Natürliche und künstliche Radioaktivität -

ein Thema für den fachübergreifenden,

projektorientierten Chemieunterricht

Schriftliche Hausarbeit im Rahmen

der Ersten Staatsprüfung für das

Lehramt für die Sekundarstufe II

1. Mai 1997

1 Vorwort 5
2 Natürliche Radioaktivität 6
2.1 Entdeckung der Radioaktivität 6
2.2 Arten des radioaktiven Zerfalls 7
2.2.1 α-Zerfall 8
2.2.2 β-Zerfall 8
β^--Zerfall
β^+-Zerfall
Elektroneneinfang
2.2.3 γ-Strahlung 10
2.2.4 Weitere Zerfallsarten 10
2.3 Nachweismethoden für Radioaktivität 11
2.3.1 Ionisationsdetektoren 12
2.3.2 Szintillationsdetektoren 12
2.4 Maßeinheiten der Radioaktivität 13
2.4.1 Aktivität 13
2.4.2 Ionendosis 14
2.4.3 Energiedosis 14
2.4.4 Äquivalentdosis 14
2.5 Zeitgesetz 15
2.6 Zerfallsreihen 17
2.7 Isotope 18
2.8 Altersbestimmungen 19
2.8.1 Uran-Blei-Verfahren 19
2.8.2 Kalium-Argon-Verfahren 20
2.8.3 Kohlenstoff-14-Methode 20
2.8.4 Tritium-Methode 21
3 Künstliche Radioaktivität 23
3.1 Entdeckung 23
3.2 Künstliche Kernumwandlungen 24
3.2.1 Kernumwandlungen durch geladene Teilchen 24
3.2.2 Kernumwandlungen durch Neutronen 25
3.2.3 Herstellung von Transuranen 26
3.3 Anwendungen von Radionukliden 26
3.3.1 Anwendung von Radionukliden in der Chemie 27
Indikatormethode
Radiochemische Analysenmethoden
3.3.2 Anwendung von Radionukliden in der Medizin 30
Diagnostik
Therapie
3.3.3 Anwendung von Radionukliden in der Technik 32
Radionuklidbatterien
Material- und Produktionskontrolle
Konservierung und Sterilisation
3.3.4 Anwendung von Radionukliden im Alltag 33

3.4 Massendefekt 34
3.5 Kernspaltung 35
3.5.1 Entdeckung 35
3.5.2 Kernspaltungsbombe 37
3.5.3 Kernspaltung als Energiequelle 37
3.5.4 Reaktortypen 38
Spaltmaterial und -neutronen
Moderator
Steuerstäbe
Wärmeabfuhr und Strahlenschutz
Siedewasserreaktor
Druckwasserreaktor
Schneller Brutreaktor
Hochtemperaturreaktor
3.6 Brennstoffkreislauf 42
3.6.1 Uranvorkommen 42
3.6.2 Urangewinnung 43
3.6.3 Uran-235-Anreicherung 43
3.6.4 Herstellung von Brennelementen 44
3.6.5 Wiederaufarbeitung 44
3.6.6 Konditionierung und Lagerung von radioaktiven Abfällen 45
3.7 Kernfusion 45
3.8 Strahlenbelastung und ihre Folgen 46
4 Die Umsetzung des Projekts im Unterricht 48
4.1 Das Projekt in der Theorie 48
4.2 Das Projekt in den Richtlinien 49
4.3 Das Projekt in der Praxis 50
4.3.1 Das Projekt wird geboren 50
4.3.2 Das Projekt entwickelt sich 50
4.3.3 Das Projekt wird vollendet 51
4.4 Die Teilgruppen 52
4.4.1 Was ist Radioaktivität? 52
Zweite Strahlenschutzverordnung
Versuch 1: Strahlungsnachweis bei verschiedenen Materialien
Versuch 2: Chemische Reaktion mit einem radioaktiven Stoff
Versuch 3: Computersimulation des radioaktiven Zerfalls
4.4.2 Welche Auswirkungen hat Radioaktivität? 59
Versuch 4: Strahlungsnachweis bei Paranußasche
Versuch 5: Schutzmaßnahmen vor äußerer Strahleneinwirkung
Versuch 6: Das Abstandsquadratgesetz für ionisierende Strahlen
4.4.3 Wo verwendet man Radioaktivität? 65
Archäologische Altersbestimmungen
Versuch 7: Nachweis von Hohlräumen in einem Metallkörper
4.4.4 Wie funktioniert ein Kernkraftwerk? 67
4.4.5 Kernfusion - eine Alternative? 70

4.4.6 Die Geschichte der Radioaktivität 70
Versuch 8: Autoradiographie nach Becquerel
4.4.7 Weitergehende Untersuchungen von Gesteinsproben 73
4.4.8 Uran für Kernkraftwerke 75
4.4.9 Radioaktivität in der Öffentlichkeit 75
Das Kernkraftwerk Krümmel
Eine Umfrage zum Thema 'Radioaktivität'
4.4.10 Der Unfall von Tschernobyl 78
4.4.11 Das Rollenspiel 'Castor' 79
4.4.12 Kernenergie und Ethik 80
4.4.13 Weitere Teilgruppenthemen 81
Das Radon-Paradoxon
Moderne Alchemie
Napoleon, Kunstfälscher & Co.
Sammler aller Länder
5 Nachwort 85
6 Literaturverzeichnis 86
7 Danksagungen 90
8 Anhang 92

1 Vorwort

> Radioaktivität: „Eigenschaft einer Reihe von Atom-Kernen, sich ohne äußere Einwirkung spontan in einen anderen Atomkern umzuwandeln [...]. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung (γ-Strahlung) und/oder Teilchen (α-, β^+-, β^-- oder Neutronenstrahlung) abgegeben." (Römpp Chemie Lexikon)

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema Radioaktivität und der Umsetzung in einem fachübergreifenden Projekt. Sie richtet sich in erster Linie an (angehende) Chemielehrerinnen und -lehrer, die sich während ihrer Universitätsausbildung nicht oder nur wenig mit dem Gebiet der Nuklearchemie beschäftigt haben und in dieser Abhandlung sowohl eine fachliche Grundlage als auch Anregungen zur unterrichtlichen Umsetzung suchen.

In Kapitel 2 und 3 sind Grundbegriffe, Zusammenhänge und Anwendungen der natürlichen und künstlichen Radioaktivität erläutert, so daß im Kapitel 4 darauf aufgebaut und die Einzelthemen eines Projekts 'Radioaktivität' kurz und bündig beschrieben werden können.

Viel ausführlicher – als an dieser Stelle möglich – sind die Sachverhalte in den Büchern von Willi, Keller und Lieser dargestellt. Für den Gebrauch im Rahmen des Projektunterrichts genügen aber die folgenden, beim Informationskreis Kernenergie kostenlos bestellbaren Hefte von Martin Volkmer, wobei das erste sogar in Klassenstärke erhältlich ist:

- Kernenergie – Basiswissen
- Kernenergie – Radioaktivität und Strahlenschutz
- Die natürliche Strahlenbelastung
- Experimente zur Radioaktivität

Die Hefte sind wertfrei geschrieben, fachlich auf dem neusten Stand und vermutlich der Grund dafür, daß zum Thema 'Radiochemie in der Schule' in den letzten zwei Jahrzehnten lediglich das (für einen Leistungskurs gedachte) Buch von Willi auf den Markt gekommen ist (siehe Adressen im Kapitel 6 und Literaturangaben im Kapitel 7).

Meine Arbeit widme ich allen, die mich mit Rat und Tat unterstützt haben.

2 Natürliche Radioaktivität

2.1 Entdeckung der Radioaktivität

Die natürliche Radioaktivität wurde zum ersten Mal von dem französischen Physiker Antoine Henri Becquerel (1852–1908) im Jahre 1896 beobachtet.[1] Bei der Untersuchung der Fluoreszenz verschiedener Minerale entdeckte er zufällig, daß ein von ihm verwendetes Uransalz in Papier verpackte Fotoplatten schwärzt.[2] Zunächst nahm er an, das Mineral sei durch Sonnenlicht zur Aussendung von Röntgen-Strahlung, die im Jahr zuvor entdeckt worden war, angeregt worden. In der Folge stellte sich jedoch heraus, daß gar keine Bestrahlung mit Sonnenlicht notwendig ist, um die Schwärzung von Fotoplatten hervorzurufen. Becquerel bezeichnete diese neue Eigenschaft als Radioaktivität.[3] (radius [lat.]: Strahl; actio [lat.]: Tätigkeit)[4]

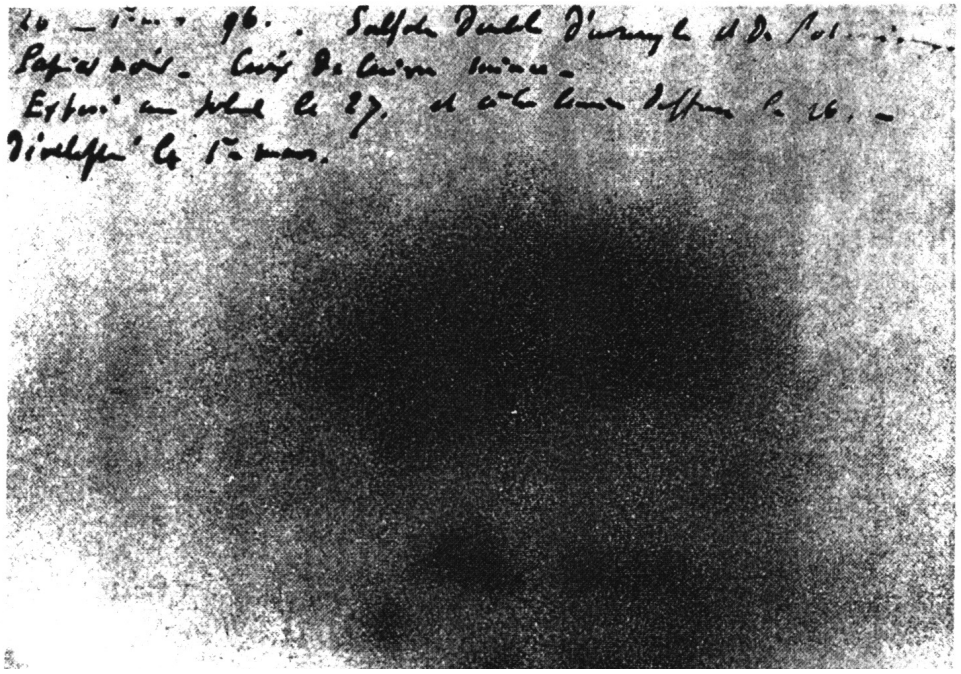

Abbildung 1: Becquerels Fotoplatte, die zur Entdeckung der Radioaktivität führte

Becquerels Doktorandin Marie Sklodowska-Curie (1867–1934) forschte ebenfalls auf dem Gebiet der Radioaktivität und entwickelte eine Methode zur quantitativen Messung der radioaktiven Strahlung. Dazu befestigte sie zwei Metallplatten in einem abgeschlossenen Luftraum einander waagerecht gegenüber und legte eine äußere Spannung an. In diese sogenannte Ionisationskammer brachte Madame Curie die zu messende radioaktive Probe ein und legte sie auf die untere Metallplatte. Die

[1]Falbe, Jürgen (Hrsg.): Römpp Chemie Lexikon, Band 5, Stuttgart/New York 1995, S. 3760.

[2]Lindner, Helmut: Grundriß der Atom- und Kernphysik, Leipzig/Köln 1993, S. 80.

[3]Willi, Alfred V.: Leistungskurs Chemie, Frankfurt am Main/Berlin/München 1986, S. 1f.

[4]Stowasser. Josef M.: Der kleine Stowasser: Lateinisch-deutsches Schulwörterbuch, München 1980, S. 328, S. 9.

Strahlung der Probe ionisiert nun die Luft, das heißt sie erzeugt aus neutralen Atomen und Molekülen Paare von negativen Elektronen und positiven Ionen. Diese geladenen Teilchen bewegen sich zur jeweils entgegengesetzt geladenen Platte und erzeugen so einen elektrischen Strom.[5]

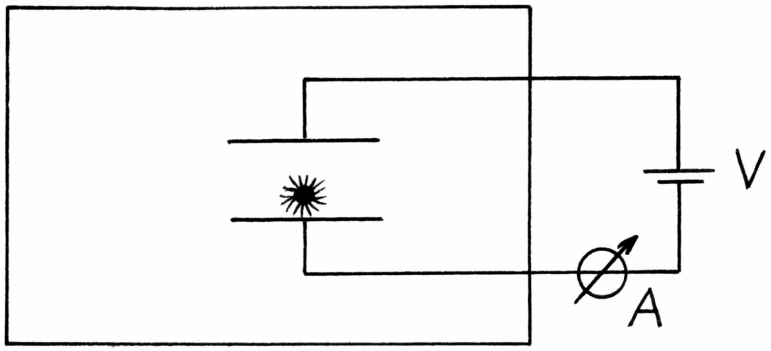

Abbildung 2: Skizze zur Ionisationskammer von Marie Curie

Aufgrund derartiger Versuche fand Madame Curie heraus, daß der gemessene Strom und damit die radioaktive Strahlung proportional dem Urangehalt der jeweiligen Probe war, vollkommen unabhängig von der untersuchten Uranverbindung. Der Schluß lag nahe, daß die radioaktive Strahlung somit eine Atomeigenschaft ist.[6]

Marie Curie untersuchte zusammen mit ihrem Mann Pierre weiterhin unter anderem das Uranerz Pechblende. Sie machten dabei die Entdeckung weiterer radioaktiver Elemente neben dem Uran, denen sie im Jahr 1898 die Namen Plutonium und Radium gaben. Noch im selben Jahr entdeckte G. C. Schmidt die Radioaktivität von Thorium-Verbindungen. Die weltweite Forschung auf dem neuen Gebiet der Radioaktivität hatte begonnen.[7]

2.2 Arten des radioaktiven Zerfalls

1899 fand Ernest Rutherford (1871–1937) heraus, daß es unterschiedliche radioaktive Strahlungen gibt. Die von ihm entdeckten Strahlen nannte er α-, β- und γ-Strahlen. Heute sind noch weitere Zerfallsarten radioaktiver Stoffe bekannt.[8]

---

[5]Radvanyi, Pierre et al.: Die Entdeckung der Radioaktivität, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997, S. 16ff.

[6]Willi, a.a.O., S. 2f.

[7]Ebd., S. 3f.

[8]Keller, Cornelius: Grundlagen der Radiochemie, Aarau/Frankfurt am Main 1993, S. 44f.

2.2.1 α-Zerfall

Beim α-Zerfall wird aus einem instabilen Atomkern ein Heliumkern (zwei Protonen, zwei Neutronen) mit einer Geschwindigkeit von etwa 15000 km/s herausgeschleudert. Beispielsweise entsteht nach der Kernreaktionsgleichung

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

aus Uran-238 (92 Protonen, 92 Elektronen, 238 – 92 = 146 Neutronen) Thorium-234 (90 Protonen, 90 Elektronen, 234 – 90 = 144 Neutronen) und Helium-4 (zwei Protonen, zwei Elektronen, zwei Neutronen). Dabei haben die zunächst entstandenen Th^{2-}-Ionen bereits zwei Hüllenelektronen abgegeben und die Helium-Kerne jeweils zwei Elektronen in ihrer Hülle aufgenommen.[9]

2.2.2 β-Zerfall

Beim β-Zerfall wandelt sich in einem instabilen Atomkern ein Nukleon, d.h. ein Kernteilchen (Proton oder Neutron), in das jeweils andere Nukleon um. Somit bleibt die Zahl der Nukleonen insgesamt unverändert, wohingegen sich die Zahl der Protonen entweder um 1 erhöht (β^--Zerfall) oder um 1 erniedrigt (β^+-Zerfall).[10]

2.2.2.1 β^--Zerfall

Der β^--Zerfall wird bei Atomen beobachtet, die im Vergleich zur Protonenzahl einen Neutronenüberschuß aufweisen. Beispielsweise zerfällt Tritium, das Isotop (isos [griech.]: gleich, topos [griech.]: Platz) des Wasserstoffs mit zwei Neutronen („überschwerer Wasserstoff"), nach der Kernreaktionsgleichung

$$^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

in ein Helium-3-Atom, ein Elektron und ein Antineutrino.[11] Das Elektron wird auch als β^--Teilchen bezeichnet; es entsteht, wenn sich im Kern ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino umwandelt:[12]

$$^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

Im Gegensatz zum α-Zerfall, bei dem die Heliumkerne mit einer bestimmten Geschwindigkeit den Kern verlassen, besitzen die Elektronen beim β^--Zerfall eine kontinuierliche Verteilung der Geschwindigkeit zwischen Null und nahezu Lichtgeschwindigkeit. Dies ist auch der Grund für das

---

[9]Volkmer, Martin: Kernenergie - Radioaktivität und Strahlenschutz, Hamburg 1994, S. 10f.

[10]Keller, a.a.O., S. 49f.

[11]Ebd., S. 50.

[12]Volkmer, Radioaktivität, a.a.O., S. 10f.

Vorhandensein der Antineutrinos, die den beim Zerfall jeweils verbleibenden Energiebetrag als Bewegungs- und Ruheenergie aufnehmen.[13]

2.2.2.2 β^+-Zerfall

Der β^+-Zerfall erfolgt bei Nukliden, d.h. Atomen bestimmter Protonen- und Neutronenzahl, die ein Defizit an Neutronen haben.[14] Beispielsweise wandelt sich Natrium-22 nach der Kernladungsgleichung

$$^{22}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu$$

unter Aussendung eines Positrons (β^+-Teilchen) und eines Neutrinos in Neon-22 um. Im Kern entsteht hierbei aus einem Proton ein Neutron, ein Positron und ein Neutrino:[15]

$$^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu$$

Wie beim β^--Zerfall die Antineutrinos nehmen beim β^+-Zerfall die Neutrinos verbleibende Zerfallsenergie auf.[16]

2.2.2.3 Elektroneneinfang

Der Elektroneneinfang ist mit dem β^+-Zerfall verwandt. Der Kern eines wiederum neutronenarmen Nuklids fängt zumeist aus der innersten Schale der Elektronenhülle ein Elektron ein.[17] Beispielsweise wandelt sich Kalium-40 nach der Kernreaktionsgleichung

$$^{40}_{19}\mathrm{K} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{40}_{18}\mathrm{Ar} + {}^{0}_{0}\nu$$

durch Elektroneneinfang in Argon-40 um. Im Kern vereinigt sich also ein eingefangenes Elektron mit einem Proton zu einem Neutron unter Aussendung eines (dabei monoenergetischen) Neutrinos: [18]

$$^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{0}\nu$$

Das beim Einfang des Elektrons entstandene Loch in der innersten Elektronenschale wird durch äußere Hüllenelektronen aufgefüllt, wobei sogenannte γ-Strahlung (siehe 2.2.3) emittiert wird. Diese Strahlung ist charakteristisch und kann zur Identifizierung des Ausgangsnuklids dienen.[19]

---

[13]Bredthauer, Wilhelm et al.: Atome - Kerne - Quanten, Stuttgart 1987, S. 106.

[14]Keller, a.a.O., S. 54.

[15]Volkmer, Martin: Kernenergie - Basiswissen, Hamburg 1995, S. 13.

[16]Bredthauer, a.a.O., S. 106.

[17]Keller, a.a.O., S. 54 f.

[18]Volkmer, Radioaktivität, a.a.O., S. 13.

[19]Keller, a.a.O., S. 55.

2.2.3 γ-Strahlung

Genau wie beim Elektroneneinfang befinden sich nach einem α- oder β-Zerfall die entstandenen Nuklide häufig nicht sofort im Grundzustand, sondern sie sind angeregt.[20] Der Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand erfolgt durch Aussendung von Strahlung, die die gleiche Natur wie das sichtbare Licht hat, aber wesentlich energiereicher ist. Diese Strahlung wird als γ-Strahlung bezeichnet.[21]

Beispielsweise ändert sich der Energieinhalt eines angeregten (mit m für metastabil ([griech.; lat.]: durch Verzögerung noch in einem Zustand befindlich) gekennzeichneten) Bariumkerns durch Aussendung eines γ-Quants:

$$^{137\,m}_{56}\mathrm{Ba} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} + \gamma$$

Nach der Emission befindet sich der Bariumkern in einem niedrigeren und damit stabileren Energiezustand.[22]

γ-Quanten treten außer bei Kernumwandlungen auch bei Reaktionen von Elementarteilchen auf. So zerstrahlen die beim β^+-Zerfall (vgl. 2.2.2.2) entstehenden Positronen (Antimaterie) mit Elektronen (Materie) jeweils unter Aussendung zweier charakteristischer γ-Quanten.[23]

2.2.4 Weitere Zerfallsarten

Einige schwere Nuklide zerfallen unter Aussendung mittelschwerer Teilchen oder durch Spontanspaltung. Ein Beispiel ist das zum größten Teil als α-Strahler zerfallenden Uran-234. Es kann sich aber auch spontan spalten. Zu einem noch weitaus geringeren Teil werden Magnesium- beziehungsweise Neon-Ionen emittiert.[24]

Zerfallsart	*Zerfälle Uran-234 pro Gramm und pro Tag*
He-4	$2 \cdot 10^{13}$
Spontanspaltung	400
Mg-28	5
Ne-24	2

Abbildung 3: Tabelle mit den verschiedenen Zerfallsarten von Uran-234[25]

[20]Ebd., S. 55.

[21]Keller, Radioaktivität, a.a.O., S. 11.

[22]Keller, Basiswissen, a.a.O., S. 14.

[23]Pohlit, Wolfgang: Radioaktivität, Mannheim/Leipzig/Wien/Zürich 1992, S. 118.

[24]Keller, a.a.O., S. 64f.

[25]Ebd., S. 64, berechnet aus Halbwertszeiten.

2.3 Nachweismethoden für Radioaktivität

In den ersten Jahren nach der Entdeckung der Radioaktivität hatten die Forscher nur wenige Methoden zum Nachweis der radioaktiven Strahlung. Die Verfahren mittels fotografischer Platten und Ionisierung der Luft sind bereits in Kapitel 2.1 erwähnt worden. Weiterhin gab es Spinthariskope, in denen α-Strahlen auf Leuchtschirmen, die mit Zinksulfid beschichtet worden waren, sichtbar wurden.[26]

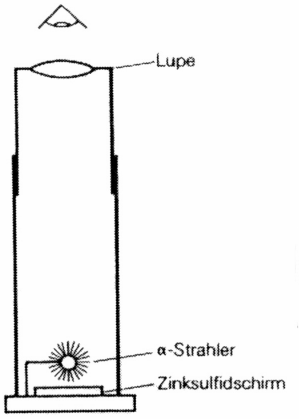

Abbildung 4: Skizze eines Spinthariskops[27]

Darüberhinaus fanden Gefäße, die mit übersättigtem Dampf gefüllt waren, Anwendung; energiereiche geladene Teilchen bewirken in dieser als Nebelkammer bezeichneten Versuchsanordnung die Bildung von Kondensationskeimen, so daß - ähnlich wie bei den Kondensstreifen von Flugzeugen - die Flugbahn der Teilchen in Form von Nebelstreifen verfolgt werden kann.[28]

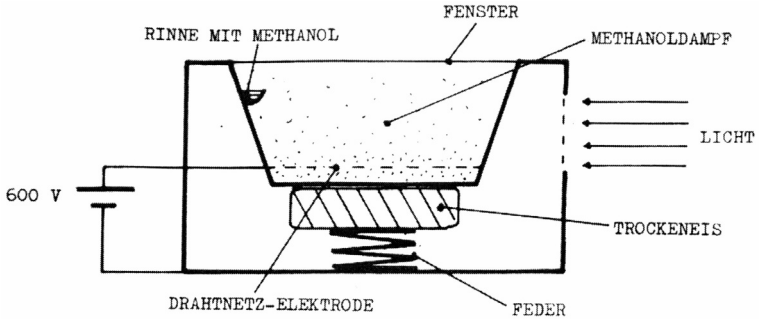

Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Nebelkammer[29]

Die in der heutigen Zeit zur Verfügung stehenden Meßapparaturen werden gemeinhin in Ionisations- und Szintillationsdetektoren unterteilt.

---

[26]Willi, a.a.O., S. 4.

[27]Ebd., S. 4.

[28]Keller, a.a.O., S. 98.

[29]Nuklearchemisches Praktikum, Praktikumsskript des Instituts für Physikalische Chemie, Abteilung Nuklearchemie, Universität Bonn, unbekanntes Jahr.

2.3.1 Ionisationsdetektoren

Ionisationsdetektoren basieren auf dem Prinzip der Ionisationskammer, die zugleich das einfachste Beispiel für diesen Detektortyp bildet.

Erhöht man die angelegte Spannung in einer Ionisationskammer über die Sättigungsspannung, d.h. den Spannungswert, bei dem alle durch ionisierende Strahlung entstandenen Ladungsträger abgeführt werden, so erhält man einen Proportionalzähler: Durch die angelegte Spannung werden die primär erzeugten Elektronen im elektrischen Feld derart beschleunigt, daß durch Zusammenstöße mit Gasmolekülen eine zusätzliche Sekundärionisation hervorgerufen wird. Die Zahl der gemessenen Stromimpulse ist proportional der angelegten Spannung, die Stärke der Impulse ist zudem proportional der Energie der ionisierenden Teilchen. Bei niedriger Spannung erfaßt man auf diese Art nur die stärker ionisierenden α-Teilchen; bei höherer Spannung werden auch β-Teilchen gezählt. Proportionalzähler werden in der Regel als Durchflußzähler konstruiert, bei denen geeignete Zählgase wie Methan oder Argon den Zähler laufend durchströmen.

Durch abermalige Erhöhung der angelegten Spannung gelangt man aus dem Proportional- in den sogenannten Auslösebereich, in dem der Geiger-Müller-Zähler arbeitet. Hier ist durch eine lawinenartige Entladung der registrierte Impuls unabhängig von Art und Energie des ionisierenden Teilchens. Geiger-Müller-Zählrohre werden aufgrund ihres geringen technischen Aufwandes häufig in Handmeßgeräten eingebaut und zur Detektion radioaktiver Quellen eingesetzt.

Halbleiterdetektoren schließlich arbeiten ebenfalls nach dem Prinzip der Ionisationskammer, allerdings mit zwei entscheidenden Unterschieden: Zum einen werden anstelle von Elektronen und positiven Ionen im Halbleiterdetektor Elektronen und positive Löcher erzeugt, zum anderen ist zur Elektron-Loch-Paarerzeugung zehnmal weniger Energie als bei der Ionisation von Luftmolekülen notwendig. Halbleiterdetektoren werden in der Forschung häufig zur Aufnahme von γ-Spektren benutzt; in Form von Handgeräten stehen sie zur Detektion von β- und γ-Strahlen zur Verfügung[30] (siehe 4.4.1.2).

2.3.2 Szintillationsdetektoren

Szintillationsdetektoren bestehen in der Hauptsache aus drei Bauelementen:

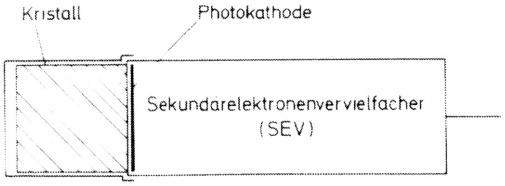

Abbildung 6: Szintillationsdetektor (schematisch)[31]

[30]Lieser, Karl Heinrich: Einführung in die Kernchemie, Weinheim 1980, S. 165ff.

[31]Ebd., S. 172.

Erstens aus einer Substanz, die die Energie auffallender Strahlung in Lichtquanten umwandelt (Kristall), zweitens einer Photokathode, die die Lichtquanten in Elektronen umsetzt, und drittens einem Vervielfacher, der die freigesetzten Elektronen um den Faktor 10^5 bis 10^7 verstärkt.

Spinthariskope waren die ersten Szintillationsdetektoren, bei denen die auftretenden Lichtblitze noch mit dem bloßen Auge wahrgenommen wurden. Als Szintillatoren werden heutzutage kristalline anorganische und organische Substanzen (Natriumiodid, unter Umständen mit Tallium aktiviert; Anthracen) sowie flüssige organische Lösungen eingesetzt. Die Auswahl des Szintillators erfolgt je nach Zerfallsart des zu messenden radioaktiven Stoffs, wobei die Anzahl der Elektronen und damit die der Lichtquanten Rückschlüsse auf die Zahl und Intensität der einfallenden Strahlung zulassen.[32]

2.4 Maßeinheiten der Radioaktivität

Über die qualitative Bestimmung der radioaktiven Zerfallsarten hinaus ist es wichtig, die Menge der Radioaktivität und ihre Wirkung zu beschreiben. Dazu wurden der Terminus Aktivität und verschiedene Dosisbegriffe eingeführt. Die verwendeten Einheiten haben sich dabei historisch entwickelt und müssen seit dem 1. Januar 1986 durch auf SI-Einheiten basierende Größen ersetzt werden. Vor dem Hintergrund, daß in vielen Ländern der Erde immer noch mit den alten Einheiten gearbeitet wird, und wegen des großen Bestands an älterer Literatur werden hier die jeweiligen Umrechnungsfaktoren mitangegeben.[33]

2.4.1 Aktivität

Als Aktivität wird die Anzahl der Atomkerne bezeichnet, die sich pro Zeiteinheit umwandeln:

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

Die Zeit hat die Einheit Sekunde und die Aktivität als Einheitenname das Becquerel (Bq).

Die alte Einheit Curie (Ci) ist als Aktivität eines Gramms Radium-226 (ohne Folgeprodukte) definiert und läßt sich wie folgt umrechnen:

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

Von der Aktivität werden Einheiten wie die spezifische Aktivität (Bq/kg) und die Aktivitätskonzentration (Bq/m^3) abgeleitet.[34]

---

[32]Ebd., S. 171ff.

[33]Keller, a.a.O., S. 78f.

[34]Volkmer, Radioaktivität, a.a.O., S. 30f.

2.4.2 Ionendosis

Die Ionendosis wird mit Hilfe der Ionisationskammer definiert, indem erstere die erzeugte Ladung eines Vorzeichens pro Masse der durchstrahlten Luft angibt:

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

Hierbei hat die erzeugte Ladung die Einheit Coulomb (C=A·s) und die Masse die Einheit Kilogramm. Einen eigenen Einheitennamen für die Ionendosis gibt es nicht.

Früher wurde die Ionendosis in Röntgen (R) gemessen[35]:

$$1\ \text{R} = 2{,}58 \cdot 10^{-4}\ \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

2.4.3 Energiedosis

Als Energiedosis einer ionisierenden Strahlung wird der Quotient aus absorbierter Energie und Masse des durchstrahlten Stoffes definiert:

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}}$$

Die Energie wird in der Einheit Joule ($\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) und die Masse wiederum in Kilogramm eingesetzt. Als Einheitenname für die Energiedosis wurde das Gray (Gy) eingesetzt.

Für die Umrechnung der veralteten Einheit Rad (rd; englische Abkürzung für: radiation absorbed dose - absorbierte Strahlungsdosis) gilt[36]:

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

2.4.4 Äquivalentdosis

Mit Hilfe der Energiedosis kann zwar die physikalische Strahlenwirkung, nicht jedoch die biologische beurteilt werden. Bei der Äquivalentdosis kommt zur Energiedosis noch ein sogenannter Qualitätsfaktor hinzu:

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

Der Qualitätsfaktor berücksichtigt die unterschiedliche biologische Wirkung der verschiedenen Strahlenarten und ist auf den Einfluß der γ-Strahlung standardisiert.

