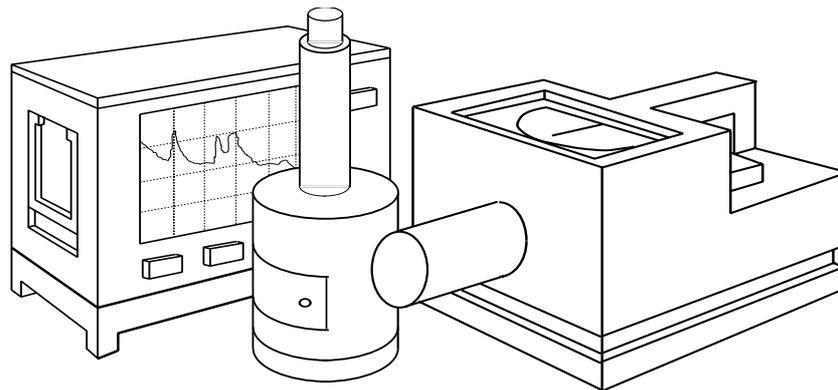


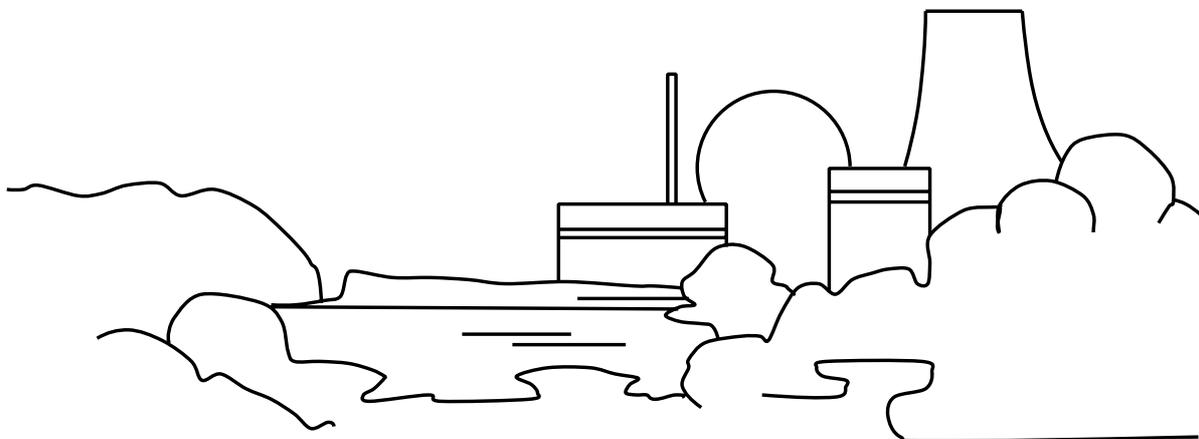
**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DRESDEN**
Institut für Energietechnik
Ausbildungskernreaktor



REAKTORPRAKTIKUM

VERSUCH

"BILDUNG UND ZERFALL RADIOAKTIVER ISOTOPE"



Praktikumsanleitung

Versuch “Bildung und Zerfall radioaktiver Isotope”

Gliederung:

1. Einleitung
2. Theoretische Grundlagen des Versuchs
 - 2.1. Wichtige Grundbegriffe der Radioaktivität
 - 2.2. Bildung radioaktiver Nuklide
 - 2.3. Zerfall radioaktiver Nuklide
 - 2.4. Mathematische Beschreibung der Bildung und des Zerfalls von Radionukliden
 - 2.5. Neutronenselbstabschirmung
3. Versuchsdurchführung
 - 3.1. Auswahl der zu aktivierenden Materialien
 - 3.2. Reaktorstart und Aktivierung der Proben
 - 3.3. Versuchsauswertung
 - 3.3.1. Beschreibung und Einstellungen der Messapparatur
 - 3.3.2. Ausmessen des Abklingverhaltens der aktivierten Materialien
 - 3.3.3. Bestimmung der Halbwertszeit
 - 3.3.4. Berechnung der Neutronenflussdichte am Bestrahlungsort
4. Strahlenschutz
5. Kontrollfragen

