. Aus dem Versuch kann man leicht zur praktischen Anwendung in einem Filmdosimeter überleiten. Beim Aufbau des Versuchs kann man zudem auf die Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang mit natürlichen, radioaktiven Präparaten wie z.B. Mineralien oder Erzproben eingehen. Damit sind bereits Verbindungen zum Umweltschutz, zur Medizin und zur Anwendung in Industrie und Gewerbe geknüpft. Gleichzeitig ergibt sich - wie bereits eingangs geschildert - der Bezug zur Geschichte, mit dem Versuch wird ein historisches Experiment unter Zuhilfenahme moderner Materialien nachvollzogen. Der fächerübergreifende Aspekt wird mit diesem Versuch somit stark betont.

## 5.6 Zur Diskussion der Ergebnisse

Die Experimente haben vielerlei Auswirkung in medizinischer, biologischer und gesundheitlicher Hinsicht sowie z.B. für das Baugewerbe oder die Umwelt. Auch Verbindungen zur Geschichte lassen sich knüpfen. Einige dieser Aspekte sollen kurz aufgelistet werden.

1. Die Schneeberger Krankheit ist unter den Bergleuten seit Jahrhunderten bekannt und gefürchtet. Im Jahr 1879 wurde erkannt, dass es sich dabei um Lungenkrebs handelt, also noch vor der Entdeckung der Radioaktivität. Erst später erkannte man, dass hohe Radonkonzentrationen in den Bergwerken diese Lungenkrebsfälle verursachten.
2. Radon trägt mit seinen Zerfallsprodukten zur mittleren jährlichen effektiven Äquivalentdosis im Körpergewebe mit rund 1,3 mSv den überwiegenden Anteil bei. Dennoch werden nach überwiegender Ansicht der Fachleute 80% der Lungenkrebsfälle durch Rauchen verursacht.
3. Erhöhte Radonkonzentration können bei Verwendung bestimmter Baustoffe, z.B. Granite oder Schwarzschiefer, auch in Wohn- oder Kellerräumen auftreten. Abhilfe kann in diesen Fällen eine ausreichende Lüftung schaffen.
4. Trotz des kleinen Anteils von Kalium-40 im natürlichen Kalium kommen aufgrund der z.T. hohen Kaliumkonzentrationen in Lebensmitteln gut nachweisbare Aktivitäten zusammen. Hohe Kaliumkonzentrationen finden sich z.B. in Pottasche, Bierhefe, getrockneten Aprikosen, Bohnen, Möhren, Pfifferlingen oder Steinpilzen.
5. Kalium-40 trägt zur gesamten natürlichen Strahlenexposition des Menschen ca. 12.% bei. Ein junger Mann hat eine Gesamtkörperaktivität von ca. 4500 Bq Kalium-40 bei einem Gehalt von 150 g Kalium. Hochleistungssportler haben aufgrund ihres höheren Anteils an Muskelfleisch auch einen höheren Anteil an Kalium und sind deshalb radioaktiver.
6. Erhöhte Radonkonzentrationen im Trinkwasser sind aus verschiedenen Gegenden bekannt (z.B. Fichtelgebirge und Oberpfalz), deswegen werden in diesen Gegenden Trinkwasserversorgungsanlagen auf den Gehalt von Radon überprüft.
7. Hohe Konzentrationen von Radon im Wasser, sogenannte Radon-Wässer, werden in der Medizin in therapeutischer Hinsicht bei Rheuma- und Gichtkrankungen, sonstigen entzündlichen Prozessen der Wirbelsäule und der Gelenke, bei schlechter Heilung usw. eingesetzt.

## Auszug aus der benutzten Literatur

- Asimov, Isaac: 500 000 Jahre Erfindungen und Entdeckungen, Bechtermünz Verlag, Augsburg 1996
- Eigler, Gerhard u.a.: Geschichte der Radioaktivität, Begleitschrift zur Sonderausstellung 1997 im Stadtmuseum Nittenau (238 S.), Nittenau 1997
- Kirchheimer, Franz: Das Uran und seine Geschichte, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1963
- Minder, Walter: Geschichte der Radioaktivität, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1981
- Philipsborn, Henning von: Strahlenschutz, Radioaktivität und Strahlungsmessung, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 5. erweiterte Auflage 1997
- Tipler, Paul A.: Physik, Spektrum Lehrbuch, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin-Oxford 1995
- Vogel, Helmut: Gerthsen Physik, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1995
- Volkmer, Martin: Die natürliche Strahlenbelastung, Hamburgische Electricitäts-Werke AG, Schulinformation, Hamburg, 10. aktual. Auflage 1993
- Volkmer, Martin: Kernenergie, Basiswissen, Hamburgische Electricitäts-Werke AG, Schulinformation, 1994
- Volkmer, Martin: Kernenergie, Radioaktivität und Strahlenschutz, Hamburgische Electricitäts-Werke AG, Schulinformation, 1996
- Zimen, Karl-Erik: Strahlende Materie, Radioaktivität - ein Stück Zeitgeschichte, Bechtle-Verlag, Esslingen 1987