---

[35]Ebd., S.26f.

[36]Volkmer, Radioaktivität, a.a.O., S. 27.

Strahlenart	*Qualitätsfaktor*
α	20
β	1
γ	1

Tabelle 7: Experimentell gewonnene Qualitätsfaktoren[37]

Da der Qualitätsfaktor einheitenlos ist, ergibt sich für die Äquivalentdosis die Einheit J/kg. Um eine Abgrenzung von der Energiedosis zu erhalten, wurde für die Äquivalentdosis der Einheitenname Sievert (Sv) eingeführt.

Als Einheit der Äquivalentdosis diente früher das Rem (rem; englische Abkürzung für: röntgen equivalent man):

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

Die von der Äquivalentdosis abgeleitete Äquivalentleistung wird auf eine bestimmte Zeitspanne bezogen (z.B. Sv/h).[38]

2.5 Zeitgesetz

Betrachtet man einen einzelnen radioaktiven Atomkern, so kann man nicht vorhersagen, wann dieser zerfallen wird. Der Zeitpunkt kann auch nicht von außen beeinflußt werden.[39] Eine Ausnahme bilden solche Radionuklide, bei denen die Hüllenelektronen am Zerfall beteiligt sind, z.B. beim Elektroneneinfang leichter Nuklide: Beryllium-7 zerfällt als Metall geringfügig schneller als in $^{7}Be^{2+}$-Verbindungen, was darauf zurückzuführen ist, daß nach der Abspaltung der 2s-Elektronen die 1s-Elektronenwolke räumlich weiter ausgedehnt ist. Dadurch ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der 1s-Elektronen in der Nähe des Atomkerns geringer, so daß der Zerfall gebremst wird.[40]

Bei einer großen Anzahl von Atomen läßt sich der radioaktive Zerfall als statistischer Prozeß beschreiben, wodurch es möglich wird, zumindest über das Gesamtsystem Aussagen zu machen. Im Fall des Wasserstoff-3 zerfällt innerhalb von 12,3 Jahren die Hälfte einer gegebenen Menge von Atomen.

---

[37]Volkmer, Martin: Die natürliche Strahlenbelastung, Hamburg 1993, S. 20.

[38]Volkmer, Radioaktivität, a.a.O., S. 27f.

[39]Buttlar, Haro von: Radioaktivität: Fakten, Ursachen, Wirkungen, Berlin/Heidelberg 1990, S. 78.

[40]Keller, a.a.O., S. 126.

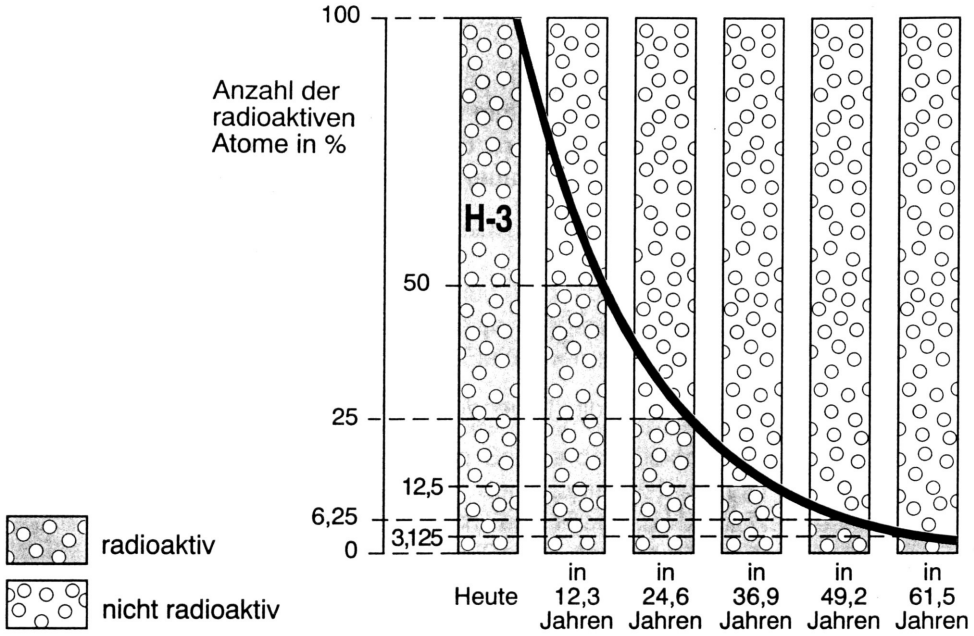

Abbildung 8: Abklingen der Radioaktivität bei Wasserstoff-3 (Tritium)[41]

Nach wiederum 12,3 Jahren ist nur noch die Hälfte der noch nicht zerfallenen Atome radioaktiv und so weiter. Man kann erkennen, daß die Zahl Z der zerfallenen Atome dividiert durch die verstrichene Zeit t proportional zur Zahl N der jeweils insgesamt vorhandenen Atome ist, z.B. sind am Anfang 100.000 Wasserstoff-3-Atome gegeben:

Z	50.000	25.000	12.500	...
t	12,3	12,3	12,3	...
Z/t	8,13	4,065	2,033	...
N	100.000	50.000	25.000	...

Abbildung 9: Veranschaulichung des Wasserstoff-3-Zerfalls durch Zahlenwerte

Es gilt somit: $\frac{Z}{t} \sim N$

Den Quotienten Z/t kann man als die Änderung der Gesamtatomzahl pro Zeitänderung ausdrücken, wobei die Abnahme durch ein negatives Vorzeichen ausgedrückt wird. Mit Hilfe des Proportionalitätsfaktors λ erhält man:

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

Durch Übergang zu einer differentiellen Schreibweise, d.h. der Betrachtung beliebig kleiner Zeitintervalle, kommt man zu einer sogenannten gewöhnlichen Differentialgleichung erster Ordnung:

[41]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 16.

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

Zur Lösung trennt man zunächst die Variablen N und t:

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

Durch Integration von N_0 bis N beziehungsweise 0 bis t kann man die Differentialgleichung lösen:

$$-\int_{N_0}^{N} \frac{}{} = \lambda \int_{0}^{t} dt$$

$$-\ln N + \ln N_0 = \lambda \cdot t - \lambda \cdot 0$$

$$\ln \frac{N_0}{N} = \lambda \cdot t$$

$$\frac{N_0}{N} = e^{\lambda t}$$

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

Das derart hergeleitete Exponentialgesetz wird als Zeitgesetz des radioaktiven Zerfalls bezeichnet. λ ist die Zerfallskonstante des betrachteten Zerfalls. Gemeinhin wird der Zerfall eines radioaktiven Nuklids mit Hilfe der Halbwertszeit τ charakterisiert. Dabei versteht man unter der Halbwertszeit die Zeitspanne, in der die Hälfte des Ausgangsmaterials zerfallen ist. Sie läßt sich aus dem Zerfallsgesetz herleiten:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \tau}$$

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

$$-\lambda \tau = \ln \frac{1}{2}$$

$$\boxed{\tau = \frac{\ln 2}{\lambda}}$$

Somit läßt sich das Zeitgesetz auch mit der Halbwertszeit τ schreiben:

$$\boxed{N = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{\tau} \cdot t}}$$

2.6 Zerfallsreihen

Ein Teil der in der Natur vorkommenden Radionuklide stammt aus der Entstehungszeit der irdischen Materie. Aufgrund der sehr langen Halbwertszeiten ist ihre Aktivität noch nicht vollständig abgeklungen. 20 dieser sogenannten primordialen ([lat.]: uranfänglich) Nuklide wandeln sich in einem einzigen Zerfallsschritt in stabile Nuklide um.

Weiterhin gibt es primordiale Nuklide, die in mehreren Stufen in inaktive Nuklide übergehen. Es sind insgesamt vier verschiedene Zerfallsreihen möglich, da es sich immer um α- und β-Zerfälle handelt, also zwei Glieder einer Familie sich entweder um vier Einheiten in ihrer Massenzahl (α-Zerfall) unterscheiden oder die gleiche Massenzahl besitzen (β-Zerfall).

Name	*Typ*	*Beginn*	*Ende*
Thorium-Reihe	A = 4n + 0	$^{232}_{90}$Th	$^{208}_{82}$Pb
Neptunium-Reihe	A = 4n + 1	$^{237}_{93}$Np	$^{209}_{83}$Bi
Uran-Radium-Reihe	A = 4n + 2	$^{238}_{92}$U	$^{206}_{82}$Pb
Uran-Actinium-Reihe	A = 4n + 3	$^{235}_{92}$U	$^{207}_{82}$Pb

Abbildung 10: Tabelle mit den vier Zerfallsreihen (A = Massenzahl, n = natürliche Zahl)

Die Neptunium-Reihe ist auf der Erde nicht mehr aufzufinden, da das langlebigste Glied dieser Reihe (Neptunium-237) eine im Vergleich zum Erdalter verschwindend kleine Halbwertszeit (τ = 2,14 Millionen Jahre) hat. Durch künstliche Herstellung von Neptunium-237 existiert heute diese Zerfallsreihe wieder (siehe Anhang A bis D).[42]

Betrachtet man nun beispielsweise ein jahrmilliarden altes Stück Uranerz, so finden sich immer sämtliche Glieder der Zerfallsreihe. Dieses radioaktive Gleichgewicht kann durch das Verhältnis der Teilchenzahlen und Halbwertszeiten von Mutter- und Tochtersubstanzen beschrieben werden:[43]

$$\frac{M}{T} = \frac{\tau\,(M)}{\tau\,(T)}$$

Eine Anwendung dieser Beziehung ist die Berechnung der Halbwertszeit einer der beteiligten radioaktiven Substanzen unter der Bedingung, daß die Halbwertszeit der anderen Substanz sowie das Verhältnis der Substanzen zueinander bestimmbar sind.[44]

2.7 Isotope

Bis 1912 war der Begriff des Isotops eines Elements nicht bekannt und die erwähnten Zerfallsreihen nicht einordbare Naturphänomene. So erhielt jedes Zerfallsglied auch einen eigenen Namen, der keine chemische Zuordnung erkennen ließ (z.B.: Thoron = Radon-220 oder UX_1 = Thorium-234).

[42]Volkmer, Radioaktivität, a.a.O., S. 56f.

[43]Lindner, Helmut: Grundriß der Atom- und Kernphysik, Leipzig/Köln 1993, S. 88.

[44]Holleman, Arnold F. et al.: Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin/New York 1995, S. 1742.

Erst Thomson und Soddy definierten Isotope als Atome gleicher Ordnungszahl aber verschiedener Neutronenzahlen. So sind die stabilen Endprodukte der drei natürlichen Zerfallsreihen Isotope des Bleis mit den Massenzahlen 206, 207 und 208.[45]

Die Trennung von Isotopen wurde mit der künstlichen Herstellung von Elementen und der Anreicherung von spaltbarem Material (siehe 3.6.3) von großem Interesse. Grundlage für alle Verfahren ist die Ausnutzung der sich geringfügig unterscheidenden physikalischen Eigenschaften der Isotope selbst wie auch ihrer chemischen Verbindungen. So kann ein Massenspektrograph, wie er 1912 von Thomson und Soddy verwendet wurde, auch wägbare Mengen von Isotopen trennen, indem diese durch magnetische und elektrische Felder verschieden stark abgelenkt und getrennt aufgefangen werden.[46]

Weitere Trennungsmöglichkeiten kann man am Beispiel der Deuteriumoxid-Gewinnung (Oxid des Wasserstoffisotops mit einem Neutron, „schweres Wasser") betrachten. Wasser hat lediglich einen geringen Anteil an Deuteriumoxid (0,017%)[47], aber es reichert sich bei einer Elektrolyse im zurückbleibenden Wasser an und kann nach mehreren aufeinanderfolgenden Stufen nahezu rein gewonnen werden. Weiterhin liegt das Gleichgewicht

$$HDO + H_2S \rightleftharpoons HDS + H_2O$$

bei 20°C weiter auf der linken Seite als bei 100°C, so daß sich in einem Kreislauf, bei dem H_2S zwischen den Gefäßen mit Wasser herumgepumpt wird, im Behälter mit der tieferen Temperatur HDO anreichert. Schließlich unterscheiden sich die Siedepunkte von H_2O und D_2O um 1,4°C. Mit Hilfe großer Fraktionierkolonnen läßt sich D_2O also auch durch Destillation gewinnen.[48]

2.8 Altersbestimmungen

Das radioaktive Zerfallsgesetz ist eine von allen Einflüssen unabhängige Uhr und kann zur Berechnung des Alters von geologischen und organischen Proben herangezogen werden. Zur Datierung von Gesteinen werden unter anderem das Uran-Blei- und das Kalium-Argon-Verfahren verwendet, bei organischen Proben die bekannte C-14-Methode sowie bei Wasseranalysen die Tritium-Methode.

2.8.1 Uran-Blei-Verfahren

Das Uran-Blei-Verfahren wird bei uranhaltigen Gesteinen angewendet und greift auf das Wissen um die zwei Uran-Zerfallsreihen zurück. Man bestimmt das Verhältnis der beiden Endprodukte Blei-206 und Blei-207 der Zerfallsreihen und erhält das Alter der untersuchten Probe über die Beziehung:

---

[45]Lieser, a.a.O., S. 107.

[46]Willi, a.a.O., S. 24ff.

[47]Holleman, a.a.O., S. 265.

[48]Willi, a.a.O., S. 24ff.

$$\frac{^{206}Pb}{^{207}Pb} = \frac{^{238}U \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{^{235}U \cdot (e^{\lambda' t} - 1)}$$

Mit dem heutigen Verhältnis von Uran-238 zu Uran-235 sowie den Zerfallskonstanten λ und λ' läßt sich das Alter t somit über das zu bestimmende atomare Verhältnis von Blei-206 zu Blei-207 errechnen. Das Verfahren ist bei Mineralien zuverlässig anwendbar, die mindestens 500 Millionen Jahre alt sind, da sich in diesen Gesteinen das radioaktive Gleichgewicht zwischen Mutter- und Tochternukliden ausreichend genau eingestellt hat.[49]

2.8.2 Kalium-Argon-Verfahren

Das Kalium-Argon-Verfahren basiert auf der Umwandlung von Kalium-40 durch Elektroneneinfang in das stabile Argon-40. Voraussetzung ist dabei, daß das Edelgas Argon quantitativ in der Gesteinsprobe zurückgehalten worden ist. Aus dem Verhältnis

$$\frac{^{40}Ar}{^{40}K} = e^{\lambda t} - 1$$

kann auf das Alter t des Kaliumminerals zurückgeschlossen werden.

Für Mineralien stehen noch weitere Datierungsmethoden zur Verfügung, die je nach Zusammensetzung und geschätztem Alter des Gesteins herangezogen werden (zum Beispiel nicht extrem langlebige Radionuklide wie Radium-226 zur Altersbestimmung von Sedimenten).[50]

2.8.3 Kohlenstoff-14-Methode

Für die Archäologie ist die Kohlenstoff-14-Methode besonders wertvoll, da sich das Alter relativ junger, bis etwa 50.000 Jahre alter organischer Proben bestimmen läßt.

Kohlenstoff-14 wird in den obersten Schichten der Atmosphäre gebildet, indem Neutronen mit Stickstoff reagieren:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

Die Neutronen entstehen als Folgeprodukte kosmischer Strahlung (vorwiegend Protonen), die mit der äußeren Atmosphäre der Erde in Wechselwirkung tritt.

Gleich nach seiner Entstehung wird der Radiokohlenstoff zu Kohlendioxid oxidiert und mischt sich mit dem nichtradioaktiven Kohlendioxid in der Atmosphäre sowie im Ozean- und Grundwasser. So entsteht ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen neugebildetem und zerfallenem Kohlenstoff-14, das auch für die Pflanzenwelt gilt, in der Radiokohlenstoff fortwährend durch die Photosynthese aufgenommen wird. Über die Pflanzen gelangt er in Tiere und Menschen.

---

[49]Keller, a.a.O., S. 251f.

[50]Keller, a.a.O., S. 252.

Eine frische Probe organischen Materials weist eine spezifische Aktivität von 0,27 Zerfällen pro Sekunde und Gramm Kohlenstoff auf. Beim Tod des Organismus wird dieser vom natürlichen Kohlenstoffkreislauf abgeschnitten und die Zahl der Kohlenstoff-14-Atome verringert sich aufgrund des radioaktiven Zerfalls mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. Unter der Annahme einer konstanten Kohlenstoff-14-Konzentration in der Vergangenheit läßt sich das Alter einer Probe durch die Gleichung erhalten:[51]

$$t = \frac{\tau}{\ln 2} \cdot \ln \frac{N}{N_0}$$

Seit der Vorstellung der Methode durch Libby und Anderson 1947 hat sich gezeigt, daß sich die oben genannte Annahme der Kohlenstoff-14-Konstanz nicht halten läßt. Die Kalibrierung ([griech.-arab.-franz.]: Eichung) der Kohlenstoff-14-Methode mittels Dendrochronologie (Jahresringforschung, siehe 4.4.3.1) beginnt bei einem Fundstückalter von 2.000 Jahren; für ein Kohlenstoff-14-Alter von 1.000 Jahren wurde berechnet, daß das kalendarische Alter um etwa 100 Jahre höher liegt.[52]

In den letzten Jahren haben die Forscher die Hauptursache für die Schwankungen des Kohlenstoff-14 in der Atmosphäre eingehend untersucht: das Erdmagnetfeld. Einem Schutzschild gleich lenkt es die kosmische Strahlung leicht ab, bevor diese die oberen Schichten der Atmosphäre erreichen kann. Der Kohlenstoff-14-Anteil variiert also umgekehrt proportional zur Magnetfeldstärke, das bedeutet bei einer maximalen Abschirmung eine minimale Kohlenstoff-14-Produktion und umgekehrt (siehe Anhang E). Kenntnisse über die Schwankungen des Erdmagnetfelds kann man durch Untersuchung mariner Sedimentschichten erhalten, da sie wie ein Magnetband die Intensitätsveränderungen registriert haben.[53]

Durch die sich somit ergebende geomagnetische Korrektur wurden schon viele ältere Funde neu datiert (siehe Anhang F). Beispielsweise sind die prähistorischen Wandmalereien in der französischen Cosquer-Grotte mit vermutlich 31.000 Jahren über 4.000 Jahre älter als bisher angenommen.[54]

2.8.4 Tritium-Methode

In großer Höhe entsteht bei Einwirkung sehr schneller Neutronen auf Stickstoff-14 nicht Kohlenstoff-14 sondern Kohlenstoff-12 und Wasserstoff-3 (Tritium):

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{3}_{1}\mathrm{H}$$

Mit dem Niederschlag gelangt das Tritium in die Gewässer. Wird nun Wasser vom natürlichen Kreislauf abgeschnitten, so kann dieser Zeitpunkt wie bei der Kohlenstoff-14-Methode berechnet werden.

---

[51] Willi, a.a.O., S. 30f.

[52] Laj, Carlo et al.: Altersbestimmung mit der Kohlenstoff-14-Methode, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997, S. 42.

[53] Ebd., S. 44.

[54] Ebd., S. 45.

Bedeutsam ist das Verfahren für die Hydrologie (Wissenschaft vom Wasser) aber auch zum Beispiel zur Altersbestimmung von Weinen. Wegen der kurzen Halbwertszeit von Tritium ($\tau = 12{,}3$ Jahre) kann das Alter in einem Zeitraum von höchstens 60 Jahren genügend genau bestimmt werden. Zudem muß eine Korrektur aufgrund der künstlichen Freisetzung von Tritium aus Kernreaktoren und durch Atombombenexplosionen berücksichtigt werden.[55]

[55]Keller, a.a.O., S. 254.

3 Künstliche Radioaktivität

Im Kapitel 2 wurden radioaktive Nuklide näher betrachtet, die in der Natur vorkommen. Neben den Gliedern der drei natürlichen Zerfallsreihen gibt es Radionuklide wie Kalium-40, die keiner Zerfallsfamilie angehören, sowie solche, die in der Atmosphäre durch Einwirkung kosmischer Strahlung entstehen (Wasserstoff-3, Kohlenstoff-14).

Die Transuranelemente, das heißt die Elemente mit einer Ordnungszahl $Z > 92$, sowie die Elemente Technetium ($Z = 43$) und Promethium ($Z = 61$) kommen in der Natur nicht mehr vor und müssen künstlich hergestellt werden, da die Halbwertszeiten ihrer langlebigsten Isotope im Vergleich zum Alter der Erde zu kurz sind.

3.1 Entdeckung

Im Jahr 1919 beobachtete Rutherford erstmals eine bimolekulare Reaktion, das heißt beschleunigte Atomkerne (Geschosse) wirken auf ruhende Atomkerne (Ziele) ein und leiten eine Kernreaktion ein. Er bestrahlte Stickstoff mit α-Teilchen eines Polonium-Präparats, wodurch die nicht radioaktiven Nuklide Sauerstoff-17 und Wasserstoff-1 entstanden:[56]

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Rutherford postulierte lediglich das zwischenzeitlich gebildete (radioaktive) Fluor-18 als Bestandteil der Kernreaktion.

15 Jahre später untersuchten Irène Joliot-Curie (1897–1956) und Fréderic Joliot (1900–1958) die Einwirkung von α-Strahlen auf Aluminium. Bei dieser bimolekularen Reaktion konnten sie zum ersten Mal ein auf künstlichem Wege hergestelltes, radioaktives Nuklid, Phosphor-30, nachweisen:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Dieses zerfällt mit einer Halbwertszeit von 2,50 Minuten unter Aussendung eines Positrons (und eines Neutrinos) in das stabile Silizium-30:[57]

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu$$

---

[56] Zimen, Karl-Erik: Strahlende Materie: Historisches, Aktuelles, Revolutionäres, Frankfurt am Main/Berlin 1990, S. 73 f.

[57] Falbe, a.a.O., S. 3761.

3.2 Künstliche Kernumwandlungen

3.2.1 Kernumwandlungen durch geladene Teilchen

Die Verwendung von α-Teilchen, die durch natürlichen Kernzerfall entstanden sind, hat ihre Grenzen. In Atomkerne mit Ordnungszahlen $Z > 19$ können solche α-Teilchen nicht mehr eindringen, da dann die elektrostatische Abstoßung zu groß ist.[58]

Das Problem wurde Ende der zwanziger Jahre zunächst mit riesigen Bandgeneratoren gelöst, die Spannungen bis zu 1,5 Millionen Volt erzeugen konnten. Beim Durchlaufen eines elektrostatischen Feldes dieser Spannung werden elektrisch geladene Teilchen beschleunigt. Gemeinhin wird die bei dieser Beschleunigung aufgenommene Energie in Elektronenvolt (eV) angegeben, wobei ein Elektronenvolt die Energie bezeichnet, die ein Elektron bei der Beschleunigung durch eine Spannung von einem Volt aufnimmt.[59]

Für die Umrechnung von Elektronenvolt in Joule gilt:[60]

$$1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Im Fall des Bandgenerator konnten also geladene Teilchen wie Protonen, Deuteronen, Elektronen, α-Teilchen und Ionen schwererer Elemente mit bis zu 1,5 Megaelektronenvolt pro Teilchen beschleunigt werden.

Um die Leistungsfähigkeit weiter zu erhöhen, wurden in der Folge Linearbeschleuniger gebaut, bei denen mehrere Beschleunigungsstrecken hintereinandergeschaltet wurden; einer der größten (Stanford, USA) hat eine Länge von 3,3 Kilometer und bringt Elektronen auf eine kinetische Energie von 21,5 Gigaelektronenvolt.

Um ein und dieselbe Beschleunigungsstrecke viele Male von zu beschleunigenden Teilchen durchlaufen zu lassen, wurde das Zyklotron entwickelt, bei dem die geladenen Teilchen mit einem starken Elektromagnetfeld in einer Kreisbahn gehalten werden. In der Praxis werden sogenannte Synchrozyklotrone eingesetzt, bei denen Teilchen nicht kontinuierlich sondern in Teilchenpaketen beschleunigt werden. Hat ein solches Paket die Endgeschwindigkeit erreicht, so tritt es aus dem Zyklotron aus und ein neues wird beschleunigt. Das größte Protonensynchrotron steht in Batavia (USA) und hat bei einem Bahndurchmesser von 2 Kilometer eine Beschleunigung von 500 Gigaelektronenvolt, das zweitgrößte Elektronensynchrotron der Welt befindet sich in Hamburg (DESY: Deutsches Elektronensynchrotron, 100 Meter Bahndurchmesser, 6,5 Gigaelektronenvolt).[61]

---

[58] Willi, a.a.O., S. 49.

[59] Bredthauer, a.a.O., S. 20.

[60] Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 24.

[61] Willi, a.a.O., S. 51ff.

Mit Hilfe eines Synchrotrons wurde 1937 erstmals das Element Technetium (technetos [griech.]: künstlich) durch Beschuß von Molybdän mit Deuteronen in Form des Isotops Technetium-97 ($\tau = 2{,}6 \cdot 10^6$ Jahre[62]) hergestellt[63]:

$$^{96}_{42}\text{Mo} + {}^{2}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{97}_{43}\text{Tc} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

In den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 werden weitere Anwendungsgebiete der Teilchenbeschleuniger beschrieben.

3.2.2 Kernumwandlungen durch Neutronen

Da Neutronen im Gegensatz zu positiv geladenen Teilchen keine Abstoßung in der Nähe von Atomkernen erfahren, können sie viel leichter Kernreaktionen verursachen. Eine solche Reaktion ist jedoch nicht zwangsläufig. Vielmehr hängt es vom jeweiligen Nuklid ab, ob nicht lediglich ein Zusammenstoß zwischen Neutron und Kern stattfindet, bei dem ein Teil der Bewegungsenergie des Neutrons abgegeben wird. So sind Stoffe wie Wasser, Deuteriumoxid (schweres Wasser) oder Graphit in der Lage, Neutronen abzubremsen, ohne daß es dabei häufig zu Kernreaktionen kommt. Diese Eigenschaft findet in Kernreaktoren Verwendung.[64]

Es gibt drei wichtige Methoden zur Erzeugung von Neutronenstrahlung. Zum einen kann man eine Mischung eines α-Strahlers (meist Radium-226) mit Berylliumpulver verwenden:[65]

$$^{9}_{4}\text{Be} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

Zum anderen eignet sich der Beschuß von Beryllium oder Tritrium mit Deuteronen aus einem Zyklotron zur Gewinnung schneller Neutronen:

$$^{9}_{4}\text{Be} + {}^{2}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{10}_{5}\text{B} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

$$^{3}_{1}\text{H} + {}^{2}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

Überwiegend langsame Neutronen können schließlich aus einem Atomreaktor gewonnen werden, in dem eine Kernspaltungsreaktion abläuft.[66]

Durch Kernreaktionen mit Neutronen lassen sich Radionuklide herstellen, die Anwendung in den verschiedensten Bereichen erfahren (siehe 3.3).

---

[62]Seelmann-Eggebert, W. et al.: Nuklidkarte Kernforschungszentrum Karlsruhe, München 1981.

[63]Keller, a.a.O., S. 135.

[64]Willi, a.a.O., S. 55f.

[65]Lieser, a.a.O., S. 460 f.

[66]Willi, a.a.O., S. 55.

3.2.3 Herstellung von Transuranen

Das erste künstlich hergestellte Transuran-Element war im Jahre 1940 das Neptunium-238, welches aus Uran-238 im Deuteron-Zyklotron erzeugt wurde:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{238}_{93}\mathrm{Np} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{238}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow {}^{238}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

Mit dem Neptunium-238 (τ = 2,11 Tage) beziehungsweise Plutonium-238 begann eine weltweite Forschungsarbeit, deren Ziel es war, immer neue Transurane herzustellen. Dazu ließ man entweder eine längere Zeit Neutronen einwirken, zum Beispiel:

$$^{239}_{94}\mathrm{Pu} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{241}_{94}\mathrm{Pu}$$

$$^{241}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{241}_{95}\mathrm{Am} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu} \quad (\tau = 14{,}4 \text{ Jahre}),$$

oder neu gewonnene Transurane mit weiteren Teilchen aus dem Zyklotron reagieren, zum Beispiel:

$$^{242}_{96}\mathrm{Cm} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{245}_{98}\mathrm{Cf} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Da sich zeigte, daß sich Elemente mit Ordnungszahlen größer als 100 nicht mehr durch Neutronenbeschuß herstellen lassen, und weil die gewonnenen Mengen von Transuranen mit steigender Ordnungszahl immer geringer wurden, was die Weiterverwendung schwierig machte, entschieden sich die Forscher, schwere Ionen zum Beschuß zu nehmen.[67]

Auf diese Weise wurden Elemente bis zur Ordnungszahl 112 (Stand: Januar 1997) erzeugt und nachgewiesen. Allein bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt wurden in den Jahren 1981 bis 1994 die Elemente 107 bis 111 entdeckt. Am 9. Februar 1996 wurde dann das mit einer Massenzahl von 277 schwerste, je von Menschen gemachte Atom – ein Isotop des Elements 112 – nachgewiesen. Nach 280 μs zerfällt es unter Aussendung einer Reihe von α-Teilchen, „bis sich seine Spur beim Fermium-253 verliert".(siehe Anhang G)[68]

3.3 Anwendungen von Radionukliden

Angesichts der vielen Verwendungsmöglichkeiten von radioaktiven Nukliden in Chemie, Medizin und Technik sowie in alltäglichen Gebrauchsgegenständen kann an dieser Stelle nur eine Übersicht gegeben werden. In der Regel stammen die künstlichen Radionuklide aus Zyklotronen, in denen sie im Vakuum der Beschleuniger gezielt hergestellt werden. Ein weitaus geringerer Teil wird bei der Wiederaufbereitung verbrauchter Brennstäbe aus Kernreaktoren gewonnen oder kommt aus speziellen Bestrahlungsröhren, die in kerntechnischen Anlagen Neutronenströmen ausgesetzt werden.[69]

---

[67]Willi, a.a.O., S. 58ff.

[68]Gesellschaft für Schwerionenforschung: Z 112, http://www.gsi.de/z112.html, 12.12.1996.

[69]Pohlit, a.a.O., S. 40f.

3.3.1 Anwendung von Radionukliden in der Chemie

Die Bestimmung natürlicher Radionuklide zur Altersberechnung von Proben ist bereits im Kapitel 2.8 näher betrachtet worden.

3.3.1.1 Indikatormethode

Bei der Indikator- oder Tracermethode wird in einer Verbindung ein nicht radioaktives Atom durch ein radioaktives Atom desselben Elements ersetzt, wodurch der Weg dieses Radionuklids und damit der gesamten Verbindung verfolgbar wird.