Stand: 12.05.2011

1. Einleitung

1896 stellte der französische Physiker Henry Becquerel eine bislang unbekannte Strahlung fest, die von Uransalzen ausgesandt wurde und in der Lage war, auf Fotoplatten eine Schwärzung hervorzurufen. Weitere Arbeiten von Becquerel sowie von Pierre und Marie Curie wiesen auch die Radioaktivität von Thorium nach und führten schließlich zur Entdeckung der radioaktiven Elemente Polonium und Radium. Jedoch erst die Anwendung von künstlich ausgelösten Kernreaktionen, die dem englischen Physiker Ernest Rutherford erstmals 1919 durch Beschuss von Stickstoffkernen mit α -Teilchen gelang, ermöglichte die Herstellung einer Vielzahl von künstlichen Radionukliden mit verschiedenen Eigenschaften. Seitdem, aber besonders in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts, nahmen die Methoden der angewandten Radioaktivität einen rasanten Aufschwung.

Künstliche radioaktive Isotope werden heute in erster Linie in Kernreaktoren durch Bestrahlung mit Neutronen aus der Kernspaltung in beinahe beliebiger Menge und Qualität hergestellt. Da heutzutage auch eine entwickelte Strahlenmesstechnik zur Verfügung steht, sind aus vielen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik oder der medizinischen Anwendung radiometrische Messverfahren nicht mehr wegzudenken. Dickenmessungen, Füllstandsmessungen, Durchstrahlungsanalysen, medizinische Bestrahlungen und radioaktive Markierungsverfahren sollen nur als Beispiele angeführt werden. Es ist jedoch gleichzeitig zu bemerken, dass Methoden der angewandten Radioaktivität wie andere Messverfahren auch nicht nur Vor- sondern auch artspezifische Nachteile in sich bergen. So erfordert der Umgang mit radioaktiven Materialien spezielle Vorsichts- und Sicherheitsmaßnahmen, die zur Vermeidung von Strahlenschäden strikt einzuhalten sind und ständig kontrolliert werden müssen.

Der durchzuführende Versuch soll das Prinzip der Herstellung künstlicher radioaktiver Isotope im Kernreaktor verdeutlichen und einige Eindrücke über die Eigenschaften von und den Umgang mit Radionukliden vermitteln. Dazu sollen ausgewählte Materialien im Reaktor aktiviert und deren Zerfallskurven nach Bestrahlungsende gemessen werden. Als eine der Möglichkeiten der angewandten Radioaktivität ist ein unbekanntes Material ebenfalls zu bestrahlen und mittels der aus der Zerfallskurve ablesbaren Halbwertszeit zu identifizieren.

2. Theoretische Grundlagen des Versuchs

2.1. Wichtige Grundbegriffe der Radioaktivität

Die chemischen Elemente des Periodensystems sind gekennzeichnet durch eine bestimmte Kernladungszahl des Atomkerns (Anzahl der Protonen) und einer zugehörigen Anzahl von Elektronen in der Atomhülle. Der Atomkern wird jedoch nicht nur von den Protonen, sondern zusätzlich von den Neutronen gebildet, die beide zusammen mit der Sammelbezeichnung Nukleonen (Kernbausteine) versehen werden. Nun gibt es Atomkerne ein und desselben Elements, d.h. mit der gleichen Protonenzahl, die aber unterschiedliche Neutronenzahlen im Kern ausweisen. Diese Atome werden als Isotope dieses Elements bezeichnet. Sie stehen an gleicher Stelle im Periodensystem, haben gleiche chemische Eigenschaften, aber unterschiedliche Massen. Zu den meisten Elementen existieren mehrere Isotope, die radioaktiv sein können oder nicht. Mit dem Begriff Nuklid wird dagegen eine beliebige Kernart, charakterisiert durch ihre Kernladungs- und Massenzahl, bezeichnet. Ist dieser Kern radioaktiv, haben wir es mit einem Radionuklid zu tun.

Wir können also zusammenfassen: Radionuklide sind radioaktive Kerne beliebiger (auch verschiedener) Elemente. Radioisotope beziehen sich dagegen immer auf ein bestimmtes Element. So sind z.B. $^{28}_{13}\text{Al}$ und $^{66}_{29}\text{Cu}$ zwei Radionuklide, $^{28}_{13}\text{Al}$ ist aber ein Radioisotop des Aluminium und $^{66}_{29}\text{Cu}$ ein Radioisotop des Kupfer.