So läßt sich das Löslichkeitsprodukt von schwerlöslichen Verbindungen wie beispielsweise Bleiiodid (PbI_2) bestimmen. Wird mit Iod-131 markiertes Bleiiodid hergestellt, dessen spezifische Aktivität bekannt ist, so läßt sich nach Einstellung des Gleichgewichts über die Aktivität der ungelösten Verbindung das Löslichkeitsprodukt errechnen.[70]

Bei der Hahnschen Emaniermethode wird die Änderung des Kristallgitters einer Substanz untersucht, indem eine geringe Menge eines Radionuklids eingebaut wird, das beim Zerfall ein radioaktives Edelgas bildet, zum Beispiel Xenon-135 aus Iod-135. Wandelt sich beispielsweise das Kristallgitter aufgrund von Zersetzung um, so kann das entweichende radioaktive Edelgas nachgewiesen und dadurch die Umwandlungstemperatur bestimmt werden.[71]

Mit der Kohlenstoff-14-Markierung von organischen Verbindungen eröffnete sich ein weites Forschungsfeld. Nach dem Zweiten Weltkrieg gelang es Melvin Calvin (geboren 1911, Chemie-Nobelpreis 1961) die Vorgänge bei der Photosynthese aufzuklären, wobei er Algen mit $^{14}CO_2$ begaste und die Wanderung der daraufhin C-14-markierten Photosyntheseprodukte verfolgte, indem er die Pflanzen zu bestimmten Zeitpunkten abtötete und die C-14-Verteilung bestimmte.[72]

Aber auch bei der Erforschung von Reaktionsmechanismen in der organischen Chemie werden C-14-Markierungen eingesetzt. Beispielsweise wurde so bei der Claisen-Allyl-Umlagerung festgestellt, daß das endständige C-Atom der Allyl-Gruppe an den Benzolring gebunden wird, da bei einer oxidativen Spaltung der -CH=CH_2-Bindung das radioaktive Kohlenstoff-14 im benzoltragenden Bruchstück bleibt.[73]

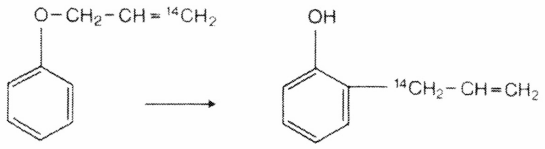

Abbildung 11: Claisen-Allyl-Umlagerung[74]

[70]Keller, a.a.O., S. 249.

[71]Ebd.

[72]Buttlar, a.a.O., S. 138.

[73]Keller, a.a.O., S. 249ff.

[74]Ebd., S. 249.

Neuere Arbeiten am Forschungszentrum Jülich beschäftigen sich mit dem Abbau von Pestiziden unter natürlichen Feldbedingungen. Dazu werden Lysimeter (Metallquader) auf den zu untersuchenden Feldern in die Erde gerammt und mit den so unzerstörten Bodenschichten befüllt. Im Forschungszentrum untersucht man dann bei Umweltbedingungen, die dem ursprünglichen Feld nachgestellt werden, die Wanderung und Zersetzung von C-14-gekennzeichneten Pestiziden (siehe Anhang H).[75]

Ebenfalls in Jülich findet das im Vergleich zum Kohlenstoff-14 kurzlebige Kohlenstoff-11-Radionuklid (τ = 20,3 Minuten) in der pflanzenphysiologischen Forschung Verwendung. Das C-11-Nuklid erfährt einen β^+-Zerfall:

$$^{11}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\mathrm{B} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu$$

Das dabei ausgesandte Positron rekombiniert jedoch mit einem Elektron in seiner Umgebung, wobei zwei charakteristische γ-Quanten unter einem Winkel von 180° abgestrahlt werden:

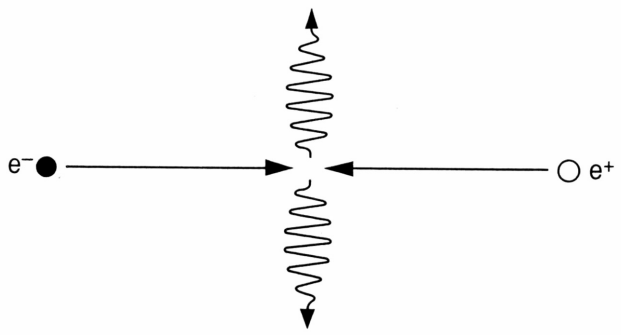

Abbildung 12: Vereinigung von Positron und Elektron

Diese γ-Strahlung durchdringt das pflanzliche Material fast ohne Absorption und kann dann mit geeigneten Detektoren nachgewiesen werden, ohne daß – wie beim β^--Strahler Kohlenstoff-14 – die Pflanze geöffnet werden muß. Das im jülicher Babyzyklotron produzierte $^{11}CO_2$ wird unmittelbar beim Pflanzenexperiment verwendet. So werden in Versuchsaufbauten zur Aufnahme von Kohlendioxid, zum Beispiel bei Ertragspflanzen wie dem Weizen, Kenntnisse über die Bildung und Verwertung von Assimilationsprodukten gewonnen.[76]

[75]Führ, Fritz et al.: Pesticides in the Soil - Lysimeter Experiments with ^{14}C-Labelled Active Ingredients, Revised Offprint of the Annual Report 1989, Jülich 1990, S. 3f.

[76]Führ, Fritz: Einsatz des kurzlebigen ^{11}C-Radioisotops in der pflanzenphysiologischen Forschung, überarbeiteter Sonderdruck des Jahresberichtes 1987/88, Jülich 1990, S. 3ff.

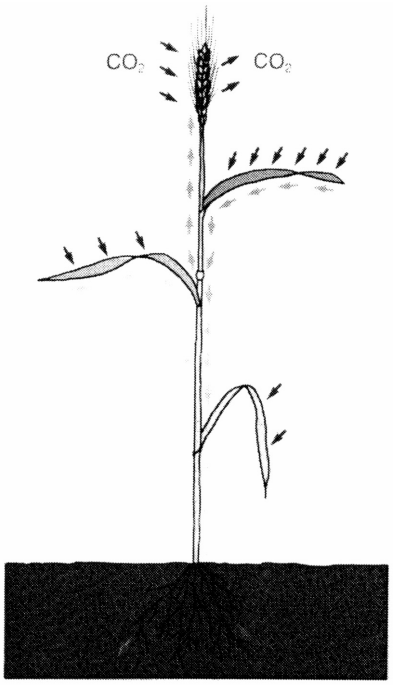

Abbildung 13: CO_2-Assimilation sowie Bildung, Transport, Speicherung und Abbau von Assimilationsprodukten laufen gleichzeitig ab.

3.3.1.2 Radiochemische Analysenmethoden

Die Verdünnungsanalyse wird verwendet, wenn eine quantitative Abtrennung des zu analysierenden Stoffs nicht möglich ist. Zum Beispiel zur Bestimmung des Naphthalin-Gehalts in Erdöl wird eine bekannte Anzahl von C-14-Naphthalin-Indikatormolekülen N_{In} (mit einer bekannten Aktivität A_{In}) zugesetzt. Nach der vollständigen Durchmischung werden N_1 Moleküle entnommen und deren spezifische Aktivität A_1 bestimmt. Die Verdünnung des Indikators ist ein Maß für die Menge des gesuchten Naphthalins N_X im Erdöl (bei vernachlässigbar kleiner Stoffmenge des Indikators):[77]

$$\frac{N_X}{N_1} = \frac{A_{In}}{A_1}$$

Bei der Neutronen-Aktivierungsanalyse wird die Erzeugung künstlicher Radioaktivität durch Neutronenbestrahlung angewendet, um Elemente in kleiner Konzentration nachzuweisen. Die entstandene Radioaktivität besteht vor allem aus γ-Strahlung, so daß durch deren Zerlegung hinsichtlich Energie und Intensität in einem γ-Spektrometer die Spurenelemente sogar nebeneinander bestimmt werden können.[78]

---

[77]Keller, a.a.O., S. 256.

[78]Keller, a.a.O., S. 257ff.

Doch nicht nur in der chemischen Analytik wird die Aktivierungsanalyse eingesetzt, sondern auch in der Geschichtsforschung: Am 5. Mai 1821 starb Napoleon Bonaparte. Die Untersuchung einiger Strähnen seines Haares ergab 140 Jahre später, daß es gut 10 mal mehr Arsen als normal enthielt. Aus der Verteilung im Haar ergab sich, daß Napoleon über vier Monate verteilt etliche Arsendosen verabreicht bekommen hatte (weitere Beispiele siehe 4.4.13.3).[79]

3.3.2 Anwendung von Radionukliden in der Medizin

Radionuklide werden in diagnostischen Verfahren wie auch zur Therapie verwendet.

3.3.2.1 Diagnostik

Bei den rund 100 Millionen Röntgenuntersuchungen, die in der Bundesrepublik Deutschland jährlich durchgeführt werden, stehen Aufnahmen von Knochen in Gliedmaßen und Kopf im Vordergrund. Die Röntgenstrahlung (5–250 keV) liegt energetisch gesehen zwischen der kurzwelligen Ultraviolettstrahlung und der γ-Strahlung, wobei die Röntgen- meist zur γ-Strahlung gezählt wird. An dieser Stelle sei diese künstliche Strahlenquelle erwähnt, auch wenn sie nicht durch Radionuklide sondern als Bremsstrahlung schneller Elektronen entsteht, da sie 2/5 der durchschnittlichen Strahlenbelastung eines Bürgers ausmacht (siehe 3.8).[80]

Für viele medizinische Diagnosen ist es nötig, die Funktion der betroffenen Organe im menschlichen Körper quantitativ zu kennen.[81] Beim Radioimmunoassay (RIA) können Spuren von Antigenen (z.B. Insulin, Steroidhormone, Schilddrüsenhormone) im Blutserum bestimmt werden. Bei diesem in-vitro-Verfahren (d.h. im Reagenzglas) konkurrieren die zu bestimmenden Antigene mit hinzugegebenen, radioaktiv markierten Antigenen bei der Komplexbildung mit einer im Unterschuß hinzugefügten Menge eines Antikörpers:

$$\text{Antigen} + \text{Antikörper} \rightarrow \text{Komplex}$$

Über die Aktivität des abgetrennten Komplexes kann mit Hilfe einer Eichkurve die ursprüngliche Menge des zu bestimmenden Antigens berechnet werden.[82]

Um die Funktion eines Organs direkt zu untersuchen, nutzt man den Effekt aus, daß gesunde und kranke Teile eines Organs geeignete, Positronen emittierende Substanzen unterschiedlich stark aufnehmen und ausscheiden. Der als Radiopharmakon bezeichnete Stoff wird dem Patienten injiziert und nach einer gewissen Zeit die emittierte γ-Strahlung im zu untersuchenden Organ bestimmt. Hierbei finden zwei Verfahren Anwendung:

---

[79]Ebd., S. 262.

[80]Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlenthemen - Röntgendiagnostik: Schädlich oder nützlich?, Salzgitter 1995, S. 3f.

[81]Pohlit, a.a.O., S. 113.

[82]Keller, a.a.O., S. 257.

Beim SPECT-Verfahren (Single Particle Emission Computer Tomography) rotiert ein γ-Detektor im Laufe einer Analyse um den Patienten und registriert einzelne γ-Quanten, die im Computer verarbeitet werden. Beim moderneren PET-Verfahren (Positron Emission Tomography) werden durch gegenüberliegende Detektoren die bei der Positronenvernichtung emittierten γ-Quanten in Koinzidenz (d.h. beim Zusammenfall der beiden Ereignisse) registriert (vergleiche 3.3.1.1). Die ringförmig angeordneten Detektoren werden zu mehreren hintereinandergeschaltet und liefern so innerhalb weniger Sekunden die Daten für mehrere Schnittbilder gleichzeitig. Das PET-Verfahren wird vor allem bei Anomalien von Herz- und Hirnfunktionen eingesetzt.[83]

Beiden beschriebenen Verfahren ist gemeinsam, daß zur Schonung der Patienten im wesentlichen kurzlebige Positronenstrahler wie Kohlenstoff-11, Stickstoff-13 und Sauerstoff-15 verwendet werden. Der Nachteil ist, daß nicht jedes Krankenhaus einen Teilchenbeschleuniger zur Produktion des benötigten Nuklids sowie ein radiochemisches Labor zur Synthese der anzuwendenen Verbindung in der Nähe hat, wodurch diese diagnostischen Möglichkeiten Spezialkliniken vorbehalten bleiben.[84]

3.3.2.2 Therapie

Bei der Strahlentherapie bösartiger Tumoren beruht die Wirkung ionisierender Strahlung darauf, daß Krebszellen aufgrund ihrer hohen Teilungsrate und der großen Stoffwechselleistung strahlungsempfindlicher sind als gesunde Zellen.

Bei der äußeren Behandlung oberflächennaher Tumoren eignen sich insbesondere β-Strahler (Phosphor-32, Schwefel-35, Strontium-90/Yttrium-90), die wegen der geringen Reichweite der β-Teilchen tiefer liegendes, gesundes Gewebe schonen. Zur Behandlung tief im Körperinnern liegender Tumoren werden energiereiche γ-Strahler verwendet (Kobalt-60, Cäsium-137/ Barium137^{m}), die eine hohe Tiefendosis erreichen.[85] Die Zukunft liegt in der Entwicklung von Schwerionenstrahlen, die noch gezielter in der Lage sind, ihre Energie im kranken Gewebe zu deponieren. Bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung kann beispielsweise schon heute mit einem Kohlenstoffstrahl ein kugelförmiges Volumen von sechs Zentimetern Durchmesser in einer Wassertiefe von neun bis 15 Zentimetern homogen bestrahlt werden (siehe Anhang J).[86]

Zur inneren Bestrahlung werden entweder dünne Nadeln, die Kobalt-60 enthalten, zur Spickung des Tumors verwendet, oder radioaktive Lösungen direkt in das kranke Gewebe eingespritzt (bevorzugt Gold-198). In einigen Fällen lassen sich zur innerzellulären Bestrahlung auch Radionuklide oral oder intravenös zuführen, die über Stoffwechsel oder Kreislauf im Krankheitsherd angereichert werden,

---

[83]Pohlit, a.a.O., S. 117ff.

[84]Ebd., S. 120.

[85]Stolz, Werner: Radioaktivität: Grundlagen, Messung, Anwendungen, Stuttgart/Leipzig 1996, S. 167f.

[86]Beste, Dieter: Folge-Forschung, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997, S. 10.

wobei die Hauptanwendungsgebiete die Therapie von Schilddrüsenerkrankungen mit Iod-131 und verschiedener Blutkrankheiten durch Phosphor-32 sind.[87]

3.3.3 Anwendung von Radionukliden in der Technik

3.3.3.1 Radionuklidbatterien

Die bei der radioaktiven Umwandlung freiwerdende Energie wird in Radionuklidbatterien in elektrische Energie umgeformt. Man unterscheidet ein- und zweistufige Konverter, auf deren teilweise komplizierte physikalische Grundlagen hier nicht eingegangen werden kann.

Bei den zweistufigen Konvertern wird die Strahlungsenergie zunächst in Wärme oder Licht umgesetzt, bevor diese Form von Energie dann in Elektrizität umgewandelt wird. Je nach Typ und Größe können so mit α- und β-Strahlern (Actinium-227, Uran-232, Plutonium-238, Curium-242) Leistungen zwischen wenigen Milliwatt und einigen Kilowatt erreicht werden, wodurch sie für den Einsatz unter anderem in Satelliten, automatischen Wetterstationen und unbemannten Leuchttürmen geeignet sind. Das betavoltaische Element ist ein einstufiger Konverter, indem die energiearmen β-Strahlen von Promethium-147 oder Wasserstoff-3 direkt in einem Halbleiter Leistungen bis zu 0,1 Milliwatt erzeugen. Betavoltaische Elemente werden in erster Linie zur Stromversorgung von Herzschrittmachern eingesetzt.[88]

3.3.3.2 Material- und Produktionskontrolle

Zur zerstörungsfreien Materialprüfung im Bereich von Schweißnähten dient die Gammaradiographie. Je nach Stahldicke werden γ-Strahler ausgewählt (zum Beispiel Thulium-170 bis 10 Millimeter Stahldicke, Kobalt-60 bis 160 Millimeter), die das Prüfstück durchstrahlen und auf der anderen Seite durch einen Film oder ein Zählrohr nachgewiesen werden. Ein Materialfehler wie zum Beispiel ein Lufteinschluß macht sich durch eine geringere Schwächung der Strahlung an dieser Stelle (stärkere Schwärzung des Films) bemerkbar (siehe Modellversuch 4.4.3.2).[89]

Die bei der Gammaradiographie beschriebene Methode wird allgemein als Durchstrahlungsverfahren bezeichnet und zur Dicken-, Dichte- und Füllstandsmessung in vielen kontinuierlichen Fertigungsprozessen angewendet (Blech-, Papier-, Plastikfolienherstellung; Füllhöhen in Hochdruckkesseln und Hochöfen; Dichten von Bodenschichten und Schüttgütern). Können aus Platzgründen die Strahlungsquelle und der Detektor nicht beiderseits vom Meßgut angeordnet werden, so läßt sich das

---

[87]Stolz, a.a.O., S. 168.

[88]Ebd., S. 181f.

[89]Stolz, a.a.O., S. 160ff.

Rückstreuverfahren verwenden, bei dem die Rückstreurate bis zu einem Sättigungswert mit zunehmender Schichtdicke wächst.[90]

Bei der Feststellung von Lecks in Gasleitungen können kurzlebige, gasförmige Radionuklide wie Xenon-133 ($\tau = 5{,}25$ Tage) oder Argon-41 ($\tau = 1{,}83$ Stunden) dem Gasstrom beigemischt werden, so daß durch die oberirdische Bestimmung der austretenden Radioaktivität der Riß in der Leitung erfaßt werden kann.[91]

3.3.3.3 Konservierung und Sterilisation

Die Strahlenkonservierung beruht auf der Abtötung beziehungsweise Inaktivierung von Bakterien, Sporen, Enzymen, Hefen und Insekten durch ionisierende Strahlung. Lebensmittelbestrahlung wird mit γ-Strahlern vorgenommen.[92] In über 20 Ländern ist dies Verfahren zur Zeit erlaubt, in Deutschland außer für die Bereitstellung von steriler Krankenkost aber verboten.[93] Niedrige Energiedosen (10 bis 500 Gray) verhindern das Auskeimen von Kartoffeln und Zwiebeln und desinfizieren Getreide, Mehl sowie getrocknete Früchte. Energiedosen bis 5.000 Gray verlängern die Haltbarkeit von Fleisch, Fisch, Früchten und Gemüsen.[94]

Die Strahlensterilisation findet vor allem in der Medizin statt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren mit Hitze oder Chemikalien können bei der sogenannten Kaltsterilisation mittels Strahlung sämtliche medizinischen Materialien aus Kunststoff, Metall und Textilgewebe zunächst in Plastikbeutel eingeschweißt und dann im verpackten Zustand sterilisiert werden. Zur vollständigen Keimfreiheit ist eine Energiedosis von 2.500 Gray ausreichend.[95]

3.3.4 Anwendung von Radionukliden im Alltag

Zahlreiche Industrie- und Handwerkserzeugnisse enthielten und enthalten künstlich zugesetzte Radionuklide. Am bekanntesten sind die strahlenden Leuchtzifferblätter von Armbanduhren und Weckern. Noch bis Mitte der 50er Jahre wurden sie mit radiumhaltiger Farbe bemalt, wobei die Leuchtmasse aus Zinksulfid durch die radioaktive Strahlung zur Lumineszenz angeregt wird (vergleiche 2.3.2). Heutzutage wird der niederenergetische β-Strahler Promethium-147 verwendet. Rein dekorative Funktion hatten Uranverbindungen verschiedenster Farben in Gläsern und Keramikglasuren. Neuere Fabrikate sind zumeist nur schwach und mit abgereichertem Uran gefärbt.[96]

---

[90]Ebd.

[91]Keller, a.a.O., S. 273ff.

[92]Stolz, a.a.O., S. 169f.

[93]Streit, Bruno: Umweltlexikon, Freiburg im Breisgau 1992, S. 180.

[94]Stolz, a.a.O., S. 170.

[95]Stolz, a.a.O., S. 169.

[96]Klemm, Cordula: Radioaktivität in Gebrauchsgegenständen, in: Mensch+Umwelt: Strahlung im

Frei verkäuflich sind sogennante Gaslichtglühstrümpfe, die bis zu 0,6 Gramm der radioaktiven Verbindung Thoriumnitrat enthalten. Ebenso sind manche Kameraobjektive mit einer Thoriumoxidschicht vergütet worden. Auch Legierungen von Schweißelektroden enthalten bis zu zwei Gewichtsprozent Thorium als Metall.[97]

Für Rauch- und Feuerdetektoren macht man sich die Ionisation der Luft durch radioaktive Strahler wie Americum-241 oder Radium-226 zunutze. In Leuchtstoffröhren und in manchen Energiesparlampen dient Krypton-85 als Starthilfe zum Ingangsetzen der Gasentladung. In ähnlich geringen Mengen wie bei Leuchtstoffröhren finden sich Radionuklide noch in vielen weiteren Produkten wie elektronischen Bauteilen, Prüfgeräten, Notbeleuchtungen und ähnlichem.[98]

3.4 Massendefekt

Grundlegend für das Verständnis der energetischen Vorgänge bei Kernspaltung und -fusion ist das Wissen um die Umwandlung von Masse in Energie sowie der sich daraus ergebenden Konsequenzen.

Albert Einstein lieferte in seiner Relativitätstheorie den Zusammenhang von Energie und Masse in Form der Gleichung:

$$E = m \cdot c^2$$

Man betrachte den radioaktiven α-Zerfall von Radium-226 und die Atommassen der beteiligten Stoffe (in u):

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

$$226{,}0254 > 4{,}0026 + 222{,}0176$$

So zeigt sich, daß die Masse vorher größer war als nachher. Offenbar wird bei diesem radioaktiven Zerfall ein Teil der Masse nach der Einsteinschen Beziehung in Energie umgewandelt. Ebenso ist ganz allgemein zu erwarten, daß Kernbindungsenergie frei wird, wenn sich Protonen und Neutronen zu einem stabilen Kern vereinigen. Diesen Betrag in atomaren Masseneinheiten bezeichnet man als Massendefekt und berechnet ihn aus der Nuklidmasse M, der Protonenzahl N_p und der Neutronenzahl N_n mit der Gleichung:

$$\Delta M = N_p \cdot 1{,}00783 + N_n \cdot 1{,}00866 - M$$

Im Fall des Radium-226 ergibt sich:

$$\Delta M = 88 \cdot 1{,}00783 + (226\text{-}88) \cdot 1{,}00866 - 226{,}0254(1) = 1{,}85871$$

Über die Einsteinsche Beziehung berechnet man (mit 1,85871 u = $3{,}0865 \cdot 10^{-27}$ kg)

Alltag, Neuherberg 1991, S. 10.

[97]Martin, Joachim: Radioaktivität und Strahlung in unserer Umwelt, in: Praxis der Naturwissenschaften Chemie, Heft 7/34: Kern- und Radiochemie, Köln 1985 S. 42f.

[98]Klemm, a.a.O., S. 10.

$$E = 3{,}0865 \cdot 10^{-27} \cdot (2{,}998 \cdot 10^{8})^2 \text{ J} = 2{,}7742 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1732 \text{ MeV}$$

Um mehrere Nuklide miteinander vergleichen zu können, dividiert man jeweils den Massendefekt durch die Nukleonenzahl $N_p + N_n$ und erhält die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon. Trägt man die Massenzahl gegen die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon graphisch auf, so ergeben sich folgende Schaubilder:[99]

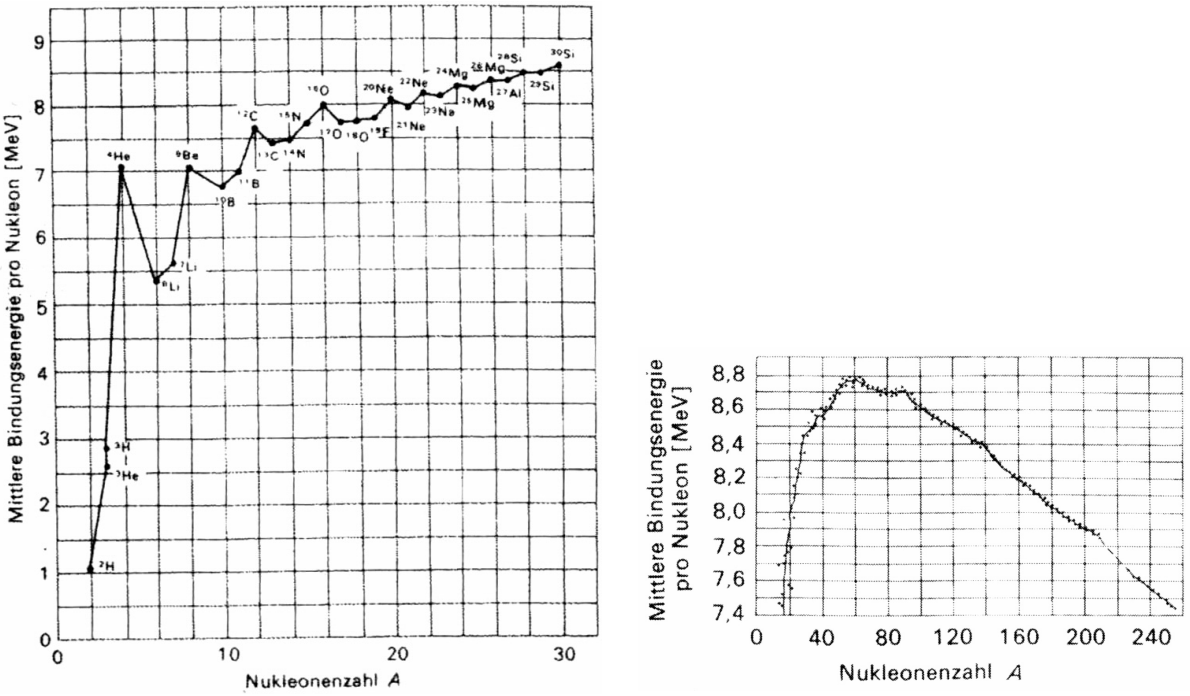

Abbildung 14 / 15: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon (A=2-30 / A≥16)

Aus der rechten Abbildung wird ersichtlich, daß durch Spaltung von schweren Atomen neue Teilchen entstehen, deren mittlere Bindungsenergien pro Nukleon sehr viel größer sind als die des Ausgangsatoms, daß also bei der Kernspaltung schwerer Nuklide Energie frei werden muß. Umgekehrt sagt die linke Abbildung aus, daß mittels Kernverschmelzung sehr leichter Nuklide wie etwa Deuterium (Wasserstoff-2) zu Helium-4 ebenfalls Energie gewonnen werden kann. Um diese beiden Phänomene und ihre (mögliche) Nutzung geht es in den zwei abschließenden Abschnitten dieses Kapitels.

3.5 Kernspaltung

3.5.1 Entdeckung

Die erste künstliche Kernumwandlung gelang Rutherford 1919 mit Hilfe von α-Strahlung (vergleiche 3.1).[100] Im Jahr 1934 beobachteten italienische Physiker um Enrico Fermi (1901–1954), daß bei Bestrahlung von Uran mit Neutronen künstliche Radioaktivität entsteht, und führten diese

[99]Willi, a.a.O., S. 44.

[100]Lindner, a.a.O., S. 156.

Beobachtung auf die Bildung von Transuranen zurück. 1938 wiesen Otto Hahn (1879–1968), Lise Meitner (1878–1968) und Fritz Strassmann (1902–1980) in Berlin nach, daß die ursprünglichen Überlegungen ihrer Kollegen nicht richtig waren, sondern vielmehr – vollkommen unerwartet – unter anderem radioaktive Isotope von Barium und Lanthan entstanden waren. Die Entstehung dieser Nuklide war nur durch die Annahme erklärbar, daß Uranatomkerne zerplatzen. Zur Veranschaulichung des Ablaufs der Kernspaltung ist das von Carl Friedrich von Weizsäcker (geboren 1912) entwickelte Tröpfchenmodell gut geeignet:

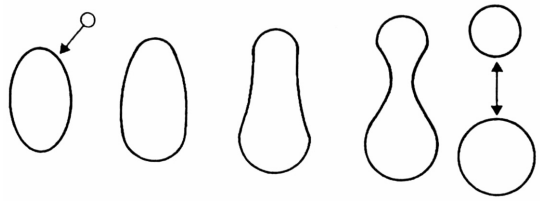

Abbildung 16: Tröpfchenmodell der Kernspaltung[101]

Durch Einfang des Neutrons entsteht ein energiereicher Compound-Kern (compound [engl.]: Verbindung), der derart in Schwingungen gerät, daß sich eine Einschnürung bildet, die schließlich zu einer Spaltung in zwei Kerne führt. Infolge der elektrostatischen Abstoßung fliegen die Kerne auseinander.[102]

Bald wurde festgestellt, daß die entdeckte Kernspaltung im wesentlichen das Uran-235-Isotop betraf, welches mit nur etwa 0,72% im Natururan enthalten ist. Aber eine besondere Eigenschaft ließ die Kernreaktion von Uran-235 für die Forscher interessant erscheinen: Beim Spaltprozeß wird zwar auf der einen Seite ein Neutron verbraucht, auf der anderen Seite entstehen aber zwei bis drei Neutronen, so daß eine Kettenreaktion möglich wird:[103]

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow 2\ \text{Spaltprodukte} + \nu\ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \Delta E \quad (\nu = 2 \text{ bis } 3)$$

Wenn eine Kettenreaktion ablaufen soll, so sind zwei Bedingungen zu erfüllen:

1. Es müssen Neutronen vorhanden sein, die die ersten Spaltungen einleiten.
2. Es müssen in der zu spaltenden Masse mehr Neutronen erzeugt werden, als in der gleichen Zeit verloren gehen.

Die erste Bedingung ist infolge der geringfügigen Spontanspaltung von Uran-235 (vergleiche 2.2.4: Uran-234) und der durch die kosmische Höhenstrahlung fortwährend gebildeten Neutronen erfüllt. Bei der Befriedigung der zweiten Bedingung ist das im Natururan zu 99,27% überwiegende Uran-238 hinderlich, da es zwar in geringem Maß durch sehr schnelle Neutronen gespalten wird, aber die zur Uran-235-Spaltung notwendigen langsamen Neutronen stark absorbiert und sich in Plutonium-239 umwandelt.[104]

---

[101]Willi, a.a.O., S. 67.

[102]Ebd.

[103]Keller, a.a.O., S. 195.

[104]Lindner, a.a.O., S. 165ff.

3.5.2 Kernspaltungsbombe

Ein vernichtender Einsatz dieser Kettenreaktion findet in Kernspaltungsbomben statt. Diese enthalten im wesentlichen zwei Stücke aus fast reinem Uran-235 (oder Plutonium-239). Bei der plötzlichen Vereinigung wird die sogenannte kritische Masse überschritten. Unter der kritischen Masse versteht man die Menge an spaltbarem Material, bei der die oben genannten Kriterien für eine Kettenreaktion erfüllt sind. Für auf 93% angereichertes Uran-235 beträgt die kritische Masse etwa 50 Kilogramm und für reines Plutonium-239 etwa sechs Kilogramm.[105] Werden also die beiden Teilmassen mit Hilfe einer Treibladung zusammengeschossen, wächst die Zahl der an Spaltprozessen beteiligten Neutronen lawinenartig an, so daß eine unkontrollierte Kettenreaktion stattfindet und augenblicklich die Detonation erfolgt.[106]

Nach einer Versuchsbombe am 16.7.1945 in der Wüste von New Mexico wurden am 6. und 9.8.1945 zwei Kernspaltungsbomben über den japanischen Städten Hiroshima und Nagasaki abgeworfen. Ein Kilogramm Uran-235 setzt bei seiner Spaltung 2,3 ·10 kWh Energie frei. Die Hiroshima-Bombe erreichte bei einer Gesamtmasse von 5 t und einem Wirkungsgrad von 2% eine Stärke, die 20.000 t Trinitrotoluol (TNT) entspricht.[107]

3.5.3 Kernspaltung als Energiequelle

Schon vor zirka zwei Milliarden Jahren liefen auf der Erde kontrollierte Kettenreaktionen ab. Im westafrikanischen Gabun wurde man beim Uranabbau auf Anomalien beim Uran-235-Gehalt im Natururan aufmerksam.[108] Teilweise fand man Abreicherungen bis zu 40%, wobei diese um so größer waren, je höher die Gesamtkonzentration an Uran lag. An insgesamt 13 Stellen wurden anhand von stabilen Endgliedern kurzlebiger Spaltprodukte prähistorische Reaktortätigkeiten gefunden. Es konnte errechnet werden, daß sich die Kettenreaktion vermutlich mehrere hunderttausend Jahre bei Temperaturen zwischen 180°C und 450°C selbst in Gang gehalten hat.[109]

Wie sich Uran in Konzentrationen bis zu 60 Gewichtsprozent ablagern konnte, was als Grundvoraussetzung für das Phänomen angesehen wird, ist aus geologischer Sicht noch nicht geklärt. Ebenfalls ist noch nicht eindeutig erforscht, wie es über eine so lange Zeit zu einer kontrollierten Kettenreaktion kommen konnte. Man hat die Hypothese von zwei unterschiedlichen Kontrollmechanismen aufgestellt: Zum einen sollen geringe Beimengungen von Lithium-6, Bor-6 und Cadmium-113 gerade soviele Neutronen abgefangen haben, daß die Kettenreaktion nicht lawinenartig ablief. Zum anderen soll Regenwasser die Neutronen abgebremst haben, so daß sie, auf thermische Geschwindigkeit gebracht, mit dem Uran-235 reagieren konnten. Je mehr Regenwasser nun aber in das Uran

---

[105]Willi, a.a.O., S. 70.

[106]Lindner, a.a.O., S. 173f.

[107]Ebd.

[108]Keller, a.a.O., S. 216.

[109]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 46f.

eindrang, desto größer wurde die Anzahl der Kernspaltungen. Die dadurch steigende Temperatur verdampfte das Wasser stärker, wodurch die Anzahl der Kernspaltungen wieder abnahm.[110]

Nachdem in den vierziger Jahren die ersten Kernreaktoren hauptsächlich zu Forschungszwecken und für die Radionuklidherstellung genutzt worden waren, wurden seit 1950 auch Reaktoren zur Elektrizitätserzeugung gebaut.

3.5.4 Reaktortypen

Bevor auf die einzelnen Typen von Reaktoren eingegangen wird, soll das grundlegende Prinzip von Kernreaktoren erklärt werden. Sie bestehen aus folgenden Grundkomponenten:

- Spaltmaterial und -neutronen
- Moderator
- Steuerstäbe
- Wärmeabfuhr und Strahlenschutz

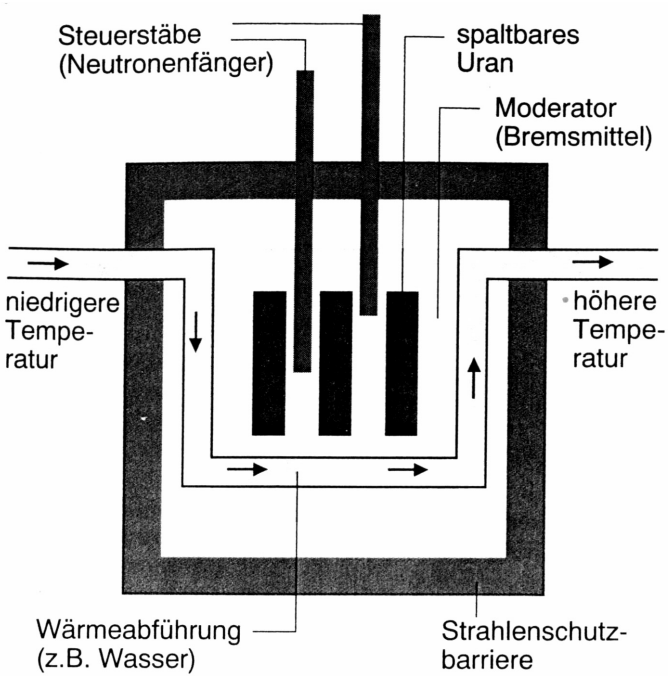

Abbildung 17: Prinzipieller Aufbau eines Kernreaktors[111]

3.5.4.1 Spaltmaterial und -neutronen

Eine kontrollierte Kettenreaktion läßt sich nur entwickeln, wenn eine ausreichende Masse an spaltbarem Material und eine genügend große Anzahl von Spaltneutronen zur Verfügung stehen. Für die

[110]Ebd.

[111]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 36.

Spaltung eines Kerns Uran-235 ist ein thermisches Neutron (< 10 Elektronenvolt kinetische Energie) nötig. Da die bei der Spaltung auftretenden Neutronen praktisch ausschließlich schnelle Neutronen (> 0,1 Megaelektronenvolt) sind, müssen sie durch geeignete Substanzen auf niedrige Geschwindigkeiten abgebremst werden.[112]

3.5.4.2 Moderator

Ein Moderator ist ein Bremsmittel, an dessen Kernen die Neutronen durch elastische und unelastische Stöße abgebremst werden. Neutronen sollen auf der einen Seite durch den Moderator möglichst schnell gebremst werden, auf der anderen Seite darf der Moderator nur eine geringe Neigung zum Einfang von Neutronen besitzen.

Schweres Wasser (D_2O) erfüllt die beiden Bedingungen besser als alle anderen Stoffe. Seine Herstellung ist jedoch sehr aufwendig und teuer (vergleiche 2.7). Graphit ist günstig und hat gute Moderatoreigenschaften; es muß jedoch absolut rein sein, da Verunreinigungen Spaltneutronen einfangen und künstliche Radioisotope entstehen können. Leichtes Wasser (H_2O) hat zwar beste Bremseigenschaften, jedoch auch eine große Neigung zum Neutroneneinfang, wobei Deuterium entsteht:

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma $$

Bei der Wahl von leichtem Wasser muß der entstehende Neutronenverlust ausgeglichen werden, indem das in den Brennstäben verwendete Uran-235 von 0,7% auf 2–4% angereichert wird.[113]

3.5.4.3 Steuerstäbe

Zur Kontrolle der Kettenreaktion im Reaktor werden neutronenabsorbierende Materialien benötigt. In Form von Steuerstäben werden sie im Bedarfsfall in die Spaltzone geschoben. Als Absorptionsmaterial eignen sich vor allem Bor und Cadmium. So bestehen Steuerstäbe zum Beispiel aus Boral, einer Legierung aus Aluminium und Borcarbid (B_4C):[114]

$$ {}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma $$

3.5.4.4 Wärmeabfuhr und Strahlenschutz

Die bei der Kernspaltung freiwerdende Wärme wird je nach Reaktortyp in einem Kühlmittelkreislauf mit Wasser, Natrium oder Helium abgeführt.

---

[112]Ebd., S. 36f.

[113]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 38f.

[114]Ebd., S. 41f.

Als Barrieren für den Strahlenschutz und zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe dienen unter anderem ein Sicherheitsbehälter aus Stahl und eine Betonabschirmung in Form des Reaktorgebäudes.[115]

3.5.4.5 **Siedewasserreaktor** (Anhang K1)

Die Brennelemente aus Urandioxid (Anreicherungsgrad an Uran-235 bis zu 3,5%) befinden sich in einem zu etwa zwei Drittel mit (leichtem) Wasser gefüllten Druckbehälter. Die in den Brennstäben entwickelte Wärme verdampft einen Teil des Wassers und treibt in Form von Wasserdampf eine Turbine an, die ihrerseits mit einem Drehstromgenerator gekoppelt ist. Im Kondensator wird der aus der Turbine kommende Dampf mit Flußwasser gekühlt, verflüssigt und zur Kreislaufschließung in den Reaktordruckbehälter zurückgepumpt. Das verwendete, voll entsalzte Wasser ist Kühlmittel und Moderator zugleich und enthält als Wasserdampf auch radioaktive Verunreinigungen, so daß neben dem Reaktor- auch das Maschinenhaus in die Betonsicherheitsabschirmung miteinbezogen werden muß.[116]

3.5.4.6 **Druckwasserreaktor** (Anhang K2)

Im Vergleich zum Siedewasserreaktor ist der Druckwasserreaktor mit einem Zweikreiskühlungssystem ausgerüstet. Durch den Primärkreislauf wird das Kühlmittel Wasser unter hohem Druck gepumpt, um ein Sieden zu verhindern. Über einen Dampferzeuger gibt das erhitzte Wasser des primären Kreislaufs seine Wärme an das Wasser des Sekundärkreislaufs ab, wodurch die Belastung mit radioaktiven Stoffen auf den ersten Kühlkreislauf beschränkt bleibt und die spezielle Sicherheitsabschirmung nur für das Reaktorgebäude notwendig ist. Die Stromgewinnung im sekundären Kreislauf entspricht im weiteren dann dem oben Beschriebenen.[117]

3.5.4.7 **Schneller Brutreaktor** (Anhang K3)

In Brutreaktoren laufen zwei Vorgänge gleichzeitig ab. Zum einen finden Kernspaltungen statt, bei denen Energie freigesetzt wird, zum anderen wird Uran-238 in spaltbares Plutonium-239 umgewandelt. Der Reaktorkern eines Brutreaktors besteht aus einer inneren Spaltzone, in der sich Brennstäbe mit einer Mischung von Uran- und Plutoniumoxid befinden. Das Plutonium-239 wird durch schnelle Neutronen gespalten. Die äußere Brutzone besteht nur aus Uranoxid mit abgereichertem Uran, so daß hier Uran-238 durch den Einfang schneller Neutronen in Plutonium-239 umgewandelt wird.

Da offensichtlich beide beschriebenen Vorgänge nur mit schnellen Neutronen ablaufen, darf bei diesem Reaktortyp kein Moderator vorhanden sein, wodurch auch Wasser als Kühlmittel nicht in

[115]Ebd., S. 62ff.

[116]Franzen, Ludwig Ferdinand: Stellungnahmen zu Kernenergiefragen: Aufbau und Wirkungsweise von Kernkraftwerken, Köln 1983, S. 38ff.

[117]Ebd., S. 21ff.

Frage kommt. Flüssiges Natrium hingegen wirkt nicht moderierend und wird im Primär- und Sekundärkreislauf verwendet. Das Natrium des primären Kreislaufs wird dabei durch Neutronen aktiviert und zerfällt unter Aussendung eines Elektrons zu Magnesium:[118]

$$^{23}_{11}\text{Na} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na}$$

$$^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + ^{0}_{-1}\text{e} + ^{0}_{0}\bar{\nu}$$

Der sekundäre Kreislauf ist als Zwischenwärmetauscher vor den Tertiärkreislauf geschaltet, um im Falle eines Störfalls eine Reaktion von radioaktivem Natrium mit dem Wasser-Dampf-Kreislauf zur Stromerzeugung auszuschließen, da Natrium mit Wasser unter Bildung von Wasserstoff reagiert:

$$2\,\text{Na} + 2\,\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\,\text{NaOH} + \text{H}_2 + 285{,}5\,\text{kJ}$$

Der gebildete Wasserstoff würde sich augenblicklich wegen der hohen Temperatur des flüssigen Natriums (395°C–545°C) entzünden.[119]

Der Brutprozeß erzeugt insgesamt mehr Plutonium-239 als verbraucht wird, so daß nach Abzug von Verlusten bei der notwendigen Brennstoffaufbereitung das eingesetzte Natururan etwa 60mal besser als in Leichtwasserreaktoren ausgenutzt werden kann.[120]

3.5.4.8 **Hochtemperaturreaktor** (Anhang K4)

Wie der Siede- und der Druckwasserreaktor arbeitet der Hochtemperaturreaktor mit langsamen Neutronen, die mit Graphit als Moderator gewonnen werden. Die Brennelemente sind Graphitkugeln, die wiederum aus etwa 35.000 kleinen Teilchen bestehen, in denen insgesamt 1 g Uran-235 als Spaltstoff und 10 g Thorium-232 als Brutstoff enthalten sind. Aus dem Thorium-232 wird Uran-233 erbrütet:[121]

$$^{232}_{90}\text{Th} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{233}_{90}\text{Th}$$

$$^{233}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{233}_{91}\text{Pa} + ^{0}_{-1}\text{e} + ^{0}_{0}\bar{\nu} \quad (\tau = 22{,}3\ \text{Minuten})$$

$$^{233}_{90}\text{Pa} \rightarrow ^{233}_{91}\text{U} + ^{0}_{-1}\text{e} + ^{0}_{0}\bar{\nu} \quad (\tau = 27{,}0\ \text{Tage})$$

Das Uran-233 ist durch langsame Neutronen spaltbar, wodurch beim Betrieb ein Teil des Spaltstoffs im Reaktor selbst erzeugt wird.[122]

Die Kühlmitteltemperatur von 750°C des als Kühlgas verwendeten Heliums liegt weit über der von Leichtwasserreaktoren mit bis zu 330°C und Schnellen Brütern mit bis zu 550°C und kann auch als Prozeßwärme zum Beispiel zur Kohlevergasung genutzt werden. Das eingesetzte Helium wird durch

---

[118]Ebd., S. 59ff.

[119]Holleman, a.a.O., S. 1165.

[120]Franzen, a.a.O., 59ff.

[121]Willi, a.a.O., S. 76.

[122]Ebd., S. 48.

Neutronenbestrahlung praktisch nicht aktiviert und ist auch bei hohen Temperaturen chemisch inert.[123]

3.6 Brennstoffkreislauf

Der Begriff des Brennstoffkreislaufs ist im eigentlichen Sinne nicht korrekt gewählt, da kein vollständiger Kreislauf vorliegt, sondern vielmehr fortlaufend Uranerz zugeführt und radioaktive Abfälle entfernt werden müssen.

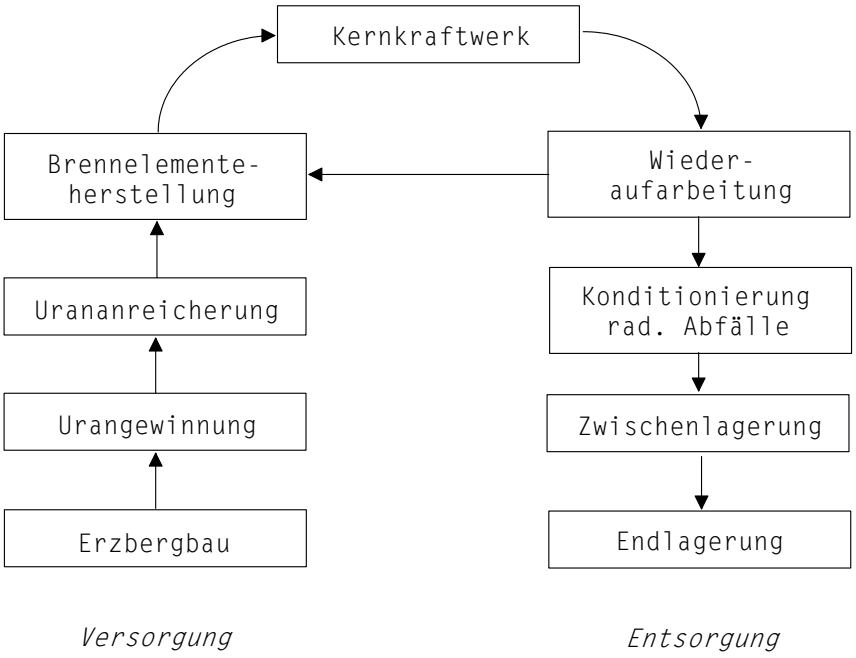

Abbildung 18: Ver- und Entsorgung des radioaktiven Brennstoffkreislaufs

3.6.1 Uranvorkommen

Das wichtigste Mineral des Urans ist das Uranpecherz (Pechblende) UO_2, dessen größte Lagerstätten sich in Zaire (Katanga), Kanada (Bärensee) und Tschechien (Joachimsthal) finden.[124] Die dort geförderten Erze können wirtschaftlich genutzt werden, da der Urananteil 0,1 bis 0,5% beträgt. Tritt Uran jedoch im Verbund mit anderen Metallen wie Gold oder Vanadium auf, so lassen sich auch uranärmere Erze verwerten, wie dies beispielsweise in Südafrika geschieht. Hochgerechnet steht genügend spaltbares Uran-235 für die nächsten 130 Jahre zur Verfügung (Stand 1992).[125]

---

[123]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 54f.

[124]Holleman, a.a.O., S. 1794f.

[125]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 75

3.6.2 Urangewinnung

Das Erz wird fein zermahlen und mit Säure unter Anwesenheit eines Oxidationsmittels wie Mangandioxid (MnO_2) aufgeschlossen:

$$2\ UO_2\ +\ 2\ H_2SO_4\ +\ O_2\ \rightarrow\ 2\ UO_2(SO_4)\ +\ 2\ H_2O$$

Das entstandene, gut lösliche Uranylsulfat wird durch eine Reihe von Reinigungsprozessen (Dekantieren, Filtern, Ionenaustausch usw.) von Begleitstoffen befreit und mit Ammoniak als Ammoniumdiuranat abgeschieden:

$$2\ UO_2(SO_4)\ +\ 6\ NH_3\ +\ 3\ H_2O\ \rightarrow\ (NH_4)_2U_2O_7\ +\ 2\ (NH_4)_2SO_4$$

Eingedickt und getrocknet besitzt das Ammoniumdiuranat technische Reinheit und enthält etwa 75% Uran. Wegen seiner gelben Farbe hat es den Namen Yellow Cake ([engl.]: gelber Kuchen) erhalten.[126]

3.6.3 Uran-235-Anreicherung

Zur Anreicherung wird das Yellow Cake in die gasförmige Verbindung Uranhexafluorid umgewandelt:

$$(NH_4)_2U_2O_7\ +\ 12\ HF\ \rightarrow\ 2\ UF_6\ +\ 2\ NH_3\ +\ 7\ H_2O$$

Für die eigentliche Anreicherung sind Diffusions-, Zentrifugen- und Trenndüsenverfahren entwickelt worden. In Deutschland wird das Zentrifugenverfahren benutzt, bei dem die schweren Moleküle bevorzugt an die Zentrifugenwand getrieben werden, während sich die leichteren Moleküle in der Nähe der Rotorachse sammeln.

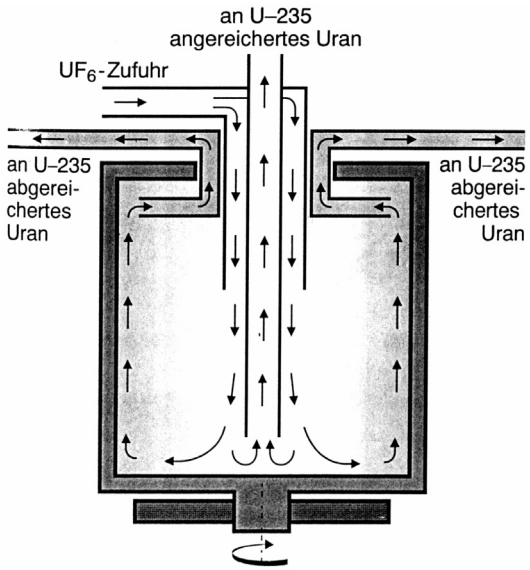

Abbildung 19: Prinzip des Zentrifugenverfahrens[127]

[126]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 75.

[127]Ebd., S. 45.

Bei Geschwindigkeiten von 500 m/s an der Peripherie müssen etwa 30 derartige Ultrazentrifugen hintereinandergeschaltet werden, um eine Anreicherung von 4% Uran-235 zu erhalten.[128]

3.6.4 Herstellung von Brennelementen

Beim in Deutschland Anwendung findenden naßchemischen Verfahren läßt man angereichertes Uranhexafluorid mit Wasser, Ammoniak und Kohlendioxid reagieren:

$$UF_6 + 2\,H_2O \rightarrow UO_2F_2 + 4\,HF$$

$$UO_2F_2 + 6\,NH_3 + 3\,CO_2 + 3\,H_2O \rightarrow (NH_4)_4[UO_2(CO_3)_3] + 2\,NH_4F$$

Das entstandene Ammonium-Uranyl-Carbonat fällt aus und wird durch Erhitzen in Ammoniak, Kohlenstoffdioxid, Uranyltrioxid und Wasser gespalten:

$$(NH_4)_4[UO_2(CO_3)_3] \rightarrow 4\,NH_3 + 3\,CO_2 + UO_3 + 2\,H_2O$$

Durch Reaktion mit Wasserstoff reduziert man das Urantrioxid zu Urandioxid, welches zunächst als graues Pulver vorliegt:

$$UO_3 + H_2 \rightarrow UO_2 + H_2O$$

Durch Pressen und Sintern (d.h. durch Erhitzen zusammenbacken lassen) wird es zu sogenannten Pellets ([engl.]: Tabletten) verdichtet. Diese werden in Hüllrohre gefüllt und verschweißt. Der entstandene Brennstab wird zu mehreren in Form eines Brennelements zusammengefaßt.[129]

3.6.5 Wiederaufarbeitung

Die bis zu sieben Jahre eingesetzten Brennelemente zeichnen sich durch eine hohe spezifische Aktivität und damit auch hohe Wärmeproduktion aus. Daher werden sie vor Ort bis zu zwölf Monate in wassergefüllten Abklingbecken gelagert, bevor sie zur Wiederaufarbeitungsanlage transportiert werden.[130]

In der Wiederaufarbeitungsanlage werden die Brennstäbe aufgesägt und der Inhalt in siedender Salpetersäure gelöst. Beim PUREX-Verfahren ([engl. Abk.] Plutonium-Uranium-Recovery by Extraction: Plutonium-Uran-Wiedergewinnung durch Extraktion) wird eine physikalisch-chemische Trennung der drei Komponenten Uran, Plutonium und übrige Produkte vorgenommen. Als Extraktionsmittel wird Tri-n-Butyl-Phosphat (TBP) verwendet, das mit 70% Kerosin verdünnt ist. Während die Uran- und Plutoniumnitrate Komplexe mit dem TBP bilden und sich in der organischen Phase lösen, verbleiben die übrigen Kernreaktionsprodukte im wäßrigen Teil der Lösung. Für eine fast 100%ige Trennung muß diese Extraktion mehrere Male durchgeführt werden.[131]

---

[128]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 44ff.

[129]Ebd., S. 76.

[130]Ebd., S. 80ff.

[131]Volkmer, Basiswissen, a.a.O., S. 80ff.

3.6.6 Konditionierung und Lagerung von radioaktiven Abfällen

Uran und Plutonium werden wieder der Brennelementeherstellung zugeführt. Die hochaktive Lösung von Restprodukten muß fünf Jahre in gekühlten Edelstahltanks abklingen, bevor sie eingeengt, mit glasbildenden Stoffen gemischt und zu Glasblöcken geschmolzen werden können. Diese Konditionierung, d.h. Überführung des radioaktiven Abfalls in eine endlagerungsfähige Form, geschieht bei Abfällen mit geringerer Strahlenentwicklung im allgemeinen durch Einschluß in Stahlfässer, die unter Umständen mit Bitumen oder Beton aufgefüllt werden.[132]

Während solche schwach radioaktiven Abfälle bereits seit einigen Jahrzehnten in Salzbergwerken (z.B. Asse II bei Wolfenbüttel) endgelagert werden, werden alle angefallenen, stark wärmeentwickelnden Abfälle derzeit noch oberirdisch in Zwischenlagern aufbewahrt. Um einen dauerhaften Ausschluß aus der Biosphäre gewährleisten zu können, sucht man geologische Formationen, die verschiedene Anforderungen wie Abwesenheit von Grundwasser, Fehlen von Gesteinsrissen und geringe Erdbebengefahr erfüllen. Vor diesem Hintergrund werden der Salzstock Gorleben und das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad (bei Salzgitter) erforscht.[133]

3.7 Kernfusion

Die Kernfusion wird in Form der sogenannten Wasserstoffbombe als Waffe genutzt, wobei festes Lithiumdeuterid (${}^{6}_{3}\mathrm{Li}\,{}^{2}_{1}\mathrm{D}$) mit Hilfe einer Plutoniumbombe zur Kernreaktion gebracht wird:

$$ {}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{1}\mathrm{T} + 4{,}6\ \mathrm{MeV} $$

$$ {}^{3}_{1}\mathrm{T} + {}^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 17{,}6\ \mathrm{MeV} $$

Die Sprengkraft durchschnittlicher Kernfusionswaffen wird auf 20 Millionen Tonnen TNT geschätzt.[134]

Bei der friedlichen Nutzung der Kernfusion wird als Ziel angestrebt, Deuteriumkerne zu verschmelzen. Auf dem Weg dahin wird zur Zeit an einem Experimentalfusionsreaktor gearbeitet, in dem Deuterium und Tritium als Brennstoff verwendet werden wird. In einer ringförmigen Brennkammer soll das Plasma (ein Gas, das in diesem Fall nur aus Deuterium- und Tritiumkernen besteht) bei 100 Millionen Grad Celsius magnetisch eingeschlossen werden und nach der zweiten, oben angegebenem Fusionsgleichung reagieren. Das in der Natur praktisch nicht vorkommende Tritium wird hinter der ersten Reaktorwand aus Lithium durch Einfang von Brennkammerneutronen erbrütet:[135]

$$ {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Vorsichtige Schätzungen gehen davon aus, daß bis zum Bau eines serienreifen 1.000 Megawatt-Reaktors noch 30 bis 50 Jahre Entwicklungs- und Erprobungszeit vergehen werden. In diesem Zeitraum

---

[132]Ebd., S. 84ff.

[133]Ebd., S. 78.

[134]Lindner, a.a.O., S. 199f.

[135]Knapp, Sabine: Kernenergie im Unterricht, Ausgabe 1/91: Kernfusion, Bonn 1991.

muß unter anderem auch die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle geklärt werden, die mit 2.000 Kubikmeter hochradioaktiven und 4.000 Kubikmeter mittelaktiven Stoffen während einer 30jährigen Betriebsdauer veranschlagt werden.[136]

3.8 Strahlenbelastung und ihre Folgen

Die mittlere effektive Strahlendosis (gemeint: mittlere Äquivalentdosis, vergleiche 2.4.4) liegt in Deutschland bei 4 Millisievert. Davon sind im Mittel 2,4 Millisievert natürliche und 1,6 Millisievert zivilisatorischen Ursprungs.[137]

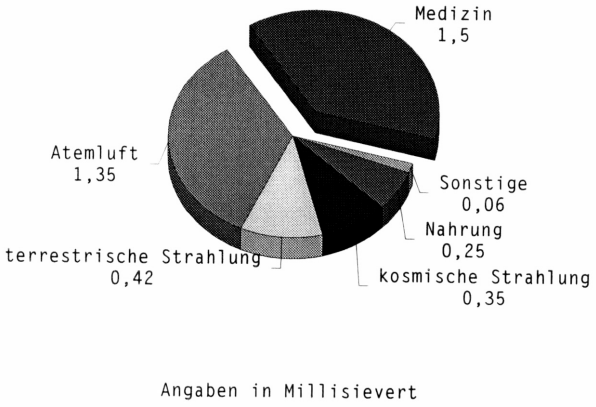

Abbildung 20: Strahlung im Alltag (mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland 1992 in Millisievert)[138]

Die natürliche Strahlung setzt sich zusammen aus innerer Strahlenexposition durch radioaktive Stoffe in Atemluft und Nahrung (vor allem Radon-220 und Kalium-40) sowie äußerer Strahlenexposition aufgrund terrestrischer und kosmischer Strahlung. Der künstliche, auf die Zivilisation zurückzuführende Strahlungsanteil ist im wesentlichen auf medizinische Untersuchungs- und Behandlungsmethoden zurückzuführen (vergleiche 3.3.2). Hinter 'Sonstige' mit 0,06 Millisievert verbergen sich die Belastungen aufgrund von in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken und wegen des Reaktorunfalls in Tschernobyl.[139]

Während zu den konkreten Auswirkungen sehr niedriger Äquivalentdosen noch keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, sind Strahlenschäden bei mittleren und hohen Äquivalentdosen unumstritten.

---

[136]Ebd.

[137]Fakten: Energiewirtschaft heute und morgen, Informationen und Nachrichten, Nr. 138 9/94, Nr. 151 10/96.

[138]Bundesamt für Strahlenschutz, a.a.O.

[139]Bundesamt für Strahlenschutz, a.a.O.

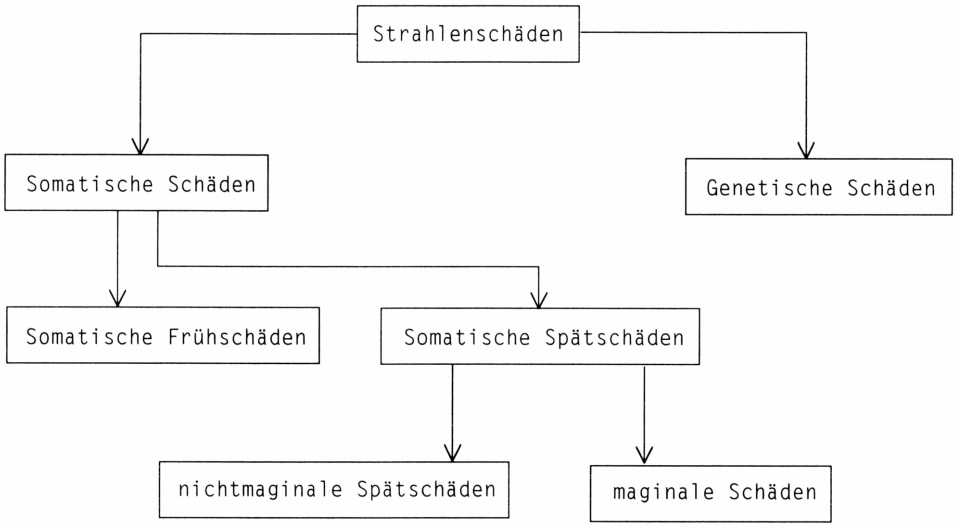

Abbildung 21: Einteilung der Strahlenschäden[140]

Gemeinhin werden somatische (körperliche) und genetische Schäden unterschieden: genetische Schäden betreffen nachfolgende Generationen, somatische Schäden haben Früh- und Spätfolgen für die verstrahlten Personen selber. Während die Frühschäden auf physikalischen Wirkungen beruhen (Zerstörung von Zellen durch Temperaturerhöhung), sind die Spät- wie die genetischen Schäden auf chemische Veränderungen in wichtigen Zellmolekülen zurückzuführen. Im Fall von Leukämie oder Krebs enden die Spätschäden maginal (tödlich).[141]

Somatische Frühschäden zählen zu den nicht-stochastischen (nicht-zufallsbedingten) Schäden, so daß das Gewebe gestörte Zellen bis zu einer bestimmten Energiedosis ständig erneuern kann. Einen derartigen Schwellenwert gibt es bei stochastischen Schäden, zu denen somatische Spät- und genetische Schäden zählen, jedoch nicht, so daß auch niedrig angesetzte Grenzwerte keine absolute Sicherheit geben können.[142]

[140]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 11.