Die Radioaktivität ist nun eine Eigenschaft mancher Atomkerne, sich ohne äußere Einwirkung umzuwandeln, d.h. sich in ihrer Kerzusammensetzung zu ändern. Ob eine solche Umwandlung von sich aus, also spontan, stattfindet oder nicht, hängt von der inneren Stabilität des Atomkerns ab, die z.B. vom Verhältnis der Protonen- zur Neutronenzahl bestimmt wird. So kommt es, dass von verschiedenen Isotopen ein und desselben Elements einige radioaktiv sein können und andere nicht. Radioaktive Kerne besitzen einen Energieüberschuss, den sie durch Emission von Strahlung und damit verbundener Kernumwandlung abgeben. Sie sind instabil. Die Emission der Strahlung ist nicht durch äußere Einwirkung zu beeinflussen.

Als Maß für die Radioaktivität eines Kernes wird die Anzahl der Umwandlungen pro Zeiteinheit definiert. Nach dem SI (Système International d'Unités) ist die Maßeinheit Becquerel verbindlich, und es gilt

$$1 \text{ Zerfall / s} = 1 \text{ Bq}$$

Mitunter trifft man noch auf die alte Maßeinheit 1 Ci (Curie), die historisch entstanden war und $3.7 \cdot 10^{10}$ Zerfällen / s entspricht (das ist die Aktivität von 1 g Radium).

Wichtige Kennzeichen radioaktiver Nuklide, die für praktische Anwendungen ihre Auswahl entscheidend beeinflussen, sind:

a) die emittierte Strahlenart

Wir unterscheiden α -Strahler (Emission von ^4_2He - Kernen)
 β^+ -Strahler (Emission von Positronen)
 β^- -Strahler (Emission von Elektronen)
 γ -Strahler (Emission elektromagnetischer Wellen)

b) die Energie der Strahlung

Für die Strahlungsenergie wird in der Kernphysik eine spezielle Maßeinheit definiert, das Elektronenvolt (Abkürzung eV, häufig verwendete abgeleitete Größenordnung keV bzw. MeV).

1 eV ist die Energie, die einem Elektron beim Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 V vermittelt wird, also gilt:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \text{ V} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

c) Halbwertszeit

Der Zerfall radioaktiver Nuklide führt zur Bildung neuer Nuklide, die ebenfalls wieder radioaktiv oder auch stabil sein können. Unter Halbwertszeit $T_{1/2}$ versteht man die Zeit, in der von der ursprünglich vorhandenen Menge eines Ausgangsnuklids nur noch die Hälfte vorhanden ist. Sie ist eine Konstante für jedes Radionuklid.

2.2. Bildung radioaktiver Nuklide

Radioaktive Nuklide werden aus stabilen Kernen durch Kernreaktionen gebildet, bei denen der Folgekern nach der Reaktion einen Energieüberschuss besitzt und diesen durch Strahlungs- bzw. Teilchenemission abbaut. Das zu bestrahlende Material wird als Target (engl.: Schießscheibe) bezeichnet. Als Geschossteilchen finden Protonen, Neutronen, Deuteronen, α -Teilchen und γ -Quanten Anwendung.

Zur Erzeugung künstlicher radioaktiver Nuklide dienen vorwiegend:

- a) Austauschreaktion, d.h. ein Geschossteilchen x dringt in den Targetkern ein, und ein anderes Teilchen y wird emittiert. Wenn x und y verschiedene Ladungen tragen, tritt eine Elementumwandlung ein.
- b) Einfangreaktion, bei der das Geschossteilchen x vom Targetkern absorbiert wird. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von γ -Strahlung abgegeben.
- c) Kernspaltung, wobei bestimmte schwere Atomkerne durch Neutronen oder geladene, sehr energiereiche Geschosspartikel in nahezu gleichgroße Bruchstücke gespalten werden. Dies geschieht z.B. im Brennstoff eines Kernreaktors, wo die entstehenden Radionuklide als Abfallprodukt unerwünscht sind.