[141]Ebd., S. 11ff.

[142]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 11ff.

4 Die Umsetzung des Projekts im Unterricht

4.1 Das Projekt in der Theorie

Im Rahmen eines Projekts wird den Schülern die Möglichkeit eingeräumt, eigene Wünsche in den Unterricht einzubringen. Dies ermöglicht auf der einen Seite ein hohes Maß an Selbständigkeit, es setzt aber auf der anderen Seite auch die Bereitschaft und Fähigkeit voraus, mit anderen Schülern zusammenzuarbeiten.[143]

John Dewey (1859–1952), der einflußreichste amerikanische Pädagoge des 20. Jahrhunderts, führte die Projektmethode als methodisches Instrumentarium in die Schulpraxis ein.[144] Er vertrat die Ansicht, daß sich Erkenntnisse anhand von Erfahrungen des Lebens bilden und „was nicht zur Tat wird, hat keinen Wert!"[145]

In den verschiedenen reformpädagogischen Strömungen dieses Jahrhunderts findet sich das Projekt, um die Institution Schule wieder stärker mit der Lebensrealität zu verbinden. Um aber eine Degradierung auf eine Trickkistenebene für motivationsfördernde Maßnahmen zu verhindern, muß jedes geplante Projekt kritisch untersucht werden.[146] Die folgenden Kriterien fassen die wichtigsten Merkmale projektorientierten Unterrichts zusammen und können schon im Rahmen der Planungsphase zeigen, ob die unterrichtliche Umsetzung eines Themas in Form eines Projekts günstig ist:[147]

1. Jedem Projekt liegt ein einheitliches Ziel, nämlich der Versuch zur Lösung einer umfassenden Aufgabe zugrunde.
2. Im Projekt wird eine Verbindung von Theorie und Praxis angestrebt.
3. Jedes Projekt sollte unmittelbar zu einem Handeln der Projektteilnehmer führen.
4. Die Aufgabe des Projekts sollte möglichst in ihrer natürlichen Umgebung gelöst werden.
5. Die Teilnehmer des Projekts sollen eine möglichst große Selbständigkeit bei der Wahl des Projektthemas und der Planung, Durchführung und Analyse des Projektes besitzen.
6. Die Projektarbeit vollzieht sich immer in Gruppen.
7. Der Lehrer soll sich in die Projektgruppe integrieren. Die Entscheidungen in der Gruppe werden demokratisch getroffen, wobei dem Lehrer in bestimmten wichtigen Fragen ein Vetorecht zusteht.
8. Die Beurteilung der Leistungen eines Projektteilnehmers erfolgt weitgehend selbständig durch die Gruppe.
9. Ein Projekt zieht alle Wissenschaften heran, die zur Lösung der Projektaufgabe einen Beitrag leisten können. Ein Projekt ist also fächerübergreifend.

---

[143]Becker, Hans-Jürgen et al.: Fachdidaktik Chemie, Köln 1992, S. 277.

[144]Böhm, Winfried: Wörterbuch der Pädagogik, Stuttgart 1994, S. 168.

[145]Dewey, John et al.: Der Projekt-Plan: Grundlegung und Praxis, Weimar 1935, S. 85ff.

[146]Platte, Hans K. et al.: Das Projekt - Theorie, Methoden, Beispiele, Köln 1990, S. 11ff.

[147]Greine, W. D.: Projekt-Vorhaben, Düsseldorf 1980, S. 66.

4.2 Das Projekt in den Richtlinien

In der schulischen Praxis ist es Aufgabe des Lehrers, ein Projekt thematisch in den Rahmen der jeweils für sein Fach gültigen Richtlinien einzuordnen. Diese sind für alle Unterrichtsfächer der gymnasialen Oberstufe im Land Nordrhein-Westfalen gleich gegliedert: Lernziele, Lerninhalte, Lernorganisation, Lernerfolgsüberprüfung.[148]

Bei den Lernzielen findet sich das für das Projekt geforderte wieder: Beherrschung von Prinzipien und Formen selbständigen Arbeitens, die Bereitschaft und Fähigkeit, sich mit anderen zu verständigen und zusammenzuarbeiten.[149] Das Projektthema 'Radioaktivität' ist dem Thema 'Kernchemie' gleichzusetzten, das für einen Leistungskurs der Jahrgangsstufe 13 vorgesehen ist. Die diesem Thema zugeordneten Lerngegenstände Radioaktivität, Isotopie, Kernumwandlung und Strahlenschutz sollen dabei nicht nur rein fachwissenschaftlich sondern auch auf ihre gesellschaftliche Relevanz hin untersucht werden.[150] Im Bereich der Lernorganisation wird der projektorientierte Ansatz dadurch begründet, „daß die Schule den Schüler befähigen soll, sich in einer verwissenschaftlichten Welt zurechtzufinden."[151] Von einer gesellschaftlich relevanten Problemstellung ausgehend kann der Projektunterricht meistens fachübergreifend eingesetzt werden, wobei aber von überwiegend fachfremden Projekten abgesehen werden soll.[152] Zur Überprüfung des Lernerfolgs im Falle eines Projekts werden keine Aussagen gemacht.

In den Richtlinien Physik für die gymnasiale Oberstufe in Nordrhein-Westfalen sind im Lernbereich Atomistik unter Kernprozesse, -modelle und -energie (A6–A8) dieselben Lerngegenstände wie bei den Richtlinien Chemie genannt.[153] Diese, bis auf die jeweils mögliche physikalische bzw. chemische Schwerpunktsetzung, identischen Ausgangsthemen prädestinieren das Projekt 'Radioaktivität' für einen fachübergreifenden, physikochemischen Unterricht.

Natürlich kann der Gegenstand Radioaktivität auch im Rahmen einer Projektwoche oder einer Arbeitsgemeinschaft bearbeitet werden. Die mögliche Beteiligung von eher geisteswissenschaftlich orientierten Schülern kann dabei eine außerordentliche Bereicherung darstellen, indem auch beispielsweise historische, politische und ethische Gesichtspunkte der Radioaktivität und ihrer Folgen betrachtet werden. Bei meinen Überlegungen zu den Teilgruppenthemen (siehe 4.4) habe ich versucht, eben dieser möglichen Interessensvielfalt bei den am Projekt teilnehmenden Schülern Rechnung zu tragen.

---

[148] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: Richtlinien Chemie, Gymnasiale Oberstufe, Frechen 1996, S. 8ff.

[149] Ebd., S. 14ff.

[150] Ebd., S. 55f.

[151] Ebd., S. 80.

[152] Ebd.

[153] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: Richtlinien Physik, Gymnasiale Oberstufe, Frechen 1996, S. 49f.

4.3 Das Projekt in der Praxis

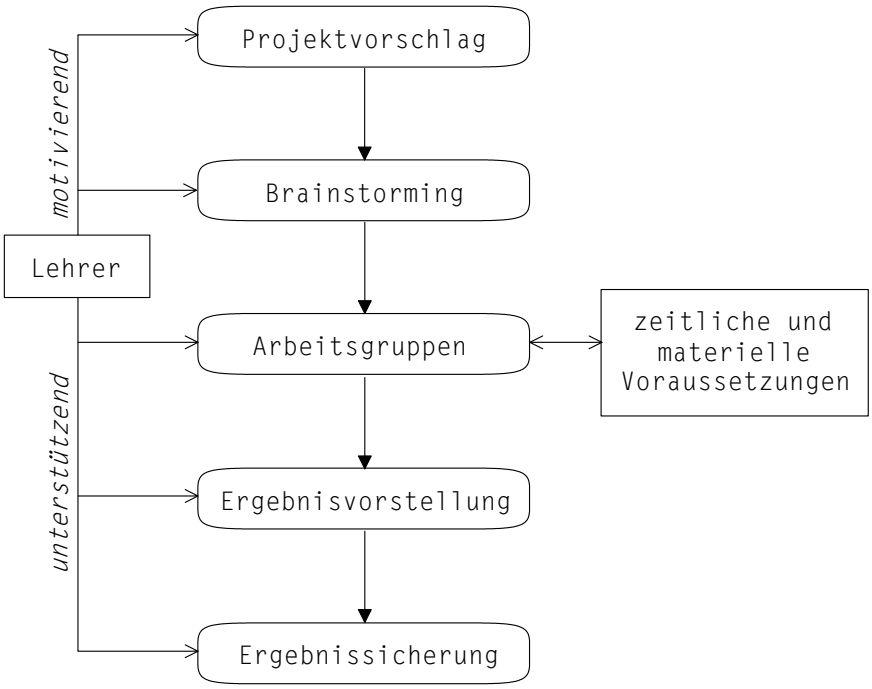

Abbildung 22: Schematische Darstellung des Projektverlaufs

4.3.1 Das Projekt wird geboren

Die erste Frage muß lauten: Wie kann es zu einem Projekt ‘Radioaktivität’ kommen? Der Idealfall ist, wenn das Projekt aus den Reihen der Schüler eines Chemieleistungskurses der Jahrgangsstufe 13 angeregt wird. Aber Wunder, bei denen Schülerinteressen und Richtlinienvorgaben in derart idealer Weise zusammenfallen, sind sicher äußerst selten. Realistischer ist ein Diskussionsbedarf der Schüler, wenn es wie zu Beginn dieses Jahres um den Transport von radioaktiven Abfällen in Castor-Behältern und deren spätere Lagerung geht. Wenn vielleicht auch nicht direkt von Schülerseite ausgehend kann sich hieraus dennoch ein Motiv für die Entwicklung des Projekts ‘Radioaktivität’ ergeben. Aber auch die Nachbarschaft zu einem Kernkraftwerk, Zwischen- oder (geplanten) Endlager ist ein möglicher Ausgangspunkt.

4.3.2 Das Projekt entwickelt sich

Vor Beginn des Projekts ist zunächst einmal die Ausgangssituation durch den Lehrer zu ermitteln: Die Zusammensetzung der Projektgruppe (zum Beispiel Beteiligung des Physikkurses), die räumlichen Möglichkeiten, die technische Ausstattung, die vorhandene Literatur, die finanziellen Grundlagen und so weiter. Nach dieser Ist-Beschreibung und ihrer Analyse sind die nächsten Schritte möglich.[154]

[154]Platte, a.a.O., S. 19f.

Beim ersten Zusammentreffen aller Projektbeteiligten muß geklärt werden, welche Vorstellungen jeder Beteiligte zum Projekt ‘Radioaktivität’ hat. In Form eines Brainstormings ([engl.]: Gehirnsturm) sollen alle Anwesenden ihre Ideen vorbringen. Sinnvoll ist dabei die Sammlung dieser Vorschläge an der Tafel oder durch jeden selbst auf Zetteln. Bereits bei der kurzen Vorstellung der jeweiligen Idee(n) können ähnliche Überlegungen zur Arbeitsgruppenbildung führen. Bei der gemeinsamen Ordnung der Stichworte kristallisieren sich dann weitere Teilgruppen heraus. Noch unentschlossene Schüler können sich den gebildeten Teilgruppen anschließen oder durch weitere Themenvorschläge des Lehrers neue Teilgruppen formieren. Im letzteren Fall sollte durch den Lehrer in gar keinem Fall Zwang ausgeübt werden („Da ihr euch nicht entscheiden könnt, bekommt ihr halt das Thema ‘Theoretische Grundlagen der Radioaktivität’, das muß sowieso noch jemand übernehmen...”). Vielmehr sollte der Lehrer in einem solchen Fall das unbeliebte Thema, von dessen Schlüsselfunktion er überzeugt ist, selber bearbeiten und vorstellen, bevor es durch unmotivierte Schüler schlecht und unzureichend dargestellt wird.

Dem Lehrer fällt in dieser Phase des Projekts die durchaus schwierige Rolle eines Moderators zu. Auf der einen Seite kann er das Wissen um die größeren Zusammenhänge in der Kernchemie nicht außer Acht lassen, auf der anderen Seite muß er eine zu starke Steuerung der Projektplanung seiner Seite vermeiden, um den Teilnehmern eine möglichst große Selbständigkeit zu gewähren.

Dem Tun der entstandenen Teilgruppen muß im nächsten Abschnitt des Projekts ein planvolles und zielgerichtetes Handeln zugrundeliegen. Dazu soll jede Gruppe zunächst ihr Ziel klar formulieren. Erst wenn es möglich ist, das Ziel mit wenigen Worten zu umreißen, kann der Lösungsweg gesucht werden.

Die Gruppe entwickelt gemeinsam Ideen zur Aufgabenlösung und verteilt die sich daraus ergebenden Aufträge arbeitsteilig. Die Planung und Organisation muß dabei immer unter dem Gesichtspunkt der materiellen und zeitlichen Machbarkeit stehen. Der Lehrer kann und muß sein begründetes Veto einlegen, wenn ihm die Überlegungen nur schlecht oder undurchführbar erscheinen.

Während der Verwirklichung können Zwischenergebnisse und danach muß das Endergebnis durch die Gruppe kontrolliert werden. Das anfangs formulierte Ziel wird mit dem erhaltenen Ergebnis verglichen und beurteilt, ob das ins Auge Gefaßte erreicht worden ist oder Verbesserungen notwendig sind.

4.3.3 Das Projekt wird vollendet

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppen werden bei einer Zusammenkunft aller Projektteilnehmer vorgestellt, so daß jedem auch die Erfolge der anderen Teilgruppen bekannt werden. Über diese erste Darbietung hinaus sollten eine oder mehrere Formen der Dokumentation gewählt werden. Durch ein Projektheft erhalten Teilnehmer wie Außenstehende einen Überblick über das Geleistete. Eine breite Öffentlichkeit kann durch Berichte in der Schülerzeitung oder Lokalpresse, mit einer Ausstellung oder einer Videofilmproduktion erreicht werden. Dem jeweiligen Engagement der Beteiligten - Schüler wie

Lehrer - entsprechend kann das Projekt entweder lediglich eine andere Art der Wissensvermittlung sein oder aber ein für alle nützlicher Anstoß zu neuem Tun und Denken.

4.4 Die Teilgruppen

Auf der nächsten Seite ist eine Übersicht mit möglichen Teilgruppenthemen gegeben. Fünf, in Frageform gestellte Themen bilden eine Art „roten Faden"; acht weitere ergänzen diese zentralen Abschnitte des Projekts 'Radioaktivität'.

Während die Kernfragen grundlegend sind, können die Ergänzungen je nach Setzung des Projektschwerpunktes verändert oder ausgetauscht werden. Die Übersicht kann und soll nur exemplarisch sein. Auch bei den Ausführungen zu den einzelnen Teilgruppenthemen wird eine beispielhafte Darstellung angestrebt.

4.4.1 Was ist Radioaktivität?

Diese Frage ist grundlegend und Ausgangspunkt des Projekts. Um über Radioaktivität diskutieren zu können, müssen die verschiedenen radioaktiven Zerfallsarten (2.2) und das Zerfallsgesetz (2.5) bekannt sein. Auch die Nachweismethoden für Radioaktivität (2.3) sowie deren Maßeinheiten (2.4) sind in diesem Zusammenhang anzusprechen.

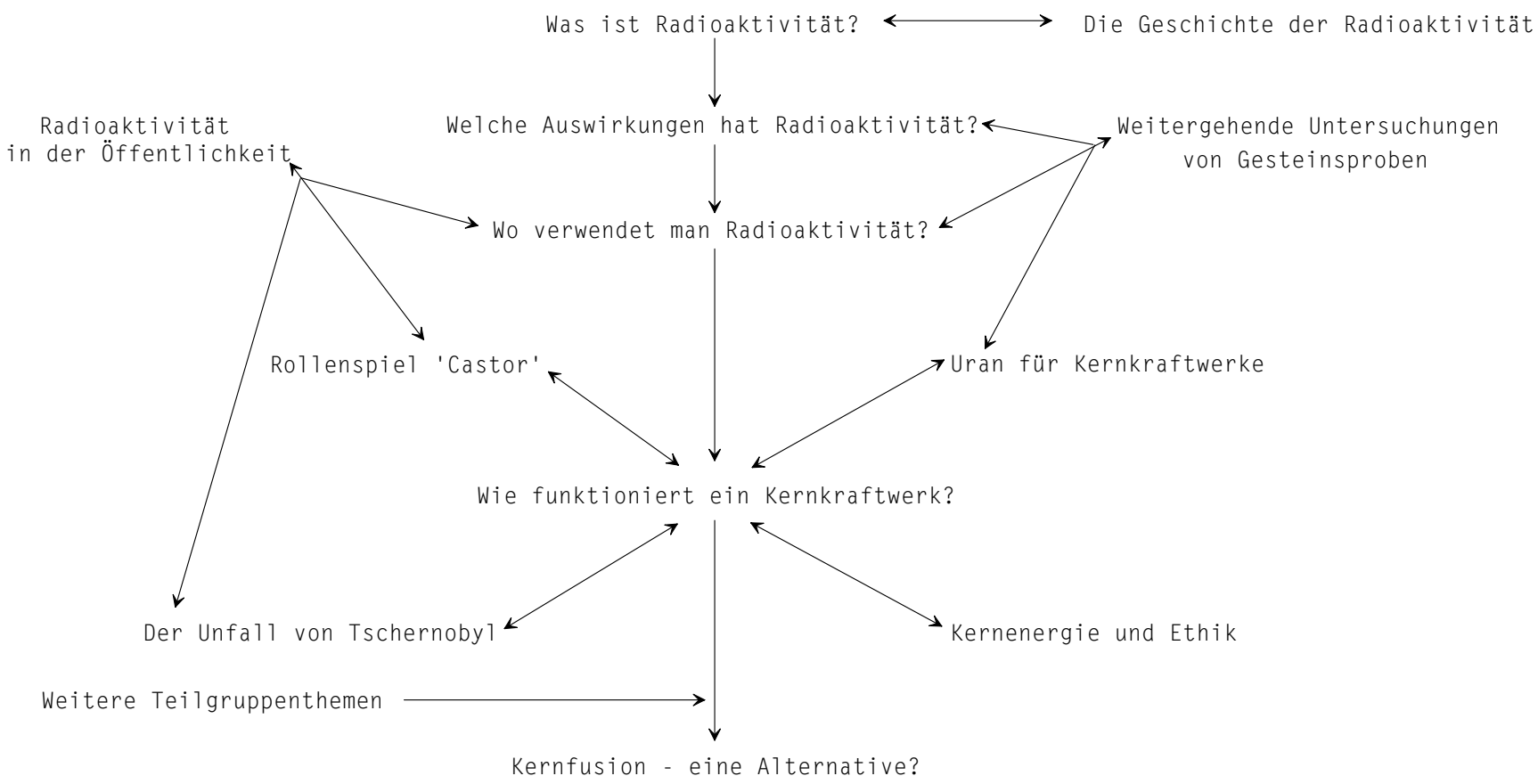

Abbildung 23: Übersicht über mögliche Teilgruppenthemen und die sich daraus ergebenden Verknüpfungspunkte

Als Informationsquellen können die Schüler dieser Teilgruppe in erster Linie ihr Schulbuch und die im Vorwort erwähnten Hefte sowie (Chemie-)Lexika heranziehen. Meist werden dort neben der allgemeinen Definition Beispiele zur Erläuterung angegeben. Auch Abbildungen und Grafiken können die Sachverhalte illustrieren und sind für die Projektergebnissammlung geeignet.

Nachfolgend werden zwei Versuche und eine Computersimulation vorgestellt, die im Rahmen der 'Zweiten Strahlenschutzverordnung' durchgeführt werden können.

4.4.1.1 Zweite Strahlenschutzverordnung

Im Bundesgesetzblatt vom 30. Juni 1989 wurde die Neufassung der Strahlenschutzverordnung bekanntgemacht. Wollen Schüler nuklearchemische Experimente durchführen, muß der Lehrer §56(3) berücksichtigen:

> „Es ist dafür zu sorgen, daß Schüler bei der Verwendung von Vorrichtungen oder Neutronenquellen, in die radioaktive Stoffe eingefügt sind, nur in Anwesenheit und unter der Aufsicht eines Lehrers, der als Strahlenschutzbeauftragter bestellt ist, mitwirken."

Der eigentliche Experimentator ist somit der Lehrer.

Eine Ausnahme bilden genehmigungs- und anzeigefreie Strahlenquellen wie Kaliumchlorid, Paranußasche, Ziegelsteine, natürliche Gesteine oder ein in Folie eingeschweißter Glühstrumpf. In diesen Fällen dürfen auch Schüler das Experiment durchführen.

4.4.1.2 Versuch 1: Strahlungsnachweis bei verschiedenen Materialien

Zum Aufspüren und Messen von Radioaktivität eignet sich insbesondere ein tragbarer Strahlungsdetektor. Das bei (fast) allen Versuchen verwendete Proportionalzählrohr 'MiniMonitor CX-3 I251' reagiert auf β-, γ- und Neutronenstrahlung, die jedoch nicht unterschieden werden können. Die Anzeige der Detektion einer der genannten Strahlenarten erfolgt optisch durch ein rotes Lichtsignal, akustisch durch einen kurzen Piepton und wird mittels eines elektrischen Impulses zum digitalen Zählgerät 'DigiCounter' übertragen. Dieser Zähler kann auf eine sowie zehn Minuten automatische Meßzeit eingestellt werden; andere Meßzeiten müssen von Hand gestoppt werden (Abbildung siehe nächste Seite).

Durchführung:

Mit Hilfe des tragbaren Strahlungsdetektors können die Schüler die Umwelt auf Radioaktivität hin untersuchen. Deutliche Anzeichen für radioaktive Zerfälle werden sie im Chemielabor, in Gesteinssammlungen und bei bestimmten Gegenständen des täglichen Gebrauchs finden.

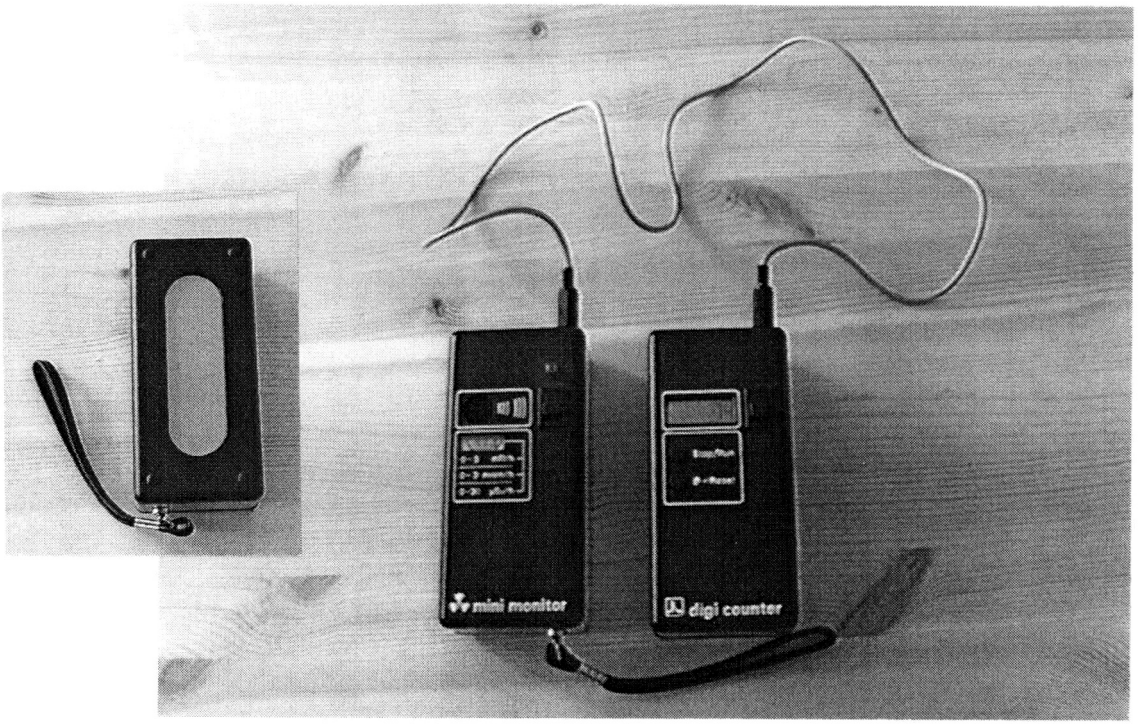

Abbildung 24: Detektorrück- und vorderansicht, Zählgerät

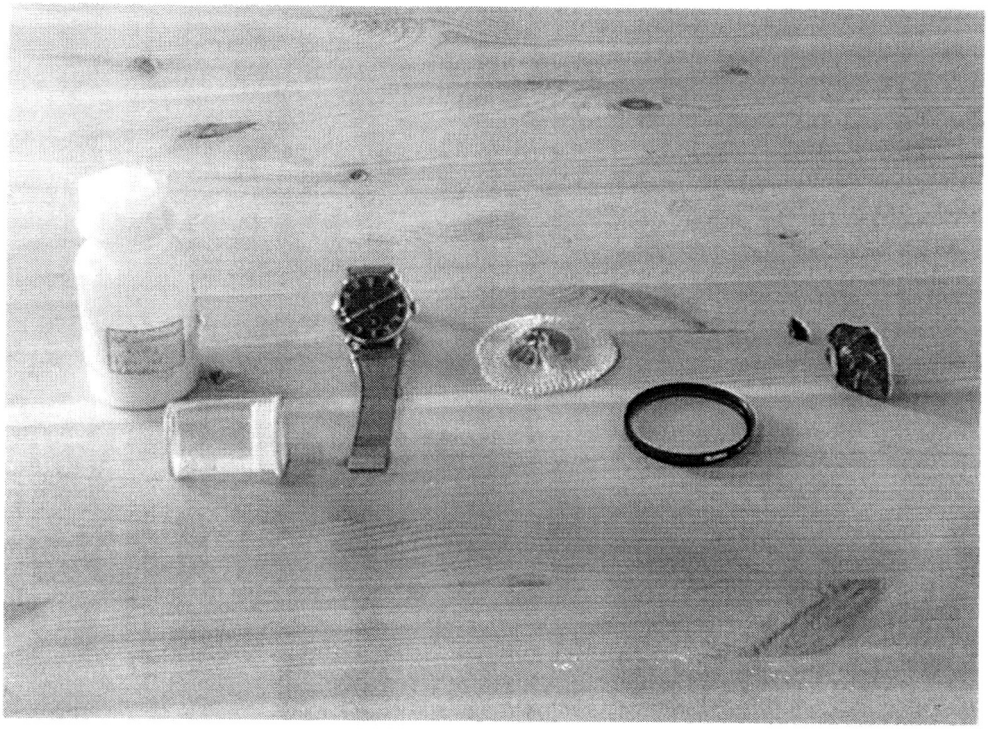

Abbildung 25: Sammlung verschiedener radioaktiver Substanzen und Gegenstände (von links: Kaliumcarbonat, Uranylacetat, 40 Jahre alte Armbanduhr, Glühstrumpf, UV-Filter, Gestein aus Joachimsthal und Norwegen)

Die Messung erfolgt nach möglichst großer Annäherung des Meßgerätes an die Probe (Da bei dem genannten Gerät das Meßfenster etwa 0,2 Zentimeter im Geräteboden eingelassen ist, kann das Gehäuse dabei zur Messung auf das jeweilige Objekt gelegt werden). Chemikalien sollten in einer flachen Petrischale gemessen werden. Darüberhinaus ist es bei Chemikalien und Gesteinen notwendig, das Gewicht der gemessenen Probe zu ermitteln, um anschließend die spezifische Aktivität in Becquerel pro Kilogramm angeben zu können.

Beobachtung:

Es ergaben sich folgende, um die jeweilige Grundstrahlung (Nullrate) korregierte Werte:

Chemikalie bzw. Gestein	*Masse [kg]*	*Impulse in 10 Minuten*	*Aktivität [Bq]*	*spez. Aktivität [Bq/kg]*
Kaliumcarbonat	0,01	3.116	5,19	519
Uranylacetat	0,001	112.107	186,85	186.850
Gestein (Norwegen)	0,05	8.156	13,59	272
Gestein (vermutl. Joachimsthal)	0,002	131.851	219,75	109.875
Bimsstein (unbekannte Herkunft)	0,03	499	0,83	28
Sandstein (Wyoming, USA)	0,07	245	0,41	6
Pechblende (Eldorado, Kanada)	0,024	298.790	497,98	20.749
Sklodarskit (Shinkolobwe, Zaire)	0,034	498.292	830,49	24.426

Abbildung 26: Tabelle mit Meßwerten verschiedener Chemikalien und Gesteine

Alltagsgegenstand	*Zerfälle in 10 Minuten*	*Aktivität [Bq]*
Armbanduhr (40 Jahre alt)	46.775	77,96
UV-Filter (Fotokamera)	304	0,51
Glühstrumpf (Campingzubehör)	41.548	69,25

Abbildung 27: Tabelle mit Meßwerten von Alltagsgegenständen

Deutung:

Es befinden sich Radionuklide in der Biosphäre. Diese können natürlichen Ursprungs sein und in unterschiedlichen Konzentrationen in Gesteinen vorkommen. Aber auch Chemikalien sowie Gegenstände des täglichen Gebrauchs strahlen; sie sind Quellen von Radioaktivität, die durch Menschen bedingt sind.

4.4.1.3 Versuch 2: Chemische Reaktion mit einem radioaktiven Stoff[155]

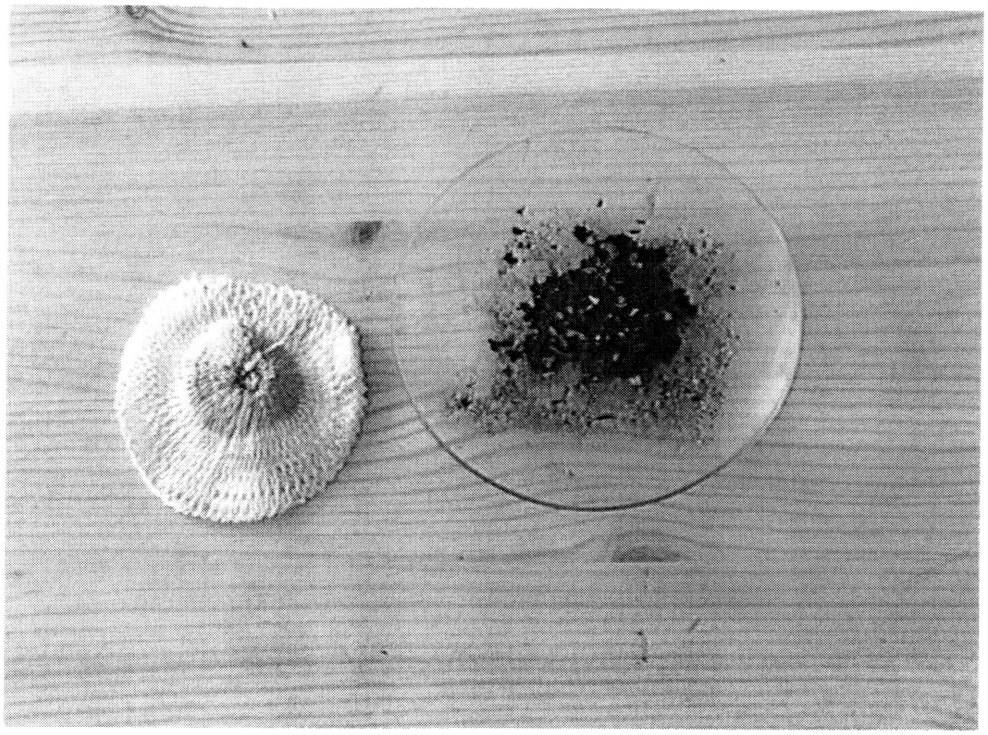

Abbildung 28: Unbehandelter Glühstrumpf und Glühstrumpfasche

Durchführung:

Ein Beutel mit Glühstrumpf wird über einer Plastikwanne im Abzug geöffnet, mit einer Pinzette herausgeholt und die Zerfallszahl pro Minute gemessen. Anschließend wird der Glühstrumpf in einem Metalltiegel mit einem Bunsenbrenner 20 bis 30 Minuten kräftig erhitzt. Die Aktivität der abgekühlten Asche wird erneut ermittelt.

Beobachtung:

Durch die Veraschung entsteht eine kleine Menge grauen Pulvers.

	Nettoimpulsrate in 1 Minute	*Aktivität [Bq]*
Glühstrumpf	4.143	69,05
Asche	4.218	70,3

Abbildung 29: Tabelle mit Meßwerten vor und nach der Veraschung

[155]Volkmer, Martin: Experimente zur Radioaktivität, Hamburg 1992, S. 62f.

Deutung:

Der Glühstrumpf besteht aus einem Baumwollgewebe, das mit etwa 600 mg Thoriumnitrat getränkt ist. Beim Erhitzen verbrennt das Gewebe, während das Thoriumnitrat zu Thoriumoxid reagiert:

$$Th(NO_3)_4 \rightarrow ThO_2 + 4\,NO_2 + O_2$$

Radioaktivität ist eine Atomeigenschaft und kann durch eine chemische Reaktion nicht verändert werden (im Rahmen schulischer Meßmethoden richtige Aussage, vergleiche 2.5).

Die geringfügige Zunahme der Aktivität ist darauf zurückzuführen, daß das Thoriumdioxid kompakter als das Thoriumnitrat vor dem Detektorfenster angeordnet war, und so die Nachweiswahrscheinlichkeit eines radioaktiven Zerfalls ein wenig erhöht wurde.

4.4.1.4 Versuch 3: Computersimulation des radioaktiven Zerfalls[156]

Bei einer öffentlichen Projektpräsentation ist der Umgang mit radioaktiven Stoffen schwierig, wenn nicht ausgeschlossen. Daher sind Simulationen eine Möglichkeit, Radioaktivität dem Betrachter näherzubringen.

Der radioaktive Zerfall eignet sich hervorragend für eine Umsetzung am Computer. Eine festgelegte Anzahl „Computeratome" (zum Beispiel 1000) zerfallen auf dem Bildschirm aus der Darstellung mittels Doppelkreuz (#) zu einem Punkt. Da die Zerfallswahrscheinlichkeit für jedes Atom von vorne herein gleich groß ist, können durch Einsatz eines Zufallsgenerators gleichverteilte Zufallszahlen erzeugt werden.

Zu Beginn wird mit jeder neuen Zufallszahl sehr wahrscheinlich ein Computeratom getroffen, das noch nicht zerfallen ist, woraufhin es sich umwandelt. Sind aber schon einige Atome zerfallen, kommt es immer öfter vor, daß bereits umgewandelte Atome getroffen werden. Die Zerfallsrate nimmt also mit der Zahl der noch vorhandenen Atome ab und ist dabei proportional zur Anzahl der nicht zerfallenen Atome, was genau die Verhältnisse bei Radionukliden wiederspiegelt.

Es läßt sich weiterhin die Anzahl der Zufallszahlen τ^* berechnen, die benötigt werden, um die Hälfte der Computeratome zerfallen zu lassen. Dabei muß für die Zufallskonstante λ im Zeitgesetz für den radioaktiven Zerfall (vergleiche 2.5) die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Zufallszahl eingesetzt werden. Da es sich aber um gleichverteilte Zufallszahlen handelt, ergibt sich der Kehrwert der gewählten Atomzahl (hier: 1/1000):

$$\tau^* = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{\frac{1}{1000}} = 1000 \cdot \ln 2 \approx 693$$

---

[156] Lieckfeld, Gerolf et al.: Radioaktivität auf dem Computer, in: Praxis der Naturwissenschaften Chemie, Heft 1/35, Köln 1986, S. 32ff.

Nach durchschnittlich 693 erzeugten Zufallszahlen sind 500 Computeratome zerfallen. τ^* ist unserem Modell die Halbwertszeit. Durch Programmierung von „Stoppern" kann die Rechengeschwindigkeit derart manipuliert werden, daß eine beliebige Halbwertszeit durch den Programmbenutzer eingegeben und in gerade diesem Zeitraum 693 Zufallszahlen erzeugt werden können. (Programm siehe Anhang L).

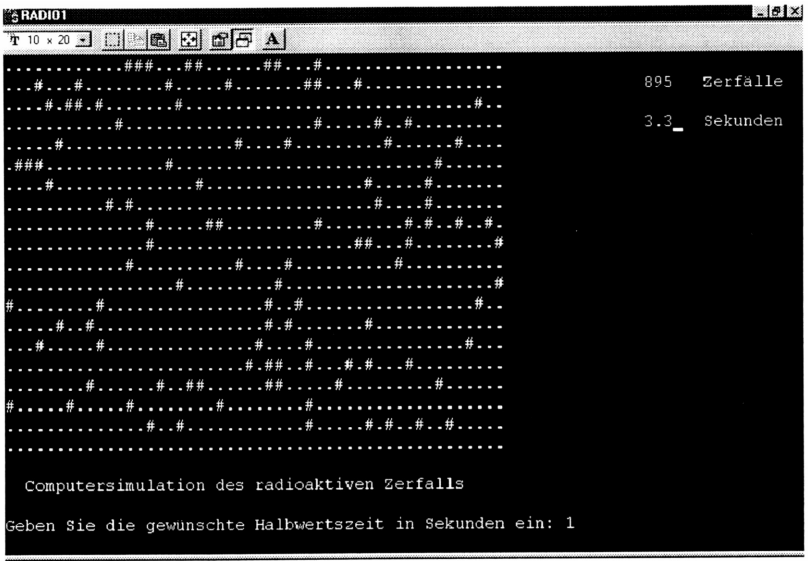

Abbildung 30: Bildschirmausdruck (# radioaktives Atom, · zerfallenes Atom)

Auf dem Bildschirmausdruck ist die Situation bei einer Halbwertszeit von einer Sekunde nach 3,3 Sekunden Zerfallszeit zu sehen: 895 Atome sind zerfallen.

4.4.2 Welche Auswirkungen hat Radioaktivität?

Zur Beantwortung dieser Frage bietet sich neben der Literatur- auch die Internet-Recherche an. So hat die Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz auf 18 Seiten eine ausführliche Einführung in Strahlenwirkung und -schutz erstellt (http://www.hsk.psi.ch/eks.html). Aber auch der jährliche Strahlenbericht des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ist im Internet zu finden. Vor dem Hintergrund der wachsenden Zahl von weiterführenden Schulen, die in Nordrhein-Westfalen „ans Netz gehen", und der sich explosionsartig vergrößernden Informationsvielfalt im weltumspannenden Datennetz hat diese Suchmethode mit Sicherheit Zukunft.

Die Grafik 'Einteilung der Strahlenschäden' (vergleiche Abbildung 21, 3.8) kann Ausgangspunkt für eine mehr biologische Themenbearbeitung sein. Die drei folgenden Versuche beschäftigen sich in diesem Zusammenhang damit, wie man sich vor Bestrahlung von außen und innen schützen kann.

4.4.2.1 Versuch 4: Strahlungsnachweis bei Paranußasche[157]

In der Biosphäre sind natürliche Radionuklide wie Kalium-40, Kohlenstoff-14 und Radium-226 vorhanden. Kalium beispielsweise gehört zu den physiologisch bedeutsamen Elementen, so daß bei der Aufnahme durch lebende Organismen auch das radioaktive Isotop Kalium-40 in den Nahrungsmittelkreislauf kommt.

Paranüsse weisen eine außergewöhnlich hohe spezifische Aktivität auf, die im Schulexperiment nachgewiesen werden kann.

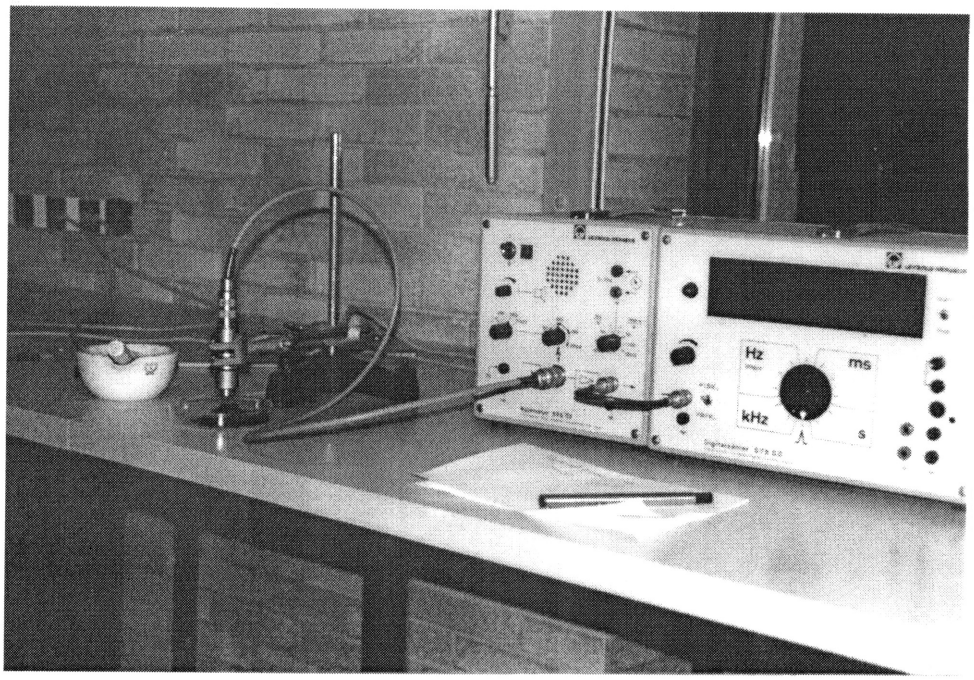

Abbildung 31: Radioaktive Messung von Paranußasche mit stationärem Geiger-Müller-Zähler

Durchführung:

Etwa zehn Paranüsse werden in einer Porzellanschale mit einem Bunsenbrenner verascht. Die Asche wird in einem Mörser zu einem feinen Pulver verrieben und anschließend in einer Petrischale angehäufelt. Das Geiger-Müller-Zählrohr hat ein hauchdünnes Fenster, das so nahe wie möglich an den Aschehaufen angenähert werden muß, ohne diesen zu berühren.

Beobachtung:

Sechs Gramm Paranußasche ergaben folgende Meßwerte:

[157]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 51f.

	Impulse in 19 Stunden	*Aktivität [Bq]*	*spezifische Aktivität [Bq/kg]*
Nullrate	11.612	0,17	---
Paranußasche (brutto)	22.884	0,33	---
Paranußasche (netto)	11.272	0,16	27,47

Abbildung 32: Tabelle mit Meßwerten zum Versuch mit Paranußasche

Deutung:

Der in Guayana und Brasilien beheimatete Paranußbaum weist eine Besonderheit auf: Er nimmt über seine Wurzeln überdurchschnittlich viel Barium auf und speichert es in den Nüssen. Da Barium und Radium chemisch einander ähnlich sind, gelangt dadurch verstärkt Radium-226 in die Nüsse, wodurch ihr Radiumgehalt bis zu 1000 mal höher sein kann als üblich.

Radium-226 und seine Zerfallsprodukte gehören zur Uran-Radium-Reihe und sind α-Strahler, zum Beispiel:

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

$$^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

Deshalb muß bei diesem Versuch ein Zählrohr mit besonders dünnem Fenster verwendet werden, damit die α-Strahlen die Folie durchdringen können.

4.4.2.2 Versuch 5: Schutzmaßnahmen vor äußerer Strahleneinwirkung[158]

α-Strahlen lassen sich bereits durch ein Blatt Papier vollständig abschirmen und werden bei Detektoren mit dickem Plastikfenster nicht durchgelassen. Bei β-Strahlen reichen zur Abschirmung vier Millimeter Kunststoff, Aluminium oder andere Metalle aus.

Bei diesem Versuch soll die Wirksamkeit verschiedener Materialien zum Schutz vor γ-Strahlen herausgefunden werden.

Durchführung:

Eine Strahlenquelle (zum Beispiel ein radioaktives Gestein) wird in fünf Zentimeter Abstand vom Detektor positioniert und die Impulszahl pro Minute gemessen. Verschiedene Materialien mit jeweils einem Zentimeter Dicke (Blatt Papier dreimal falten, Plastik- und Aluminiumfolie sechsmal falten, um die geforderte Dicke zu erhalten) werden zwischen Strahler und Zählrohr gebracht und die jeweilige Zählrate ermittelt. Zur Berechnung der Nettoimpulsrate wird nach Entfernung des Strahlers die stets vorhandene Untergrundstrahlung gemessen.

[158]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 83ff.

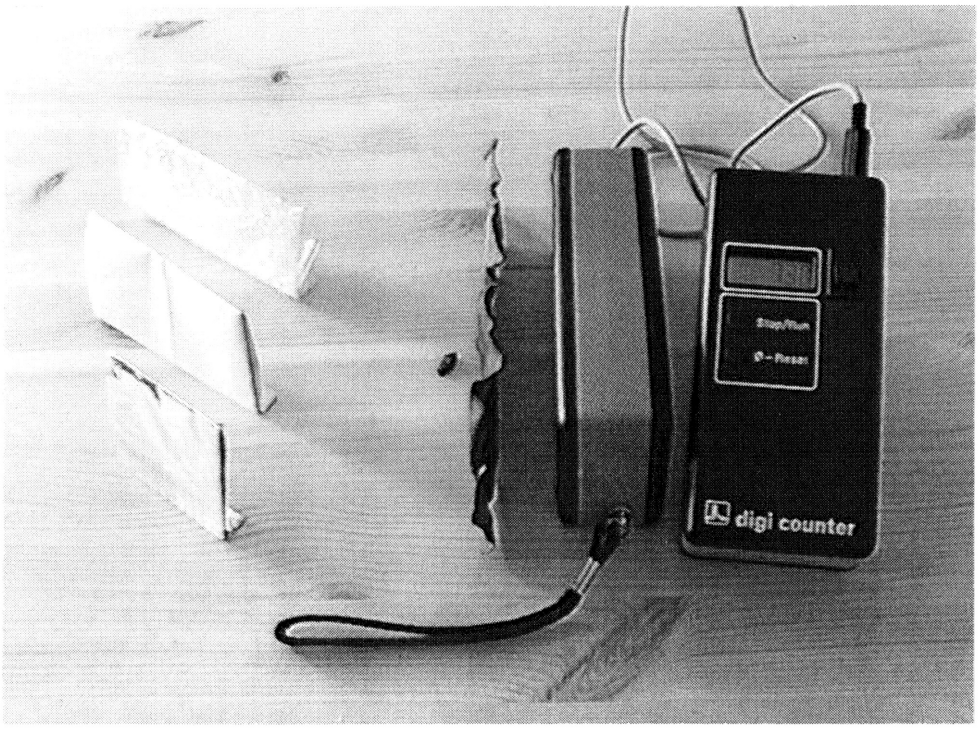

Abbildung 33: Schutz vor γ-Strahlen (von oben: Plastik, Papier, Aluminium sowie Blei)

Beobachtung:

Bei einer Nullrate von 60 Impulsen pro Minute ergeben sich die folgenden Meßwerte:

Abschirmmaterial	*Nettoimpulsrate in 1 Minute*	*Aktivität [Bq]*
-	1.589	26,48
Papier	1.336	22,27
Plastik	1.267	21,12
Aluminium	995	16,58
Blei	730	12,17

Abbildung 34: Tabelle mit Meßwerten bei verschiedenen Abschirmmaterialien

Deutung:

Während Papier und Plastik die γ-Strahlung nur in geringem Maße reduzieren können, schirmen die Metalle Aluminium und Blei bei gleicher Materialdicke wesentlich besser ab. Es liegt der Schluß nahe: Je höher die Dichte des Materials, desto besser die Strahlenabschirmung. Diese richtige Überlegung wird durch die folgende Tabelle untermauert:[159]

[159]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 90.

Material	Papier	Plastik*	Aluminium	Blei
Dichte [g/cm³]	0,8	1,18	2,7	11,34

*Abbildung 35: Tabelle mit Dichten verschiedener Materialien (*Plexiglas)*

4.4.2.3 Versuch 6: Das Abstandsquadratgesetz für ionisierende Strahlen[160]

Eine weitere Möglichkeit, sich vor ionisierender Strahlung zu schützen, ist die Einhaltung eines möglichst großen Abstands zur Strahlenquelle.

Im folgenden Versuch soll herausgefunden werden, in welchem Maße sich die Strahlungsintensität verringert, wenn der Abstand zum Strahler vergrößert wird.

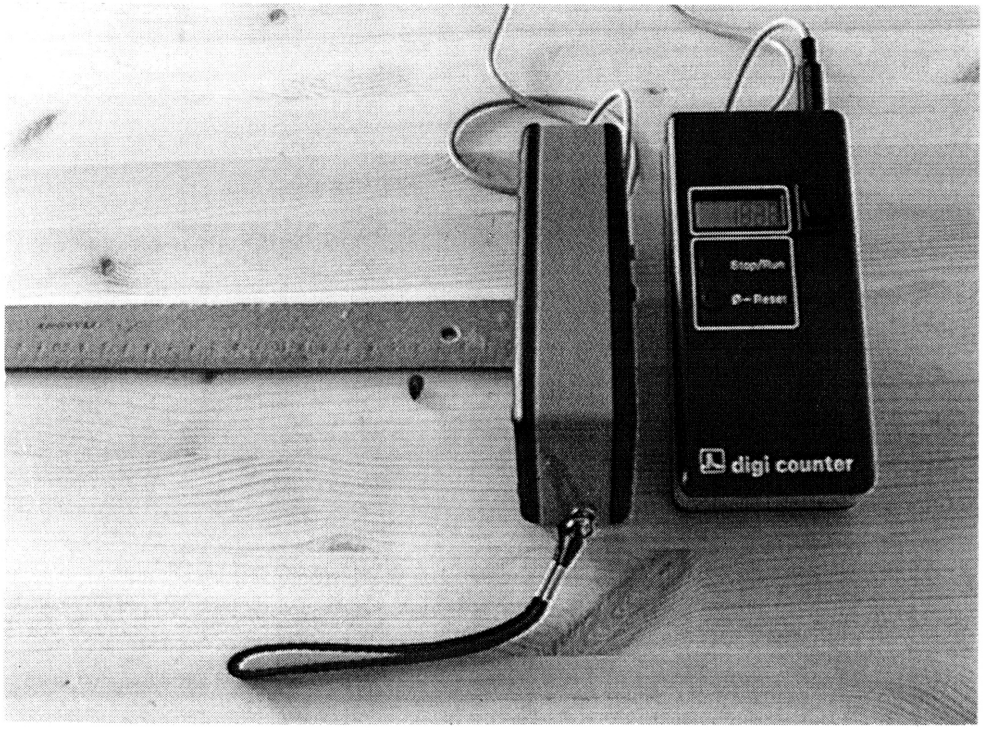

Abbildung 36: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Abstandsquadratgesetzes (nicht zu sehen: die das Zählrohrfenster verkleinernde Abschirmung)

Durchführung:

Die Strahlungsquelle (zum Beispiel ein radioaktives Gestein) wird in Zentimeterschritten beispielsweise entlang eines Lineals vom Detektor wegbewegt und jedesmal die neue Impulsrate gemessen. Die Nullrate wird ebenfalls ermittelt.

[160]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 87f.

Bei Detektoren mit großem Zählrohrfenster muß dieses durch eine Aluminium- oder Bleiabschirmung auf maximal ein Quadratzentimeter verkleinert werden, um eine Punkt- und keine Flächenmessung zu erhalten).

Beobachtung:

Nach Abzug der Nullrate von 62 Impulsen pro Minute ergaben sich folgende Nettoimpulsraten:

Abstand [cm]	*Nettoimpulsrate in 1 Minute*	*Abstand [cm]*	*Nettoimpulsrate in 1 Minute*
3	2.114	8	308
4	1.314	9	236
5	816	10	204
6	541	12	139
7	416	15	81

Abbildung 37: Tabelle mit Meßwerten zur Bestimmung des Abstandsquadratgesetzes

Deutung:

Durch Eintragung der obigen Wertepaare in ein Diagramm erhält man:

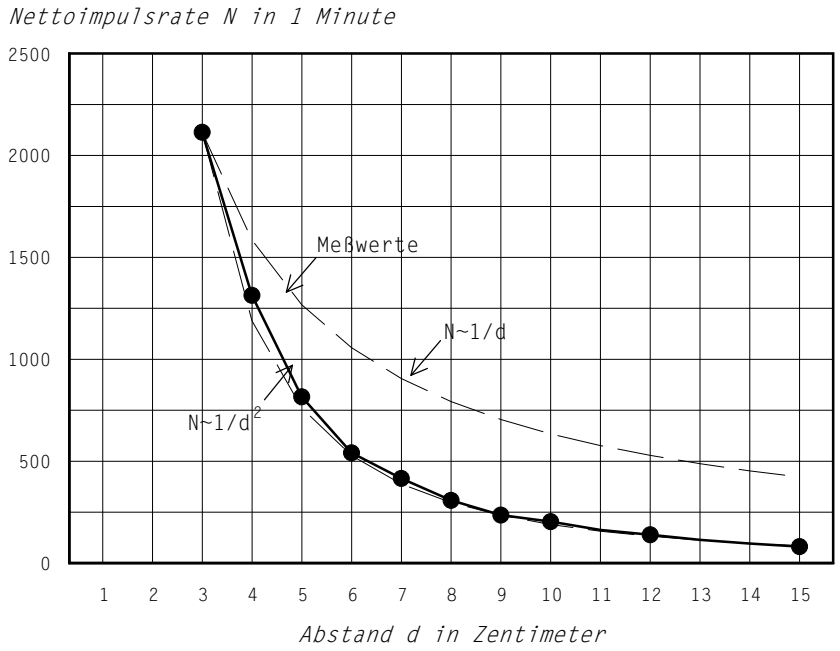

Abbildung 38: Grafische Auftragung der Nettoimpulsrate gegen den Abstand

Mit Hilfe der Auftragung der Wertepaare sowie der Funktionen N~1/d und N~1/d^2 wird das Abstandsquadratgesetz offenbar: Die Intensität einer Strahlung ist dem Quadrat des Abstands umgekehrt proportional.

4.4.3 Wo verwendet man Radioaktivität?

Zu diesem Teilthema zählen die verschiedenen Arten der Altersbestimmung von anorganischen und organischen Proben (2.8). In diesem Zusammenhang kann ein geschichtlicher Schwerpunkt gesetzt werden, indem die in der Archäologie verwendeten Verfahren zur Altersbestimmung näher beleuchtet werden. Als Literatur empfehlen sich Geschichts- und Chemieschulbücher gleichermaßen.

Weiterhin gehört die Anwendung von Radionukliden in Chemie, Medizin und Technik dazu (3.3). Eine sehr gute Übersicht gibt das Buch von Werner Stolz: Radioaktivität - Grundlagen, Messung, Anwendung. Die Verwendung von Radionukliden in der Medizin ist aus biologischer Sicht interessant. In Abhängigkeit vom Schulort kann man einen Besuch oder eine Videoproduktion eines PET-Zentrums ins Auge fassen (3.3.1.2). Derzeit entsteht ein (zweiter) solcher Komplex in Bonn, wobei sowohl die Positronen-Emissions-Tomographie selber als auch das angeschlossene Zyklotron von Interesse wären (siehe Anhang M).

Ein Versuch, der mehr physikalisch-technische Aspekte der Radionuklidanwendung beleuchtet, ist der Nachweis von Hohlräumen in Metallkörpern.

4.4.3.1 Archäologische Altersbestimmungen[161]

In der Archäologie gibt es fünf wichtige Methoden der Altersbestimmung:

Bei der Stratigraphie beobachtet man die nacheinander abgelagerten Erdschichten. Dabei ist einsichtig, daß die unteren Schichten durchweg die älteren sein müssen. An wiederholt besiedelten Stellen kann man so die Funde zeitlich-abhängig zueinander einordnen. Vergleichbare Funde anderorts können daraufhin in das entwickelte Schema integriert werden.

Bei der Typologie werden Objekte auf Form und Stil analysiert. Beispielsweise sind Keramiken die wichtigsten Datierungshilfen für alle Perioden seit der Jungsteinzeit. Sie sind außerordentlich dauerhaft und in den Jahrtausenden besonders stark dem sich wandelnden Zeitgeschmack unterworfen. Da sich jede „Mode" nur schrittweise verändert und sich im Neuen immer auch das Alte widerspiegelt, kann man so durch Vergleiche Entwicklungsreihen aufstellen, in die neue Einzelfunde eingeordnet werden können.

Bei der Dendrochronologie (dendron [griechisch]: Baum) betrachtet man die Schnittfläche eines Baumes. Diese sehr sichere Methode der Altersbestimmung basiert auf der Beobachtung, daß man aus den Jahresringen eines Baumes nicht nur sein Alter ablesen sondern auch an ihren unterschiedlichen Breiten erkennen kann, ob in dem jeweiligen Jahr ein feuchter oder ein trockener Sommer

[161]Walzik, Günther et al.: Der Mensch und seine Welt 1, Bonn 1976, S. 77f.

beziehungsweise ein milder oder ein strenger Winter geherrscht hat. In eine grafische Darstellung gebracht ergibt sich eine für eine bestimmte Region charakteristische Kurve. So ließ sich beispielsweise für die deutschen Eichen durch Analyse vieler verschiedener Funde ein Jahresringkalender bis zum Jahr 530 vor Christus aufstellen. Die absolute Datierung neuer Funde erfolgt durch Einpassung der Probenkurve in die Standardkurve.

Mit der Pollenanlyse kommt man zu einer relativen Chronologie. Die in sumpfig-moorigen Bodenschichten konservierten Pollen geben Auskunft über Vorkommen und Anzahl der in jenem Jahr gewachsenen Bäume, Sträucher und Gräser. Auf diese Weise entsteht ein Bild von der Vegetationsentwicklung vom späten Eiszeitalter bis in die Gegenwart. Werden beispielsweise in bestimmten Schichten Siedlungsreste gefunden, vermag man mit der Pollenanalyse näheres über die Umwelt und die Lebensumstände der Menschen dieser Zeit auszusagen.

Bei der Radiocarbonmethode (vergleiche C-14-Methode, 2.8.3) können die bei Ausgrabungen gefundenen organischen Reste sehr genau, absolut datiert werden. Die Grundlagen der C-14-Methode können, wie im Anhang N[162] gezeigt, durch die Schüler in Form eines Plakats aufgearbeitet werden.

4.4.3.2 Versuch 7: Nachweis von Hohlräumen in einem Metallkörper[163]

Schweißnähte müssen hohen Druck- und Zugbeanspruchungen standhalten. Um das zu gewährleisten, dürfen sie keine Hohlräume (Lunker) oder Risse enthalten. Schweißnähte besonders hochwertiger Anlagen (zum Beispiel Rohrleitungen in Industrieanlagen) werden deshalb mit ionisierenden Strahlen überprüft.

Durchführung:

Die auf der nächsten Seite zu sehenden Schichten des Schweißnahtmodells werden zusammengeklebt. Das als Strahler verwendete Gestein, der Hohlraum des Modells und das Detektorfenster werden so angeordnet, daß sie sich auf gleicher Höhe befinden. Durch Verschieben des in eine Halterung eingespannten Modells kann eine horizontal verlaufende Schweißnahtprüfung simuliert werden.

---

[162]Bothur, Armin: Archäologische Altersbestimmungen, für: Grundlagen der Museumspädagogik, Prof. Dr. Walzik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Wintersemester 1994/95.

[163]Volkmer, Experimente, a.a.O., S. 95f.

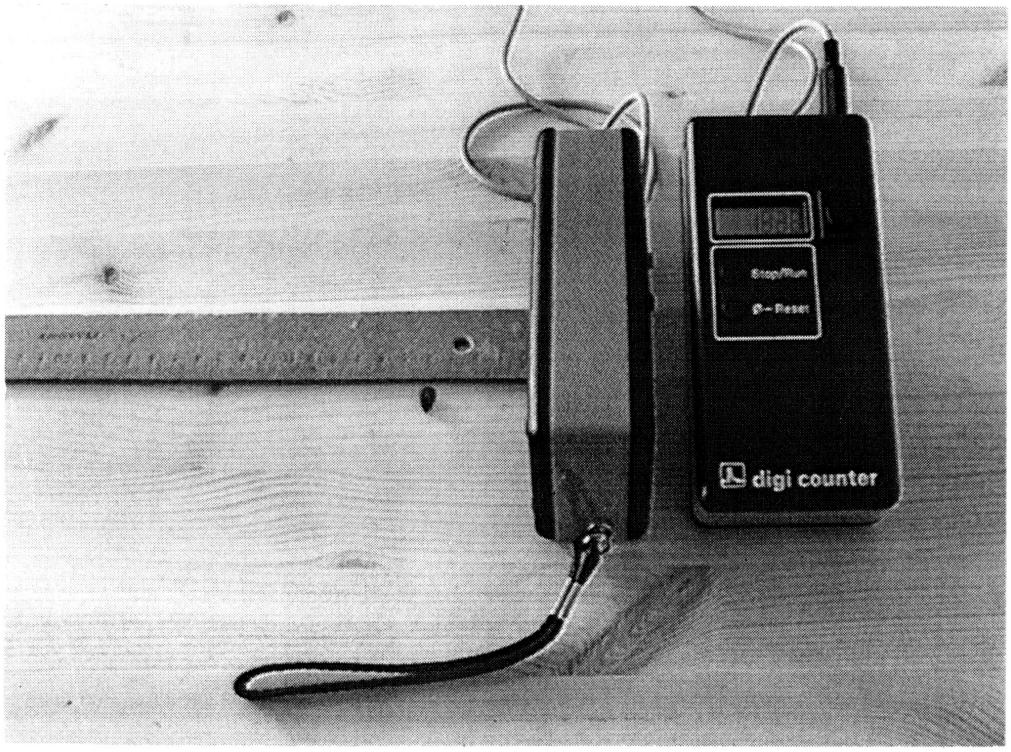

Abbildung 39: Aufbau des Schweißnahtmodells:
Papier – Aluminiumfolie mit Loch (ein Zentimeter dick) – Papier

Beobachtung:

Die Aufnahme der Meßwerte von links nach rechts im Ein-Zentimeter-Abstand ergab (nach Nullratenkorrektur):

Impulse pro Minute	2.078	2.014	2.176	2.861	2.068	2.039	2.101

Abbildung 40: Tabelle mit Meßwerten des Versuchs zur Hohlraumbestimmung

Deutung:

Das radioaktive Gestein sendet Strahlen aus. Im Bereich des Loches (Lunker, Riß) im Aluminium wird diese Strahlung in weitaus geringerem Maße geschwächt, da sie weniger Materie zu durchdringen hat, so daß sich eine größere Impulsrate ergibt.