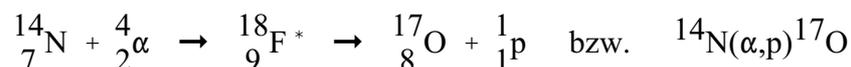
Der Mechanismus der Kernreaktionen kann in zwei Schritte unterteilt werden. Im ersten wird das Geschosspartikel vom Kern absorbiert. Die Bindungsenergie des Partikels wird frei, zusätzlich erhält der Kern die kinetische Energie des Geschossteilchens. Es entsteht ein hochangeregter, sehr instabiler Zwischenkern (auch Compoundkern genannt), der sich im zweiten Schritt innerhalb sehr kurzer Zeit (mittlere Lebensdauer $<10^{-17}$ s) durch Emission von Teilchen oder γ -Quanten bzw. Spaltung abregt.

Kernreaktionen werden in folgender Schreibweise dargestellt:



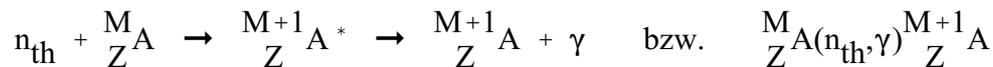
Hierbei bedeuten x Geschosspartikel, y das beim Zerfall des Zwischenkerns emittierte Teilchen, A Targetkern, B Kern nach der Reaktion und C* Zwischenkern.

Ein Beispiel für derartige Reaktionen ist



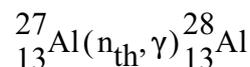
Im Kernreaktor werden radioaktive Nuklide im wesentlichen durch Einfangreaktionen mit thermischen Neutronen hergestellt. Thermische Neutronen haben im Mittel eine Energie von 0.025 eV und somit bei Zimmertemperatur eine Geschwindigkeit von ca. 2200 m/s.

Die Einfangreaktionen laufen nach folgendem Schema ab:

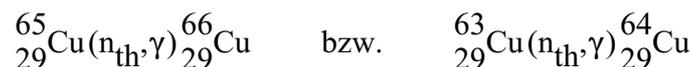


wobei M die Massenzahl und Z die Kernladungszahl bedeuten. Das Element A bleibt also erhalten; es bildet sich lediglich ein anderes Isotop mit einer um Eins größeren Massenzahl. Da sich damit das Protonen-zu-Neutronen-Verhältnis ändert, sind die gebildeten Isotope meist radioaktiv.

Für die im Versuch verwendeten Materialien Aluminium und Kupfer ergeben sich die folgende Darstellungen:



Natürliches Kupfer enthält 2 verschiedene Isotope und zwar ${}_{29}^{65}\text{Cu}$ (30.9 %) und ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ (69.1 %). Beide Isotope werden aktiviert nach



2.3. Zerfall radioaktiver Nuklide

Die Stabilität oder Instabilität eines Atomkerns hängt von seiner Zusammensetzung ab. Sie bestimmt die Art des Zerfalls und die Geschwindigkeit der Umwandlung. Die wichtigsten Eigenschaften eines Radionuklids sind wie schon erwähnt die Art der emittierten Strahlung, ihre Energie und die Halbwertszeit. Alle diese Größen sind in Tabellen zu finden. Einen guten Überblick gewinnt man durch ein grafisches Zerfallsschema. Es stellt die Art der Strahlung, die Energieverluste, die Änderung der Kernladungszahl sowie die relative Häufigkeit der einzelnen Zerfallswege dar.

Im Zerfallsschema bedeuten senkrechte Abstände Energieveränderungen, Verschiebungen nach rechts einen Zuwachs an positiver Ladung (Umwandlung in ein Element höherer Ordnungszahl z. B. durch Emission eines Elektrons) und Verschiebungen nach links einen Verlust positiver Ladung (Umwandlung in ein Element niedrigerer Ordnungszahl z.B. durch Emission eines β^+ -Teilchens). Die Energieniveaus der Kerne werden durch horizontale Linien dargestellt. Die Größe der Energieveränderungen wird rechts neben den Niveaus in keV oder MeV angegeben.

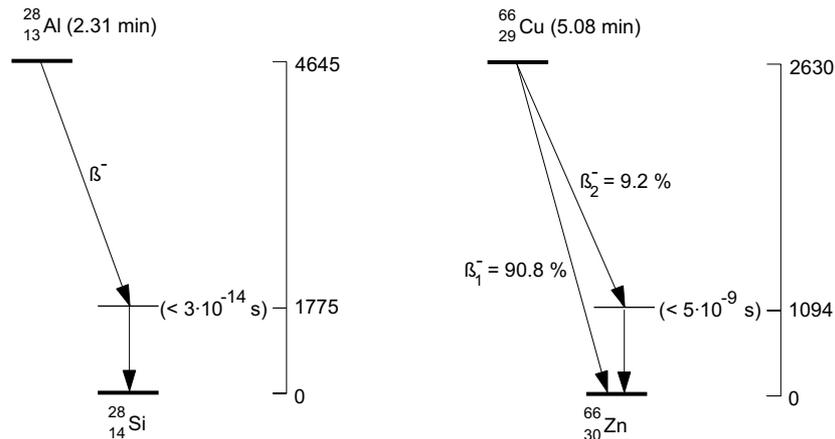


Abb. 1, Beispiele für Zerfallsschemata (für $^{28}_{13}\text{Al}$ und $^{66}_{29}\text{Cu}$)

2.4. Mathematische Beschreibung der Bildung und des Zerfalls von Radionukliden

Zunächst kommt es darauf an, die Anzahl der pro Zeit- und Volumeneinheit im Aktivierungsmaterial stattfindenden Einfangreaktionen quantitativ zu erfassen. Die Anzahl der Aktivierungen pro Sekunde in einem Kubikzentimeter Probenmaterial bezeichnet man auch als Aktivierungsrate R , die sich nach folgender Beziehung berechnen lässt:

$$R = N \cdot \sigma \cdot \Phi \quad (1)$$

Hierbei ist N die Anzahl der Atomkerne pro cm^3 im Aktivierungsmaterial. N wird nach der Formel

$$N = N_L \frac{\rho}{AG} \quad (2)$$

mit der LOSCHMIDT'schen Zahl $N_L = 6.025 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, der Dichte ρ (in g/cm^3) und des Atomgewichts AG der Aktivierungsprobe berechnet.

Der mikroskopische Wirkungsquerschnitt σ ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der zur Aktivierung führenden Kernreaktion des Neutroneneinfangs. σ kann man sich als Fläche vorstellen, die ein Atomkern den Neutronen darbietet, ist allerdings nicht unbedingt identisch mit dem geometrischen Querschnitt des Kerns. Trifft ein Neutron diese Fläche, dann findet eine Kernreaktion statt. σ liegt also in der Größenordnung der Kernfläche und wird daher zweckmäßigerweise in Einheiten von 10^{-24} cm^2 gemessen. Diese Einheit wird barn genannt und mit b abgekürzt. Der genaue Wert von σ wird durch die kernphysikalische Reaktionswahrscheinlichkeit bestimmt, die von der Geschwindigkeit des Neutrons, d.h. seiner Energie, abhängt. Für jeden Typ von Kernreaktion existiert ein Wirkungsquerschnitt, also neben dem der Aktivierungsreaktion

gibt es auch je ein σ für z.B. elastische oder unelastische Streuung oder Spaltung. Der totale Wirkungsquerschnitt ist dann die Summe der Wirkungsquerschnitte der Einzelreaktionen.

Das Produkt $N \cdot \sigma$ bezeichnet man auch als makroskopischen Wirkungsquerschnitt Σ , der aber im Gegensatz zu σ die Maßeinheit einer reziproken Länge trägt. $1/\Sigma$ ist dann die mittlere freie Weglänge eines Neutrons im Probenmaterial.

$$\Sigma = N \cdot \sigma \qquad l = \frac{1}{\Sigma} \qquad (3)$$

Die Neutronenflussdichte Φ schließlich enthält die Aussage, wieviel Neutronen pro Zeiteinheit durch eine Flächeneinheit am Aktivierungsort treten. Die Maßeinheit für die Neutronenflussdichte Φ ist folglich $1 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. In der Spaltzone thermischer Kernreaktoren beträgt die Neutronenflussdichte ca. $10^7 \text{ 1}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ in Nullleistungsreaktoren und ca. $10^{13} \dots 10^{14} \text{ 1}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ in größeren Forschungsreaktoren.