4.4.4 Wie funktioniert ein Kernkraftwerk?

Zur Klärung dieser Frage bietet sich an, die vier gebräuchlichen Reaktortypen zu untersuchen sowie ihre Unterschiede und Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten (vergleiche 3.5.4).

Ein alternativer Einstieg für die Teilgruppe und unter Umständen im Abschlußplenum ist der Film „Die Atommaus". In diesem Serienspezial der 'Sendung mit der Maus' wird auf sehr anschauliche Weise und mit vielen Versuchen das allgemeine Prinzip eines Kernreaktors verdeutlicht.

So wird bei einem Experiment der Boden eines hohen Acrylglasgehäuses mit gespannten Mausefallen parkettiert, die Tischtennisbälle tragen.

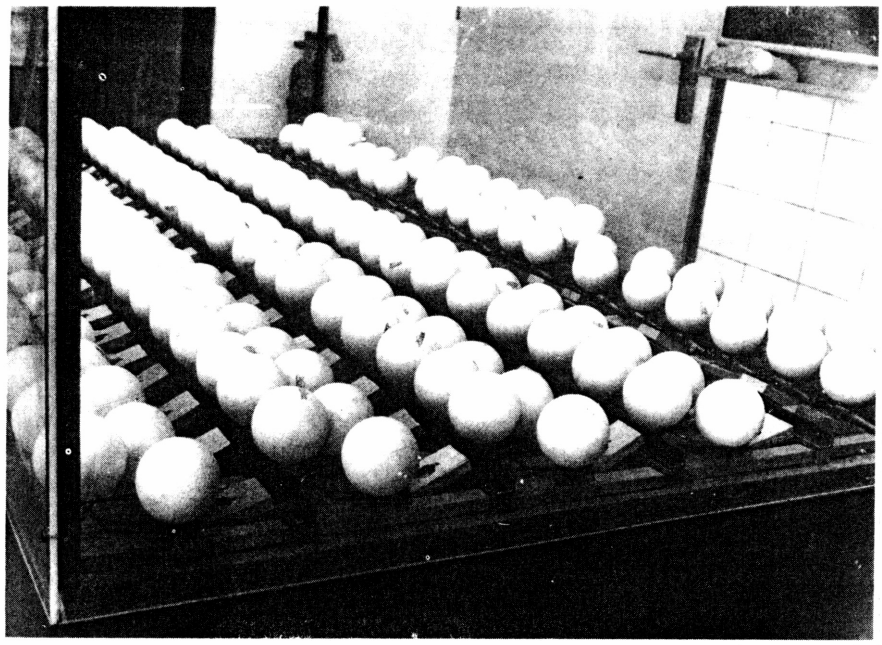

Abbildung 41: Mausefallen-Modell der Kettenreaktion[164]

Wirft man nun einen Tischtennisball von oben in das Gehäuse, ergibt sich ein „faszinierendes Spektakel". Im Mittel bleiben 40% der Fallen unberührt, was dem auch in Wirklichkeit ungespaltenen Restmaterial entspricht.

Wie Umfragen gezeigt haben, bewerten viele Jugendliche und Erwachsene den Informations- und Bildungswert dieser WDR-Kindersendung als sehr hoch[165], so daß - diese Akzeptanz vorausgesetzt - mit der Atommaus bei allen Beteiligten ein Grundwissen von der Funktionsweise eines Kernreaktors gebildet wird.

Eine weitere Alternative für die Themenbearbeitung bietet der Bau eines Reaktormodells. Die Kraftwerke Union AG, Mülheim an der Ruhr, verschickt kostenlos Ausschneidebögen eines Druckwasserreaktors, bei dessen Zusammenbau man Struktur und Funktionsweise des Reaktors kennenlernt. Auch für die Projektausstellung und den „normalen" Unterricht in den darauffolgenden Jahren ist das Modell sehr gut geeignet. Die angegebene Fertigungszeit von 130 Stunden kann in einem handwerklich begabten Team auf 100 Personenstunden reduziert werden.

---

[164]Berge, Otto Ernst: Modellversuche zur Kernphysik, in: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie, Heft 5/30, Radioaktivität und Kernenergie, Köln 1982, S. 172.

[165]Bothur, Armin et al.: Die Maus wird 25!, Videoproduktion ProVideo, Bonn 1994.

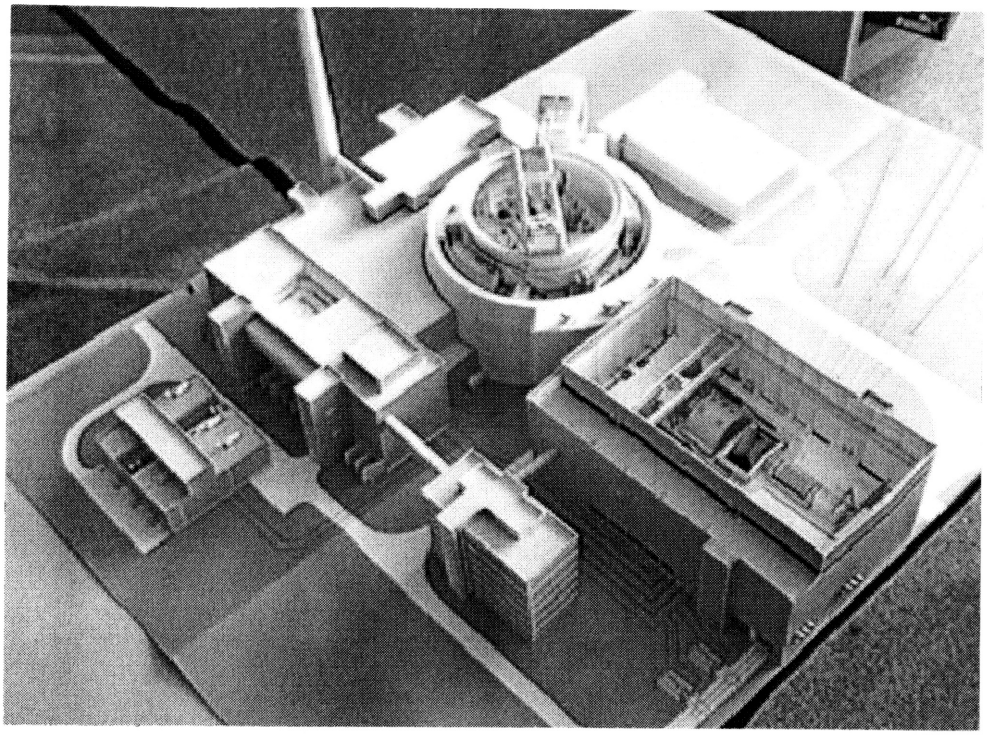

Abbildung 42: Modell eines Druckwasserreaktors

Zu einer kontroversen Diskussion über das Für und Wider friedlicher Nutzung von Kernenergie erhält man unter anderem beim Informationskreis Kernenergie und bei Greenpeace Deutschland Material. In 'Fakten' der Energiewirtschaft finden sich zweimonatlich die neusten Informationen zur Entwicklung der Kernindustrie. Eine sehr gute Sammlung der verschiedenen Positionen von Politik, Wirtschaft und Verbänden findet man bei 'Wirtschaftsforschung Dr. Doeblin' (http:// www.wp-online.de/analysen. html).

Ein spezieller Diskussuionspunkt in politischer Hinsicht kann die Idee des 'Schnellen Brüters' sein. Vor dem Hintergrund von begrenzt zur Verfügung stehendem Uran-235 wurde dieses Konzept entwickelt (vergleiche 3.5.4). Während Greenpeace angesichts des erbrüteten Plutoniums vor dessen Giftigkeit und der Mißbrauchsgefahr zur Bombenproduktion warnt[166], werden an anderer Stelle die Vorteile und Sicherheitskonzepte hervorgehoben.[167]

Unterdessen wurden neue Fakten geschaffen: Der seit 1973 in Kalkar im Bau befindliche deutsche Prototyp eines Schnellen Brüters wurde nie in Betrieb genommen; heute ist er zu einem Freizeitpark umgebaut. Der französische 'Superphénix' wird derzeit umgebaut und soll ab 2003 sein eigenes sowie das in den übrigen Atomkraftwerken Frankreichs anfallende Plutonium verbrauchen. Das russische Pendant wird ebenfalls zu diesem Zweck umgebaut.[168]

---

[166]Greenpeace-Presseerklärung vom 06.01.1995, http://www.greenpeace.de/gp_dok_3p/presse mi/950106.htm, 12.12.1996.

[167]Uematsu, Kunihiko: Die Zukunft der Schnellen Brutreaktoren, in: Analysen 31 - Stellungnahme des Arbeitskreises I des Deutschen Atomforums e.V., Bonn 1993, S. 1ff.

[168]Phönix in der Asche, in: Der Spiegel 6/97, Hamburg 1997, S. 166ff.

4.4.5 Kernfusion - eine Alternative?

Ausgehend von physikalisch-chemischen Grundlagen der Kernfusionstechnik (3.7) kann diese Frage zur Diskussion gestellt werden (Material: Informationskreis Kernenergie).

Für eine intensive Forschung auf diesem Gebiet spricht, daß das für die erste Reaktorgeneration benötigte Lithium für etwa 1000 Jahre ausreichen würde; die in der Folge zu entwickelnden Reaktortypen mit reiner Deuteriumbeschickung hätten nahezu unbegrenzt Brennstoff (ein Kubikmeter Meerwasser enthält etwa 34 Gramm Deuterium). Weiterhin könnten weniger fossile Brennstoffe zur Stromerzeugung verwendet und so die Umweltbelastungen verringert werden.[169]

Gegen die Entwicklung der Kernfusion spricht, daß bei sehr hohen Kosten erst in 30 bis 50 Jahren die Serienreife erreicht sein wird.[170] Allein für den Bau des ersten Forschungsreaktors werden nach 11 Milliarden DM (1992) mittlerweile 15 Milliarden (1996) veranschlagt.[171] Gegner fordern daher die Umverteilung der Gelder auf alternative Projekte, die schon in wenigen Jahren einen Nutzen für die Umwelt haben könnten. Darüberhinaus wird während des Betriebs radioaktives Tritium hergestellt, das aus der Biosphäre ausgeschlossen bleiben muß. Weiterhin fällt hochradioaktiver metallischer Schrott an, der analog zu Abfällen aus Kernspaltungsanlagen sicher endgelagert werden muß.[172]

Wann mit dem europäisch-amerikanisch-japanisch-russischen Fusionsprojekt ITER (Internationaler thermonuklearer Experimentalreaktor) begonnen werden wird, ist derzeit noch unklar. Nachdem 1992 in die sechsjährige Detailplanungsphase eingestiegen worden ist, haben sich 1996 Deutschland und Frankreich um die Bewerbung als Standort für die Versuchsanlage zurückgezogen, da diesen Ländern das Tragen von 70% der immer noch steigenden Gesamtkosten nicht finanzierbar erscheint.[173]

4.4.6 Die Geschichte der Radioaktivität

Die Geschichte der Radioaktivität kann aus zwei verschiedenen Blickrichtungen näher betrachtet werden. Auf der einen Seite stehen die Wissenschaftler und ihre Entdeckungen. Anhand von Mono- und Biographien können Leben und Werk von berühmten Männern wie Ernest Rutherford, Henri Becquerel und Otto Hahn sowie Frauen wie Marie Curie und Lise Meitner aufgearbeitet werden.

Auf der anderen Seite sind die vielen Menschen, die unter Radioaktivität leiden mußten und müssen: die Arbeiter in Uranbergwerken, die Strahlenopfer der Atombombenabwürfe und Reaktorunfälle. Aber auch jene Menschen mußten mit dem frühzeitigen Tod bezahlen, denen man die Unbedenklichkeit

---

[169]Knapp, Sabine: Kernenergie im Unterricht, Ausgabe 1/91: Kernfusion, Bonn 1991.

[170]Ebd.

[171]Fakten: Energiewirtschaft heute und morgen, Informationen und Nachrichten, 8/96.

[172]Knapp, a.a.O.

[173]Max-Planck-Gesellschaft: ITER – ein europäisch-amerikanisch-japanisch-russisches Fusionsprojekt, http://www.ipp.mpg.de/ipp/iter.html, 12.12.1996.

oder gar heilsame Wirkung hoher Strahlendosen erklärte (siehe Abbildungen Anhang O, P und Q): So mußten Zifferblattmalerinnen bis in die Zwanziger Jahre mit radiumhaltigen Farben arbeiten. Man hatte ihnen darüberhinaus beigebracht, die feinen Haarpinsel mit dem Mund anzuspitzen, um ein sauberes Arbeitsergebnis zu erzielen.[174]

4.4.6.1 Versuch 8: Autoradiographie nach Becquerel[175]

Im Schullabor von heute ist es leicht möglich, den Versuch Becquerels nachzuvollziehen, durch den er die Radioaktivität entdeckte.

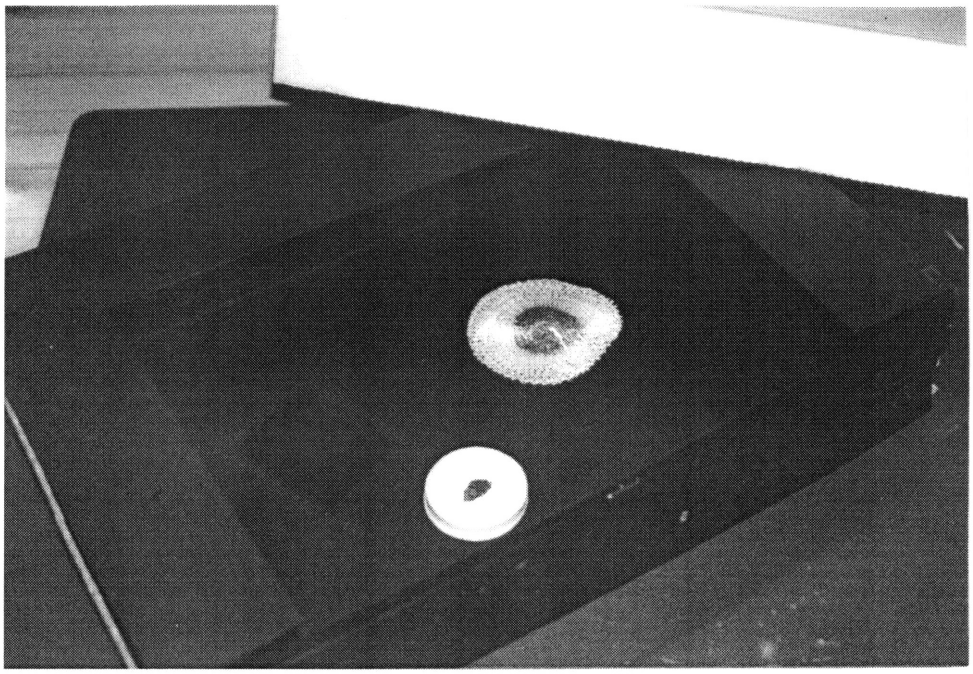

Abbildung 43: Schwarz ausgeschlagener Karton mit Gesteinsprobe und Glühstrumpf

Durchführung:

Als „Fotoplatte" eignet sich ein beliebiger Schwarzweiß-Negativfilm. Noch sensibler sind Röntgenfilme, die auf beiden Seiten belichtet werden können (zum Beispiel vom Zahnarzt zu beziehen).

In Anlehnung an Becquerels Versuch verwendet man ein uranhaltiges Gestein (aus der Mineraliensammlung oder aus dem Handel) als Strahlungsquelle. Aber auch bei der Verwendung eines Glühstrumpfs erhält man gute Ergebnisse. Bei schwacher Beleuchtung werden in einem Karton, der mit schwarzem Papier ausgeschlagen ist, Gestein und Glühstrumpf direkt auf den Film gelegt. Nach

[174]Mays, Charles W.: Wie gefährlich ist Plutonium?, in: Mensch+Umwelt: Plutonium, Neuherberg 1989, S. 45ff.

[175]Puchta, Dietmar: Autoradiographie, in: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie, Heft 5/30, Radioaktivität und Kernenergie, Köln 1982, S. 150ff.

etwa zehn Tagen lichtdichter und erschütterungsfreier Aufbewahrung wird der Negativ- oder Röntgenfilm wie normales Negativmaterial im (Schul-)Fotolabor entwickelt.

Beobachtung:

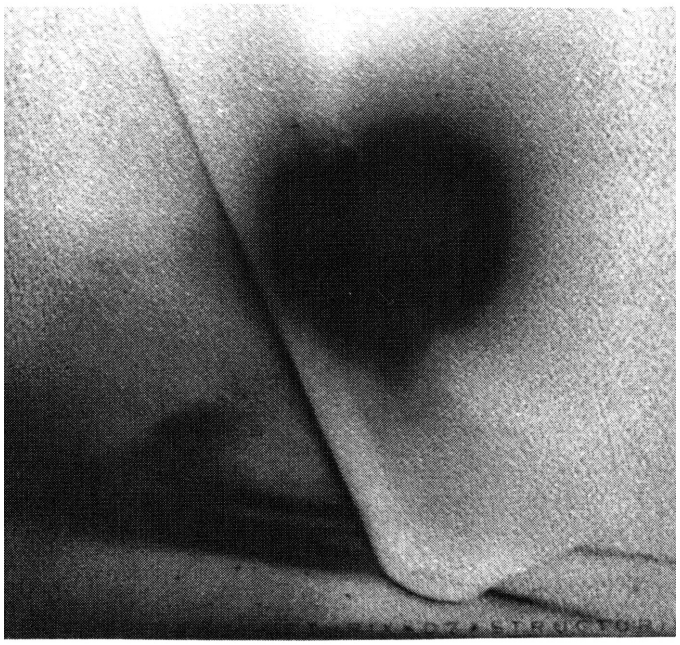

Abbildung 44: Autoradiographie einer uranhaltigen Gesteinprobe

Auf dem Negativ zeichnen sich die Konturen des verwendeten Steins mit einem starken Schatten ab, so daß die durch die radioaktive Strahlung geschwärzte Fläche (3,2 Zentimeter Durchmesser) größer ist als die des Gesteins (0,9 Zentimeter Durchmesser).

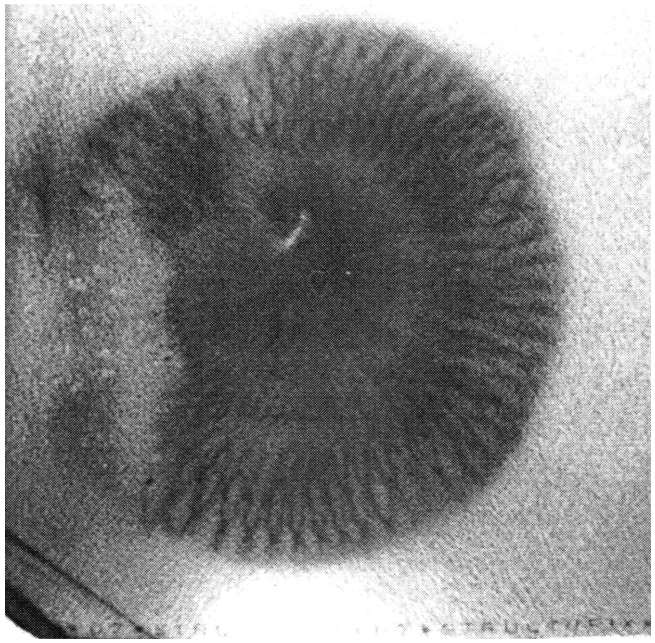

Abbildung 45: Autoradiographie eines thoriumhaltigen Glühstrumpfs

Auf dem zweiten Negativ sind die Umrisse des Glühstrumpfs gut zu sehen.

Deutung:

Der uranhaltige Stein strahlt sehr stark, wodurch er das Negativ über die eigentlichen Konturen hinaus schwärzt. Der Glühstrumpf weist in etwa die gleiche Zahl an Zerfällen auf; diese Aktivität verteilt sich aber auf eine größere Fläche, so daß bei gleicher Belichtungszeit die Umrisse nur helle Schatten aufweisen.

4.4.7 Weitergehende Untersuchungen von Gesteinsproben

Finden die Schüler bei ihrer Suche nach radioaktiven Gegenständen Gesteinsproben, deren Herkunft und Zusammensetzung unbekannt sind, bietet sich eine weitergehende Untersuchung an.

Detaillierte Analysen sind auf nuklearchemischem Gebiet mit schulischen Mitteln nicht möglich, so daß die Unterstützung durch ein entsprechend ausgestattetes Analyseinstitut notwendig ist. Im Fall der Universität Bonn boten die Abteilung für Anorganik der Chemischen Institute sowie die Abteilung für Nuklearchemie der Physikalischen Chemie bei der Untersuchung einer unbekannten Gesteinsprobe ihre Mithilfe an.

Das in der Anorganik häufig verwendete Rasterelektronenmikroskop erzeugt Bilder von der Gesteinsoberfläche, indem ein Elektronenstrahl, ähnlich wie bei einem Fernsehgerät, zeilenweise über das zu scannende Objekt gelenkt wird und die aufgrund inelastischer Streuung entstehenden Sekundärelektronen nachgewiesen werden.[176]

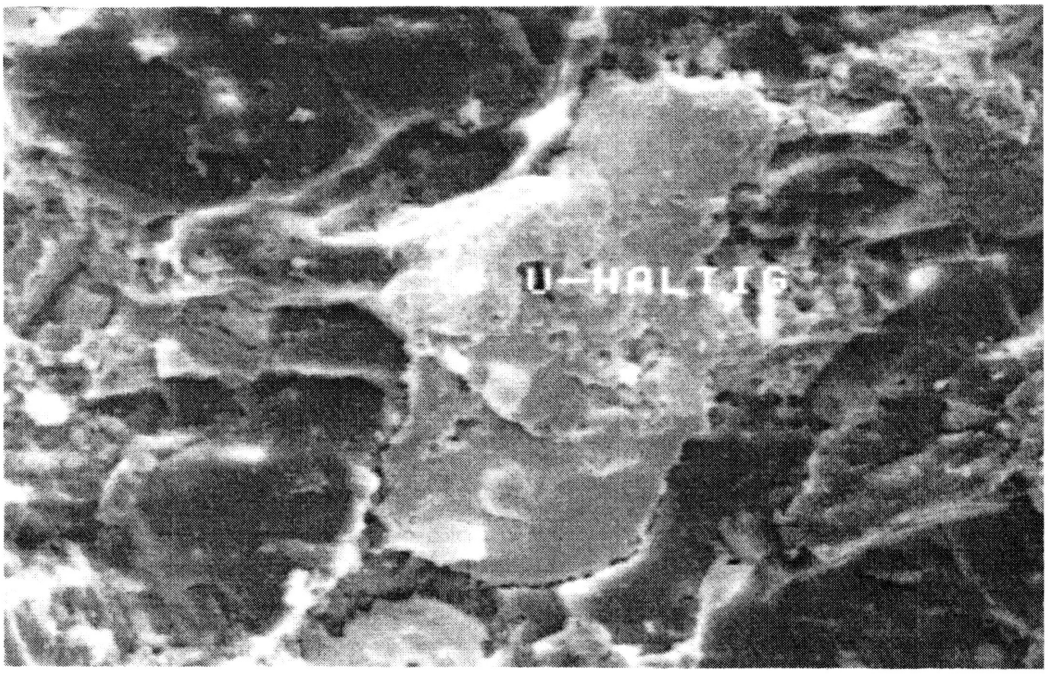

Abbildung 46: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (1 cm ≙ 25 μm)

[176]Holleman, a.a.O., S. 1128ff.

Durch den Elektronenbeschuß werden bei den Atomen der Probe kernnahe Hüllelektronen ionisiert. Der in der Atomhülle freigewordene Platz wird unter Emission charakteristischer Strahlung von einem äußeren Elektron wieder aufgefüllt. Diese Röntgenemissionen können zur Mikrobereichsanalyse genutzt werden. Im Gesteinsausschnitt auf der vorherigen Seite ist das inselartige Gebiet stark uranhaltig (47 Massenprozent). Der umgebende Bereich hingegen enthält fast gar kein Uran dafür aber Kalzium (14 Massenprozent), Schwefel (12 Massenprozent) und Eisen (9 Massenprozent).

In der nuklearchemischen Untersuchung steht der Nachweis verschiedener radioaktiver Isotope im Vordergrund. Die beim radioaktiven Zerfall entstehende Energie kann in Form der freiwerdenden γ-Strahlung zur Charakterisierung der Ausgangsnuklide verwendet werden. Die Messung geschieht mit Ionisationsdetektoren (siehe 2.3.1) und liefert ein γ-Spektrum.

Die computerunterstützte Auswertung ergab bei der Untersuchung des unbekannten Gesteins folgende Resultate, wobei es sich bei den Peaks um die ein spezielles Nuklid kennzeichnenden Spitzenwerte handelt:

Peaks [keV]	*zugehöriges Nuklid*
143,87 186,05	Thorium-230
163,33 205,31	Uran-235
241,98 258,79 295,21 314,20 ...	Blei-214
273,70 389,10 405,74 454,77 ...	Wismut-214
329,82	Thorium-227
510,8	Thallium-208
964,6	Actinium-228
1.001,03	Uran-238

Abbildung 47: Tabelle mit der computerunterstützten Auswertung des γ-Spektrums

Die acht nachgewiesenen Nuklide sind Glieder der drei natürlich vorkommenden Zerfallsreihen (vergleiche 2.6):

Zerfallsreihe	*nachgewiesene Nuklide*
Thorium-Reihe	Ac-228, Tl-208
Uran-Actinium-Reihe	U-235, Th-227
Uran-Radium-Reihe	U-238, Th-230, Pb-214, Bi-214

Abbildung 48: Einordnung der acht nachgewiesenen Nuklide in die natürlichen Zerfallsreihen

4.4.8 Uran für Kernkraftwerke

Ein wichtiger Aspekt bei der Behandlung der Funktionsweise von Kernkraftwerken ist der Uranbrennstoffkreislauf.

Von 1946 bis zur Wiedervereinigung 1990 hat die Deutsche Demokratische Republik fast 220.000 Tonnen Uran in ihren Bergwerken gewonnen und liegt damit auch heute noch hinter den USA und Kanada in der Gesamtproduktionsstatistik auf Platz drei. 1991 wurde die staatseigene Bergwerksgesellschaft durch die Bundesregierung übernommen und stillgelegt. Bei veranschlagten Gesamtkosten von über 13 Milliarden DM für die Sanierung der Altlasten des ostdeutschen Uranbergbaus ist aus umweltpolitischer Sicht der Bedarf zur Diskussion über den menschlichen Raubbau an der Natur gegeben.[177]

Über die Urangewinnung in Europa allgemein sowie die Umweltauswirkungen und Sanierungsvorhaben in der ehemaligen DDR im speziellen gibt das Heft „Uranabbau in Europa - Die Folgen für Mensch und Umwelt" Aufschluß, das der Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz herausgegeben hat.

4.4.9 Radioaktivität in der Öffentlichkeit

In der Öffentlichkeit geht es um Radioaktivität zumeist im Zusammenhang mit den Risiken der Kernenergie. Die Diskussion nach dem Unfall von Tschernobyl und die Proteste im Zusammenhang mit den Castor-Transporten werden in den nächsten Abschnitten behandelt werden (siehe 4.4.10 und 4.4.11).

4.4.9.1 Das Kernkraftwerk Krümmel

Seit einigen Jahren findet sich in verschiedenen Veröffentlichungen immer wieder der Verdacht, daß das Kernkraftwerk Krümmel Ursache für eine Häufung von Leukämieerkrankungen in der Umgebung sei. Zwischen Dezember 1989 und Mai 1991 gab es in der Elbmarsch unbestreitbar sechs Fälle verschiedener Formen von Leukämie.[178] Doch damit endet auch schon die Einigkeit aller Beteiligten, und es beginnt die Gegenüberstellung der verschiedenen Argumente. Die häufig als „Hysteriker" abgetanen Kernkraft- und speziell Krümmelgegner führen ins Feld, daß das Risiko kleiner Strahlungsmengen größer sei als allgemein angenommen.[179] Und in der Tat werden von der Wissenschaft verschiedene Zusammenhänge zwischen Dosis und Wirkung niedriger Strahlendosen angenommen:

---

[177]Diehl, Peter: Uranabbau in Europa - Die Folgen für Mensch und Umwelt, Bonn 1995, S. 5ff.

[178]Varenholt, Fritz: Keine Anhaltspunkte für Krümmel als Leukämie-Verursacher, Pressemitteilung des Umweltminister der Freien und Hansestadt Hamburg vom 24.09.1996, S. 2.

[179]Paulus, Jochen: Atomkraft und Niedrigstrahlung, in: Öko-Test Magazin 6/92, S. 27.

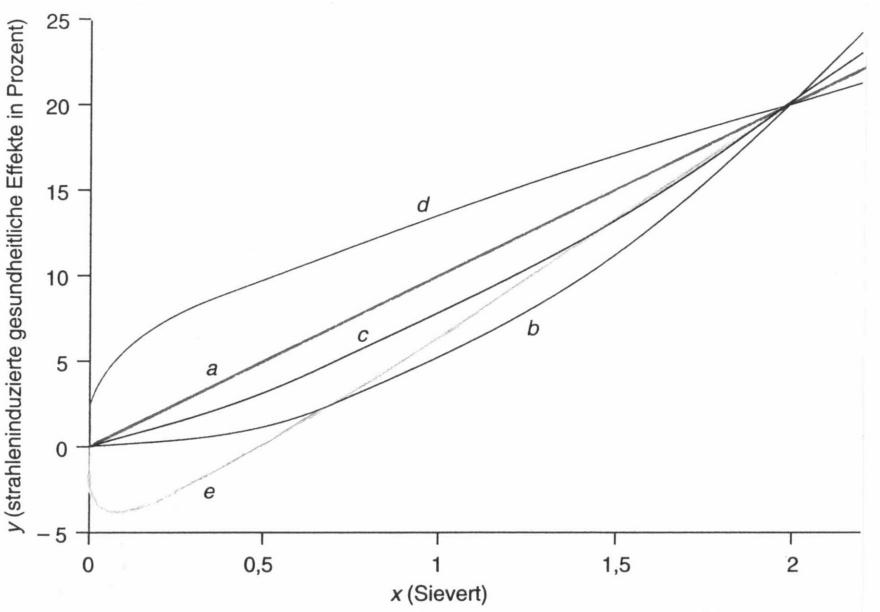

Abbildung 49: Mögliche Wirkungen niedriger Strahlendosen[180]

(a linear, b quadratisch, c linear quadratisch, d supralinear, e biopositiv, das heißt also mit heilender Wirkung im Bereich sehr kleiner Strahlendosen) Weiterhin wird als strittig angesehen, ob Atomkraftwerke so viele Krebskranke verursachen, daß es statistisch nachweisbar ist.[181]

Die andere Seite zeigt zum einen alternative Ursachen für Leukämieerkrankungen auf. So machten internationale Experten Anfang 1996 bei einem Workshop zum Thema 'Risikofaktoren für Leukämieerkrankungen' darauf aufmerksam, daß neben ionisierender Strahlung vor allem Viren, Chemikalien, Arzneimittel und elektromagnetische Felder als mögliche Ursachen diskutiert werden.[182] Zum anderen weist die Statistik bei Erwachsenen in der Elbmarsch Leukämieerkrankungen insgesamt so selten aus, daß die extreme Häufung bei den Kindern dadurch aufgewogen wird und bei der Gesamtbetrachtung der Bevölkerung die Zahl der Leukämien „völlig durchschnittlich" ausfällt.[183]

Angesichts dieser und weiterer Argumente, Expertengutachten und Schlußfolgerungen ist es für die weitere Bearbeitung des Teilthemas im Rahmen des Projekts wichtig, 'Pro' und 'Kontra' zu sammeln und gegenüberzustellen, um auf diese Weise die Argumente der beiden Seiten herauszuarbeiten und eine eigene Einschätzung durch jeden selbst zu ermöglichen.