Um die Anzahl der nach einer bestimmten Bestrahlungszeit t_b vorhandenen radioaktiven Kerne zu berechnen darf nun nicht etwa die Reaktionsrate R mit t_b multipliziert werden, da ja bereits mit der Bildung des radioaktiven Isotops gleichzeitig sein Zerfall einsetzt. Das Problem der Bildung und des Zerfalls muss also zusammen behandelt werden, und daher wenden wir uns zunächst des reinen Zerfalls eines bereits aktivierten Nuklids zu.

Es sei K die Anzahl der bereits vorhandenen radioaktiven Kerne in einem Präparat. Die Aktivität A ist gemäß ihrer Definition durch die Anzahl der pro Zeiteinheit stattfindenden Zerfälle, d.h. durch die Abnahme der vorhandenen radioaktiven Kerne pro Zeiteinheit gegeben. Wegen des statistischen Charakters des radioaktiven Zerfalls ist die Aktivität der Anzahl der gerade insgesamt vorhandenen Kerne proportional und es gilt folglich:

$$A = -\frac{dK}{dt} = \lambda \cdot K \qquad (4)$$

Das ist die Differentialgleichung des radioaktiven Zerfalls mit λ als Zerfallskonstante, die mit der Halbwertszeit $T_{1/2}$ über die Beziehung

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \qquad (5)$$

zusammenhängt.

Aus Gleichung (4) erhält man nach der Methode der Trennung der Variablen als Lösung das bekannte exponentielle Zerfallsgesetz

$$K(t) = K_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \qquad (6)$$

wobei K_0 die Anzahl der radioaktiven Kerne zu einer Anfangszeit $t = 0$ (bei unserem Problem

nach dem Ende der Bestrahlung) bedeutet.

Nach welchem Zeitgesetz vollzieht sich nun der Aufbau der Aktivität durch die Aktivierung ? Bei dieser Fragestellung müssen wir von einer Differentialgleichung ausgehen, die gegenüber der des reinen Zerfalls um ein Glied abgeändert wird, das die konstante Nachlieferung radioaktiver Kerne gemäß der Aktivierungsrate R berücksichtigt:

$$\frac{dK}{dt} = -\lambda \cdot K + \Sigma \cdot \Phi \quad (7)$$

Die Anfangsbedingung lautet hier $K(t=0) = 0$, d.h. zu Beginn der Bestrahlung sind keine radioaktiven Kerne in der Probe vorhanden. Es ergibt sich die Lösung

$$K(t) = \frac{\Sigma \cdot \Phi}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda \cdot t)] \quad (8)$$

Gemäß Gleichung (4) gilt $A(t) = \lambda \cdot K(t)$, so dass wir Gleichung (8) auch in die Schreibweise der Aktivität umformen können

$$A(t) = \Sigma \cdot \Phi \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t)] \quad (9)$$

Man sieht, dass der Klammerausdruck bei steigender Bestrahlungszeit gegen 1 strebt und als Grenzwert eine maximal erreichbare Aktivität existiert, die als Sättigungsaktivität A_s bezeichnet wird

$$A(t \rightarrow \infty) = A_s = \Sigma \cdot \Phi \quad (10)$$

Dann werden pro Zeiteinheit gerade soviel radioaktive Kerne nachgebildet wie auch wieder zerfallen. Man kann leicht nachrechnen, dass schon nach einer Bestrahlungsdauer von 5 Halbwertszeiten 97 % der Sättigungsaktivität erreicht werden. In der Praxis hat es dann kaum Sinn, eine zu aktivierende Probe länger zu bestrahlen.

Nun führen wir Zeitdauern ein, die das Zeitregime bzgl. Bestrahlung und Abklingen der Aktivität kennzeichnen. t_b sei die Bestrahlungszeit und t_a die Abklingzeit nach Ende der Aktivierung. Aus (8) ergibt sich die Anzahl der aktiven Kerne nach Bestrahlungsende

$$K(t_b) = \frac{\Sigma \cdot \Phi}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda \cdot t_b)]$$

Dieser Ausdruck ist als K_0 in Gleichung (6) einzusetzen. Für das Zeitverhalten des Radionuklids nach Ende der Bestrahlung gilt also

$$K(t_a) = \frac{\Sigma \cdot \Phi}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda \cdot t_b)] \cdot \exp(-\lambda \cdot t_a)$$

bzw. wieder in der Schreibweise der Aktivität

$$A(t_a) = \Sigma \cdot \Phi \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_b)] \cdot \exp(-\lambda \cdot t_a) \quad (11)$$

In Abb. 2 ist der zeitliche Verlauf des Aufbaus der Aktivität und des Zerfalls nach Bestrahlungs-ende grafisch dargestellt.

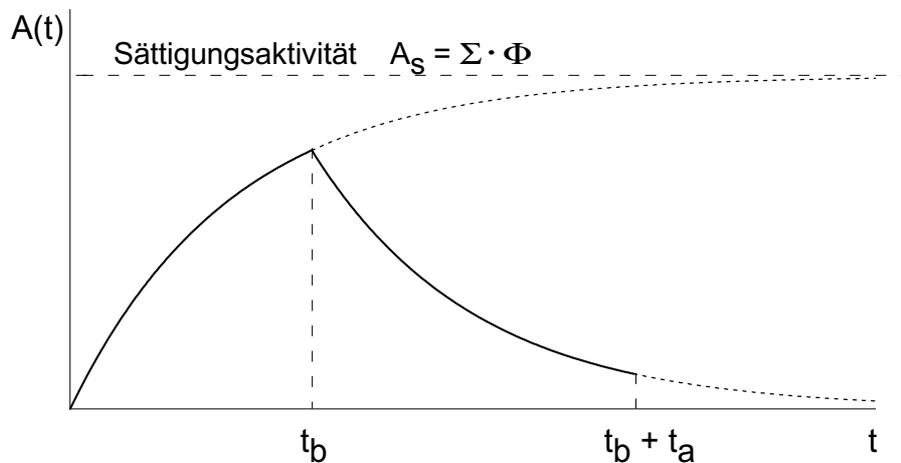
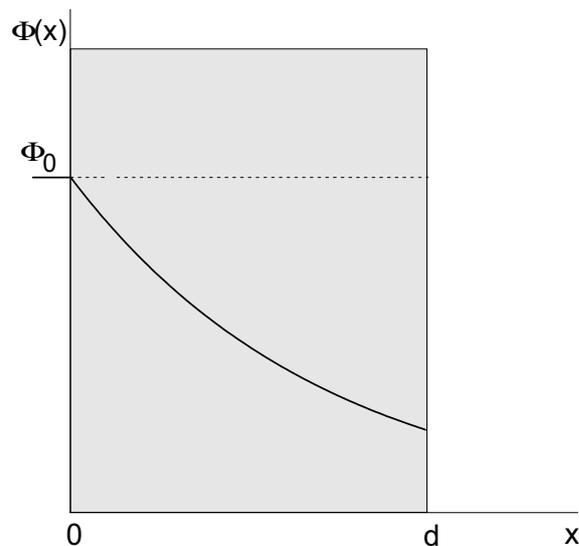


Abb. 2, Zeitlicher Verlauf der Aktivierung und des Zerfalls eines Radionuklids

2.5. Neutronenselbstabschirmung



Will man Gleichung (1) für die Reaktionsrate im zu aktivierenden Material anwenden, so ist das nur möglich, wenn die Neutronenflussdichte innerhalb der Probe nicht absinkt. Gerade das ist aber in der Praxis häufig der Fall. Die Situation ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. Man muss sich vorstellen, dass die Neutronen von links senkrecht auf die Platte fallen.

Abb. 3, Schwächung der Neutronenflussdichte innerhalb einer absorbierenden Platte der Dicke d

Finden innerhalb der Platte keine Streuungen, sondern nur Absorptionen statt, so gilt in der Platte die Beziehung

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot \exp(-\Sigma \cdot x) \quad (12)$$

wobei Σ der makroskopische Wirkungsquerschnitt für Absorption ist.