---

[180]Burkart, Werner: Die gesundheitlichen Risiken ionisierender Strahlung, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997, S. 80.

[181]Paulus, a.a.O., S. 27.

[182]W&P Online: Bekanntmachung einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission vom 11.07.1996, http://www.wp-online.de/analysen/aeleuk00.htm, 12.12.1996.

[183]Varenholt, a.a.O., S. 3.

4.4.9.2 Eine Umfrage zum Thema ‘Radioaktivität’

Um ein aktuelles Meinungsbild im Zusammenhang mit Radioaktivität zu erhalten, können die Projektteilnehmer einen Fragebogen entwickeln und ihn beispielsweise Schülern und Lehrern der eigenen Schule vorlegen. Der Aufbau des Fragenkatalogs sollte dabei auf den jeweiligen Projektschwerpunkt ausgerichtet werden.

Empfinden Sie spontan gegenüber dem Wort ‘Radioaktivität’ eine Abneigung?

- ☐ ja
- ☐ nein
- ☐ weiß nicht

Was fällt Ihnen unmittelbar bei dem Wort ‘Radioaktivität’ ein?

1. _____
2. _____
3. _____

Fällt Ihnen zu dem Wort ‘Radioaktivität’ etwas Positives ein?

- ☐ ja, _____
- ☐ nein
- ☐ weiß nicht

Ist die Kernenergie eine Technik, die die Menschen sicher beherrschen können, oder haben Sie Zweifel daran?

- ☐ beherrschbare Technik
- ☐ habe Zweifel
- ☐ weiß nicht

Wird die Kernenergie auch in Zukunft einen beträchtlichen Teil der Energieversorgung ausmachen?

- ☐ ja
- ☐ nein
- ☐ weiß nicht

Sind Sie dafür, in Zukunft die Kernenergie durch alternative Energien zu ersetzen?

- ☐ ja
- ☐ nein
- ☐ weiß nicht

Haben Sie Verständnis dafür, daß Demonstranten gegen den Transport von radioaktivem Abfall auf die Straße gehen, um diesen zu verhindern?

- ☐ ja
- ☐ nein
- ☐ weiß nicht

Rechnen Sie sich zu den Kernkraftgegnern?

- ☐ ja
- ☐ nein
- ☐ weiß nicht

Abbildung 50: Fragebogen zum Thema Radioaktivität und Kernkraft

4.4.10 Der Unfall von Tschernobyl

Der Unfall am 16.04.1986 im Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl und die sich ergebende Belastung durch radioaktive Stoffe für halb Europa ist ein möglicher Einstiegspunkt für eine kontroverse Diskussion der Kernenergie.

Die Aufarbeitung im Projekt kann in Form einer chronologischen Berichterstattung verfaßt werden. Beginnend mit dem Unfallhergang wird über die Auswirkungen für Umwelt und Menschen berichtet und erforscht, was die Forderungen nach Konsequenzen bis heute bewirkt haben. Die Ergebnisse lassen sich in Form einer Plakatwand, die von einer Zeitleiste als rotem Faden durchzogen wird, sehr gut festhalten.

Über den Unfallhergang gibt es vor allem nach dem 10. Jahrestag im vergangenen Jahr viele Publikationen (Tschernobyl - Der Reaktorunfall, Informationskreis Kernenergie; Radioaktivität, Praxis der Naturwissenschaften Chemie 6/43; Internet: http://www.ba-wue.gruene.de/tschern. html, http://www.infos.de/energiewende/tschern1.html, http://www.icf.de/greenpeace-berlin/ tscherno). Danach kamen zu den konzeptionellen Mängeln des Hochleistungs-Druckröhrenreaktors äußerst gravierende Bedienungsfehler.

In diesem Zusammenhang wird auch die Frage nach einem vergleichbaren Szenario in deutschen Kernkraftwerken beantwortet: Hierzulande wird das Wasser des primären Kühlkreislaufs sowohl als Kühlmittel wie auch als Moderator zur Neutronenabbremsung genutzt. In Anlagen des Tschernobyltyps hingegen wird Graphit zur Moderation und Wasser zur Kühlung verwendet. Das Wasser umgibt die Brennelemente unmittelbar, es ist aber ein wesentlich schlechteres Moderationsmittel als Graphit (vergleiche 3.5.4.2), hebt somit dessen starke Moderator-Wirkung teilweise auf und hemmt den Kernspaltungsprozeß. Kommt es nun zu einer Kühlmittelverdampfung, verdampft in deutschen Kernkraftwerken auch der Moderator und die Kettenreaktion kommt zum Erliegen; in Tschernobyl hingegen wurde durch die Dampfbildung im Kühlwasser die moderierende Wirkung des Graphits erhöht und der Kernspaltungsprozeß weiter angefacht.

In den Tagen darauf konnte, nachdem erhöhte Strahlungswerte in Nord- und Westeuropa gemessen worden waren, die ursprünglich geplante Vertuschung des Vorfalls nicht aufrechterhalten werden. Eine Chronik beispielsweise der ersten Woche nach dem Unfall läßt sich anhand von Zeitungsausschnitten der Tagespresse erstellen (siehe Anhang R: General-Anzeiger, Bonn). Nicht zuletzt der Vergleich mit der Berichterstattung in den Ländern des ehemaligen Ostblocks (siehe Anhang S: Neues Deutschland, Ost-Berlin) kann politisch-geschichtlich reizvoll sein. Während man beim Bonner General-Anzeiger von Anfang an bemüht war, über mögliche Gefahren offen zu informieren, wurde für die Bürger der ehemaligen DDR nur unzureichend, unregelmäßig und vertröstend berichterstattet.

Durch den Reaktorunfall wurden große Mengen radioaktiver Isotope freigesetzt und gelangten in die Nahrungskette Boden-Pflanze-(Tier-)Mensch. Die radiologischen Auswirkungen und Konsequenzen werden gegenwärtig aufgearbeitet (10 Jahre nach Tschernobyl, Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 4/96). Immer noch finden sich erhöhte Werte von Cäsium-137 beispielsweise in Waldpilzen, bei denen der Bund für Umwelt- und

Naturschutz bei Erwachsenen 35 Becquerel pro Kilogramm (Kleinkinder/Schwangere: 10 Becquerel pro Kilogramm) als Maximalwerte angibt:[184]

Pilzart	*Fundort*	*Fundtag*	*Belastung [Bq/kg]*
Birkenpilz	Oldenburg	18.08.1987	159
		22.09.1993	4
Kahler Krempling	Oldenburg	17.08.1987	593
		22.09.1994	25
Marone	Sandkrug	18.09.1987	1.489
		25.09.1995	350

Abbildung 51: Cäsium-Belastungen bei Walpilzen nach Tschernobyl

Die bald nach dem Unfall von Tschernobyl in der Bundesrepublik aufgekommenen Stimmen, die einen Ausstieg aus der Kernenergie forderten, konnten sich nicht durchsetzen. Bei einer Meinungsumfrage im Jahr 1987 meinten etwa 80 Prozent, daß die Kernenergie mit Gesundheitsrisiken verbunden sei, ebenfalls rund 80 Prozent sahen aber auch ökonomische Vorteile durch die Kernenergie.[185] Während die deutsche Bevölkerung zumindest den Neubau von Kernkraftwerken ablehnt, argumentieren Befürworter und Gegner der Kernenergie mit unterschiedlichen Zahlen und Statistiken, ob ein Kernenergieausstieg wirtschaftlich vertretbar und vor dem Hintergrund des Treibhauseffekts sinnvoll ist.

4.4.11 Das Rollenspiel 'Castor'

Das Rollenspiel ist eine Spielart, bei der die Spieler ihre alltägliche soziale Identität aufgeben und in eine Rolle schlüpfen.[186] Im Rollenspiel wird fachübergreifender und gesellschaftsbezogener Unterricht realisiert.[187]

In den ersten Tagen des März 1997 wurden sechs Castor-Behälter aus den Atomkraftwerken Neckarwestheim und Grundremmingen sowie aus der französischen Wiederaufarbeitungsanlage La Hague nach Gorleben gebracht. Zur Sicherung des Transports auf Schiene und Straße wurden 30.000 Beamte von Polizei und Bundesgrenzschutz eingesetzt. Die Kosten für den gesamten Einsatz werden auf 100 Millionen DM geschätzt. Angesichts dieser Dimensionen ist es sehr wahrscheinlich, daß beim

[184]Arbeitsgruppe Physikalische Umweltanalytik an der Universität Oldenburg, http://www.physik.uni-oldenburg.de/docs/puma/radio/pilz8695.html, 12.12.1996.

[185]Hennen, Leonhard: Akzeptanz der Kernenergie nach Tschernobyl, in: Kernfragen, Jülich 1990, S. 63ff.

[186]Böhm, a.a.O., S. 587.

[187]Becker, a.a.O., S. 272.

Projekt ‘Radioaktivität’ das Thema ‘Entsorgung von Kernbrennstoffen’ bei den Teilnehmern von Interesse sein wird.

Das Rollenspiel ‘Castor’ ist eine gute Möglichkeit, die große Menge an Material zu den Themen Transport sowie Zwischen- und Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Form von Standpunkten verschiedener gesellschaftlicher Gruppen aufzuarbeiten (Informationen von Greenpeace Deutschland, Informationskreis Kernenergie, Bundesamt für Strahlenschutz, Pressearchiv und Tagespresse). Der Schauplatz für das Spiel könnte beispielsweise eine Bürgerversammlung in Gorleben sein, bei der durch Vertreter von Interessengruppen ein bevorstehender Transport radioaktiver Abfälle in Castor-Behältern diskutiert werden soll. Folgende Gruppen könnten repräsentiert werden:

- Anwohner
- Bürgerinitiative
- Greenpeace
- Polizei
- Bundesamt für Strahlenschutz
- Landesregierung
- Bundesregierung
- Energiewirtschaft

Beispielsweise in Form eines Redeprotokolls oder einer Videoproduktion kann das Gespräch für die Projektdokumentation gesichert werden.

4.4.12 Kernenergie und Ethik

Wenn alle naturwissenschaftlichen Argumente um das Für und Wider von Kernenergienutzung vorgebracht worden sind, bleibt nur noch die ethische Beurteilung des Tuns. Diese aus philosophischer Sicht interessante Diskussion führt allerdings, dies sei vorweggenommen, auch zu keiner Lösung des Problems, sondern es kommt wiederum nur zum Austausch von unterschiedlichen Standpunkten.

Hauptgegenstand der Ethik sind die menschlichen Handlungen. Bei der Gesinnungsethik wird auf die Denkweise gesehen, aus der die Handlung hervorgeht; bei der Verantwortungsethik beobachtet man die Wirkungen, die die Handlung in der Praxis erzeugt. Eine ethisch vollkommene Tat ist eine solche, die einer guten Gesinnung entspringt und zugleich in ihren Auswirkungen verantwortbar ist.[188]

Streitpunkt der Befürworter und Gegner von Kernenergienutzung ist nicht die Gesinnungsethik, vielmehr entzündet sich der Disput an der Vertretbarkeit des Handelns in der Praxis: Die Seite der Atomkraftgegner sagt, daß Handlungen nur dann verantwortet werden können, wenn die absehbaren Folgen die Lebensdauer der auslösenden Menschen nicht übersteigt. Dagegen wird von der anderen Seite eingewandt, daß man, wenn man dies Kriterium ernst nehmen würde, nur noch sehr wenig tun könnte. Aber gerade darin, so wieder die Anderen, zeige sich, daß noch in sehr vielen weiteren Fällen

[188]Wünschmann, Andreas: Umwelt und Verantwortung - Der „energetische Imperativ”, Kirchheimbolanden 1991, S. 3f.

kritische ethische Reflexionen not tun. Doch nicht nur Handeln sondern auch Unterlassen habe Folgen, die verantwortet werden müssen, betonen die Atomkraftbefürworter. Die Atomkraftgegner antworten, daß keine vollständige logische Symmetrie zwischen Handlungen und Unterlassungen besteht: Während nur bewußte Unterlassungen tatsächliche Handlungen sind, gibt es sehr viele automatische Unterlassungen, die immer dann zwingend begangen werden, wenn man überhaupt etwas tut.[189]

Auf solch dialektischem Niveau kann die Auseinandersetzung mit weiteren Thesen und Antithesen fortgeführt werden, ohne daß zum Schluß eine Synthese beider Positionen zu einer höheren Einheit möglich werden wird. Diese Unabgeschlossenheit der Diskussion stellt aber gerade die Triebfeder für die Suche nach neuen Argumenten und Lösungen dar und ist auch für das Projekt förderlich und lehrreich.

4.4.13 Weitere Teilgruppenthemen

Es gibt sicherlich viele interessante Aspekte von Radioaktivität, die in dieser Arbeit unberücksichtigt geblieben sind. Einige Teilgruppenthemen seien hier zum Schluß noch angerissen und zur weiteren Ausarbeitung empfohlen.

4.4.13.1 Das Radon-Paradoxon

In diesem Jahr sollen erste Ergebnisse der Langzeituntersuchung „Lungenkrebs und Radon" vorliegen. Das radioaktive Edelgas Radon tritt aus dem Erdboden und Baumaterialien aus, wodurch in Gebäuden eine hohe Innenraumkonzentration entstehen kann; Radon soll deshalb einen Anteil von bis zu 20% am Lugenkrebsrisiko der Bevölkerung haben.[190]

Andererseits werben Kurorte wie Bad Hofgastein (Österreich) seit Jahrzehnten mit radonhaltigen Heilstollen:

> „[...] Der Stollen wird unterteilt in mehrere Stationen zwischen 38° und 41°C und einer Luftfeuchtigkeit von 70-90%, welche eine optimale individuelle Abstimmung auf jeden einzelnen ermöglichen. Durch die Überwärmung des Körpers und die erhöhte Luftfeuchtigkeit entsteht eine verstärkte Radonaufnahme über die Haut. Das Radon dringt durch die Zellen in die Blutbahn und wirkt dadurch ganzheitlich anregend auf Stoffwechselkreislauf, Drüsen, Blutzirkulation und Organe und wirkt daher gleichzeitig schmerzstillend und regenerierend. [...]"[191]

---

[189]Zimmerli, Walther: Ethische Probleme der zivilen Nutzung der Kernenergie, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997, S. 110ff.

[190]Meyer, Olivia: Radon und Lungenkrebsrisiko, in: Mensch+Umwelt, Heft 4, Neuherberg 1995.

[191]Magic Moments - Heilendes Wasser, Gesundheit und Lebensfreude, Werbeprospekt Bad Hofga-

In früheren Jahren wurde sogar noch mit der Radon-Aktivitätskonzentration von über 150.000 Becquerel pro Kubikmeter Luft geworben, was bei einer zweiwöchigen Kur zu einer Äquivalentdosis im Atemtrakt von 100 Millisievert führt (vergleiche vier Millisievert im Jahr, 3.8).[192]

4.4.13.2 Moderne Alchemie

Quecksilber in Gold verwandeln - kein Problem! Bestrahlt man Quecksilber mit energiereichen Neutronen, so findet bei dem mit 23% natürlich vorkommenden Isotop Quecksilber-200 folgende Kernreaktion statt:

$$^{200}_{80}\mathrm{Hg} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{200}_{79}\mathrm{Au} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$$

Die Freude allerdings währt nicht lange, wenn innerhalb von 48 Minuten die Hälfte des Goldes wieder zerfällt:

$$^{200}_{79}\mathrm{Au} \rightarrow {}^{200}_{80}\mathrm{Hg} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

Stabiles Gold erhält man durch Bestrahlung von Platin mit langsamen Neutronen:

$$^{196}_{78}\mathrm{Pt} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{197}_{78}\mathrm{Pt}$$

$$^{197}_{78}\mathrm{Pt} \rightarrow {}^{197}_{79}\mathrm{Au} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu} \qquad (\tau = 18{,}3 \text{ Stunden})$$

Doch auch dabei gibt es zwei entscheidende Probleme: Zum einen kann man das entstandene Gold nicht sehen, da in vertretbarer Zeit nur ein paar Millionen Atome gebildet werden; zum anderen ist Platin wertvoller als Gold.[193]

Trotz dieser etwas skurril erscheinenden „Anwendungen" wird an diesen als Transmutationen bezeichneten Neutronenreaktionen intensiv geforscht, um eines Tages radioaktive Spaltprodukte in kurzlebige oder gar stabile Isotope überführen zu können.[194]

4.4.13.3 Napoleon, Kunstfälscher & Co.

Die Aufklärung der Todesursache von Napoleon Bonaparte wurde schon geschildert (vergleiche 3.3.1.2). Ebenfalls durch Neutronenaktivierungsanalyse zeigte sich, daß König Heinrich I. im Jahr 1124 im Unrecht war, als er seine Münzmeister verdächtigte, Zinn in das Münzmetall gemischt zu haben. 850 Jahre danach zeigte sich, daß die Münzen absolut vollwertig und des Königs drakonische Strafen ungerechtfertigt waren.[195]

---

stein 1996/1997.

[192]Ziemen, a.a.O., S. 103ff.

[193]Ziemen, a.a.O., S. 109f.

[194]Leuschner, Udo: Radioaktive Abfälle - Rohstoffe von morgen?, in: Strom-Basiswissen - Entsorgung von Kernkraftwerken (Nr. 120), Frankfurt am Main 1995, S. 8.

[195]Keller, a.a.O., S. 263.

Ein weiteres Beispiel findet sich in einem Fachdidaktikbuch für Mathematik: Der holländische Maler van Meegeren behauptete, daß das Gemälde „Die Jünger von Emmaus" nicht von seinem Landsmann Vermeer (1632-1675) sondern von ihm selbst gemalt worden sei. Das seit über 2.000 Jahren von Malern verwendete Farbpigment Bleiweiß (Bleidioxid) enthält in geringen Mengen die radioaktiven Isotope Radium-226 und Blei-210 (Uran-Radium-Reihe). Im Bleierz hat sich zwischen allen Gliedern - und damit auch diesen beiden - das radioaktives Gleichgewicht eingestellt (vergleiche 2.6), welches durch die Bleigewinnung verloren geht, indem das Blei-210 im Metall verbleibt, während das Radium-226 zum großen Teil entfernt wird. Nach 100 bis 200 Jahren hat sich das radioaktive Gleichgewicht im Bleiweiß wieder eingestellt. Die Untersuchung im Jahre 1967 ergab 8,5 Blei- und 0,8 Radiumzerfälle pro Minute und pro Gramm Bleiweiß. Vermeer konnte also nicht der Maler des Bildes sein, da sich nach über 300 Jahren das radioaktive Gleichgewicht wieder eingestellt haben müßte. Weitergehende Berechnungen zeigen darüberhinaus, daß van Meegeren vom tatsächlichen Alter des Bildes her der Fälscher gewesen sein kann.[196]

[196]Herfort, Peter et al.: Mathematik - Studienbriefe zur Fachdidaktik für Lehrer der Sekundarstufe II, Analysis MA4: Exponential- und Logaritmusfunktion, Wachstumsvorgänge, Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen, Tübingen 1981, S. 106ff.

4.4.13.4 Sammler aller Länder

Bei Münzen und Briefmarken finden sich immer wieder Ausgaben, die mit Radioaktivität zu tun haben. Die Suche nach derartigen Berührungspunkten von Alltag und Radioaktivität kann in Hinsicht auf eine Projektausstellung durchaus nützlich sein.

Abbildung 52: Münzen und Briefmarken aus der Bundesrepublik Deutschland

5 Nachwort

Als ich mit dieser Arbeit begann, stand ich dem, was mit dem Thema ‘Radioaktivität’ verbunden ist, sehr positiv gegenüber: Was machbar ist, sollte man tun!

Nach der näheren Beschäftigung mit den einzelnen Aspekten des Themas habe ich eine wesentlich differenziertere Meinung gewonnen. So gibt es beispielsweise nicht das strahlende Weiß der Kernenergiewirtschaft, aber auch nicht das dunkle Schwarz ihrer Gegner, vielmehr sind es Grauschattierungen dazwischen.

In der Schule sollte das Projekt ‘Radioaktivität’ zum Ziel haben, Wissen über Fakten und Meinungen zu sammeln, um den Teilnehmern schlußendlich die Möglichkeit eigener Meinungsfindung zu ermöglichen. Bei mir selbst ist dies geschehen, und ich wäre sehr froh, wenn es eines Tages mir oder jemand anderen möglich ist, diese Projekt Wirklichkeit werden zu lassen.

6 Literaturverzeichnis

Arbeitsgruppe Physikalische Umweltanalytik an der Universität Oldenburg, http://www.physik.uni-oldenburg.de/docs/puma/radio/pilz8695.html, 12.12.1996.

Becker, Hans-Jürgen et al.: Fachdidaktik Chemie, Köln 1992.

Berge, Otto Ernst: Modellversuche zur Kernphysik, in: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie, Heft 5/30, Radioaktivität und Kernenergie, Köln 1982.

Beste, Dieter: Folge-Forschung, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997.

Böhm, Winfried: Wörterbuch der Pädagogik, Stuttgart 1994.

Bothur, Armin: Archäologische Altersbestimmungen, für: Grundlagen der Museumspädagogik, Prof. Dr. Walzik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Wintersemester 1994/95

Bothur, Armin et al.: Die Maus wird 25!, Videoproduktion ProVideo, Bonn 1994.

Bredthauer, Wilhelm et al.: Atome - Kerne - Quanten, Stuttgart 1987.

Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlenthemen - Röntgendiagnostik: Schädlich oder nützlich?, Salzgitter 1995.

Burkart, Werner: Die gesundheitlichen Risiken ionisierender Strahlung, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997.

Buttlar, Haro von: Radioaktivität: Fakten, Ursachen, Wirkungen, Berlin/Heidelberg 1990.

Dewey, John et al.: Der Projekt-Plan: Grundlegung und Praxis, Weimar 1935.

Diehl, Peter: Uranabbau in Europa - Die Folgen für Mensch und Umwelt, Bonn 1995.

Fakten: Energiewirtschaft heute und morgen, Informationen und Nachrichten, Nr. 138 9/94, Nr. 151 10/96.

Falbe, Jürgen (Hrsg.): Römpp Chemie Lexikon, Band 1-5, Stuttgart/New York 1995.

Franzen, Ludwig Ferdinand: Stellungnahmen zu Kernenergiefragen: Aufbau und Wirkungsweise von Kernkraftwerken, Köln 1983.

Führ, Fritz et al.: Pesticides in the Soil - Lysimeter Experiments with ^{14}C-Labelled Active Ingredients, Revised Offprint of the Annual Report 1989, Jülich 1990.

Führ, Fritz: Einsatz des kurzlebigen ^{11}C-Radioisotops in der pflanzenphysiologischen Forschung, überarbeiteter Sonderdruck des Jahresberichtes 1987/88, Jülich 1990.

Gesellschaft für Schwerionenforschung: Z 112, http://www.gsi.de/z112.html, 12.12.1996.

Greenpeace-Presseerklärung vom 06.01.1995, http://www.greenpeace.de/gp_dok_3p/presse mi/950106.htm, 12.12.1996.

Greine, W. D.: Projekt-Vorhaben, Düsseldorf 1980.

Hennen, Leonhard: Akzeptanz der Kernenergie nach Tschernobyl, in: Kernfragen, Jülich 1990.

Herfort, Peter et al.: Mathematik - Studienbriefe zur Fachdidaktik für Lehrer der Sekundarstufe II, Analysis MA4: Exponential- und Logaritmusfunktion, Wachstumsvorgänge, Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen, Tübingen 1981.

Holleman, Arnold F. et al.: Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin/New York 1995.

Keller, Cornelius: Kernenergie - Grundlagen der Radiochemie, Aarau/Frankfurt am Main 1993.

Klemm, Cordula: Radioaktivität in Gebrauchsgegenständen, in: Mensch+Umwelt: Strahlung im Alltag, Neuherberg 1991.

Knapp, Sabine: Kernenergie im Unterricht, Ausgabe 1/91: Kernfusion, Bonn 1991.

Laj, Carlo et al.: Altersbestimmung mit der Kohlenstoff-14-Methode, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997.

Leuschner, Udo: Radioaktive Abfälle - Rohstoffe von morgen?, in: Strom-Basiswissen - Entsorgung von Kernkraftwerken (Nr. 120), Frankfurt am Main 1995.

Lieckfeld, Gerolf et al.: Radioaktivität auf dem Computer, in: Praxis der Naturwissenschaften Chemie, Heft 1/35, Köln 1986.

Lieser, Karl Heinrich: Einführung in die Kernchemie, Weinheim 1980.

Lindner, Helmut: Grundriß der Atom- und Kernphysik, Leipzig/Köln 1993.

Magic Moments - Heilendes Wasser, Gesundheit und Lebensfreude, Werbeprospekt Bad Hofgastein 1996/1997.

Martin, Joachim: Radioaktivität und Strahlung in unserer Umwelt, in: Praxis der Naturwissenschaften Chemie, Heft 7/34: Kern- und Radiochemie, Köln 1985.

Max-Planck-Gesellschaft: ITER - ein europäisch-amerikanisch-japanisch-russisches Fusionsprojekt, http://www.ipp.mpg.de/ipp/iter.html, 12.12.1996.

Mays, Charles W.: Wie gefährlich ist Plutonium?, in: Mensch+Umwelt: Plutonium, Neuherberg 1989.

Meyer, Olivia: Radon und Lungenkrebsrisiko, in: Mensch+Umwelt, Heft 4, Neuherberg 1995.

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: Richtlinien Chemie, Gymnasiale Oberstufe, Frechen 1996.

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: Richtlinien Physik, Gymnasiale Oberstufe, Frechen 1996.

Nuklearchemisches Praktikum, Praktikumsskript des Instituts für Physikalische Chemie, Abteilung Nuklearchemie, Universität Bonn, unbekanntes Jahr.

Paulus, Jochen: Atomkraft und Niedrigstrahlung, in: Öko-Test Magazin 6/92, S. 27.

Phönix in der Asche, in: Der Spiegel 6/97, Hamburg 1997.

Platte, Hans K. et al.: Das Projekt - Theorie, Methoden, Beispiele, Köln 1990.

Pohlit, Wolfgang: Radioaktivität, Mannheim/Leipzig/Wien/Zürich 1992.

Radvanyi, Pierre et al.: Die Entdeckung der Radioaktivität, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997.

Seelmann-Eggebert, W. et al.: Nuklidkarte Kernforschungszentrum Karlsruhe, München 1981.

Stolz, Werner: Radioaktivität: Grundlagen, Messung, Anwendungen, Stuttgart/Leipzig 1996.

Stowasser, Josef M.: Der kleine Stowasser: Lateinisch-deutsches Schulwörterbuch, München 1980.

Streit, Bruno: Umweltlexikon, Freiburg im Breisgau 1992, S. 180.

Uematsu, Kunihiko: Die Zukunft der Schnellen Brutreaktoren, in: Analysen 31 - Stellungnahme des Arbeitskreises I des Deutschen Atomforums e.V., Bonn 1993.

Varenholt, Fritz: Keine Anhaltspunkte für Krümmel als Leukämie-Verursacher, Pressemitteilung des Umweltminister der Freien und Hansestadt Hamburg vom 24.09.1996.

Volkmer, Martin: Die natürliche Strahlenbelastung, Hamburg 1993.

Volkmer, Martin: Experimente zur Radioaktivität, Hamburg 1992.

Volkmer, Martin: Kernenergie - Basiswissen, Hamburg 1995.

Volkmer, Martin: Kernenergie - Radioaktivität und Strahlenschutz, Hamburg 1994.

W&P Online: Bekanntmachung einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission vom 11.07.1996, http://www.wp-online.de/analysen/aeleuk00.htm, 12.12.1996.

Walzik, Günther et al.: Der Mensch und seine Welt 1, Bonn 1976.

Willi, Alfred V.: Leistungskurs Chemie, Frankfurt am Main/Berlin/München 1986.

Wünschmann, Andreas: Umwelt und Verantwortung - Der „energetische Imperativ", Kirchheimbolanden 1991, S. 3f.

Zimen, Karl-Erik: Strahlende Materie: Historisches, Aktuelles, Revolutionäres, Frankfurt am Main/Berlin 1990.

Zimmerli, Walther: Ethische Probleme der zivilen Nutzung der Kernenergie, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/97: Radioaktivität, Heidelberg 1997.

7 Danksagungen

Mein Dank gilt folgenden Institutionen für die Zusendung von Materialien zum Thema Radioaktivität (in alphabetischer Reihenfolge):

- Arbeitskreis Schulinformation Energie (ASE), Am Hauptbahnhof 12, 60329 Frankfurt am Main.
- Brennelement-Zwischenlager Ahaus GmbH (BZA), Ammeln 59, 48683 Ahaus.
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Postfach 100149, 38201 Salzgitter.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Postfach 120629, 53048 Bonn.
- Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz e.V. (BBU), Prinz-Albert-Straße 43, 53113 Bonn.
- Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), Stabsstelle Öffentlichkeitsarbeit, 52425 Jülich.
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Hauptabteilung Bibliotheks- und Kommunikationsdienste, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe.
- Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde, Senator Dr. Vahrenholt, Billstraße 84, 20539 Hamburg.
- Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS), Hollestraße 7a, 45127 Essen.
- Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH (GRS), Schwertnergasse 1, 50667 Köln.
- Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF), Ingolstädter Landstraße 1, 91465 Neuherberg.
- Greenpeace Deutschland e.V., 20450 Hamburg.
- Informationskreis Kernenergie (IK), Heussallee 10, 53113 Bonn.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), Postfach 100, A-1400 Wien, Österreich.
- Internationale Energie-Agentur (IEA), 2, rue André Pascal, F-75775 Paris Cedex 16, Frankreich.
- Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke (RWE), Kruppstraße 5, 45128 Essen.
- Stadtarchiv Bonn, Stadthaus, Berliner Platz 2, 53111 Bonn.
- Stiftung Haus der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland, Bibliothek zur Geschichte der DDR, Adenauerallee 8, 53113 Bonn.
- Wirtschaftsverband Kernbrennstoffe-Kreislauf e.V. (WKK), Adenauerallee 90, 53113 Bonn.

Mein ganz besonderer Dank gilt den folgenden Personen (in alphabetischer Reihenfolge):

- Prof. Aumann (Literatursuche und gammaspektroskopische Untersuchung)
- Peter Benner (Versuch mit Paranußasche)
- Luitgardis Bothur (Korrekturlesen der Arbeit)
- Regina Faßbender (Leihgabe von Büchern)
- Prof. Klemmer (Didaktische und praktische Unterstützung)
- Dagmar Königstein (Autoradiographie)
- Volker Landsmann (Rasterelektronenmikroskop)
- Frau Nauke (Unterstützung bei den Versuchen)
- Petra Paeper (Modell des Druckwasserreaktors)