Da die zu aktivierenden Proben stets eine gewisse räumliche Ausdehnung haben, findet in ihnen eine derartige Flussabsenkung immer statt. In der Praxis sind die Verhältnisse allerdings wegen der Winkelverteilung der Neutronen und der oft nicht plattenförmigen Geometrie noch komplizierter.

Die Selbstabschirmungseffekte fallen dann beträchtlich ins Gewicht, wenn

- a) der Absorptionsquerschnitt groß ist und/oder
- b) die Proben sehr dick sind.

3. Versuchsdurchführung

3.1. Auswahl der zu aktivierenden Materialien

Wie eingangs erwähnt spielen vom radiologischen Standpunkt die emittierte Strahlenart des Radionuklids, die Energie der Strahlung und seine Halbwertszeit bei der Auswahl des Materials die entscheidende Rolle. Darüber hinaus können praktische Fragen wie die nach unkomplizierter Handhabbarkeit, Wärmebeständigkeit, Verfügbarkeit, Löslichkeit, geringe Toxizität u.a. die Wahl beeinflussen.

Im Praktikumsversuch werden scheibenförmige Proben von 1 mm Stärke und ca. 30 mm Durchmesser der Elemente Kupfer und Aluminium aktiviert. Eine dritte, unbekannte Probe ist ebenfalls zu aktivieren und anhand der festzustellenden Halbwertszeit zu identifizieren. Tab. 1 enthält die notwendigen Daten für Kupfer und Aluminium. Die Dichten von Aluminium und Kupfer betragen 2.70 bzw. 8.92 g/cm³. Die Massen der Proben in Gramm sind in die Scheiben eingeschlagen.

Element	aktivierbares Nuklid	Häufigkeit im Element	$\sigma(n_{th}, \gamma)$	aktiviertes Nuklid	$T_{1/2}$	Strahlung des Nuklids
Al	$^{27}_{13}\text{Al}$	100 %	0.215 b	$^{28}_{13}\text{Al}$	2.3 min	2.87 MeV β^- 1.78 MeV γ
Cu	$^{63}_{29}\text{Cu}$	69.1 %	4.3 b	$^{64}_{29}\text{Cu}$	12.8 h	0.57 MeV β^- 0.66 MeV β^+ 1.35 MeV γ
	$^{65}_{29}\text{Cu}$	30.9 %	2.1 b	$^{66}_{29}\text{Cu}$	5.1 min	2.63 MeV β^- 1.5 MeV β^- 1.04 MeV γ

Tab. 1, Angaben zu den Aktivierungsproben

Man sieht, dass im Element Kupfer zwei Isotope mit unterschiedlichen Halbwertszeiten aktiviert werden. Das ist beim Ausmessen der Zerfallskurve zu beachten.

3.2. Reaktorstart und Aktivierung der Proben

Am Reaktor ist die Sicherheitsüberprüfung vorzunehmen, und der Reaktor ist zu starten. Bei einer Leistung von 2 W wird er kritisch gemacht.

Die Bestrahlung erfolgt im Kanal 3, der unmittelbar an der Spaltzone vorbeiführt. Der Deckel des Bestrahlungskanals wird geöffnet, und die erste Probe kann mit einem Manipulator eingeschoben werden. Die Eintauchtiefe beträgt exakt 1.25 m. Dann befindet sie sich unmittelbar an der Spaltzone des Reaktors.

Da die Halbwertszeit von Al und Cu nur einige Minuten beträgt und damit die Aktivität nach Bestrahlungsende schnell absinkt, müssen die Proben nacheinander bestrahlt und sofort ausgemessen werden. Die Bestrahlungszeit beträgt jeweils genau 10 min.

3.3. Versuchsauswertung

3.3.1. Beschreibung und Einstellungen der Messapparatur

Gemessen wird die Strahlung der aktivierten Cu- und Al-Atomkerne. Als Strahlungsdetektor dient ein Szintillator, in dem beim Auftreffen von Strahlung durch atomare Wechselwirkungen Lichtblitze (Szintillationen) entstehen. Diese Lichtblitze werden in der Fotokathode eines Sekundärelektronenvervielfachers (SEV) in Fotoelektronen umgewandelt (durch fotoelektrischen Effekt). Zwischen der Kathode und der Anode des SEV befindet sich eine Reihe von Zwischenelektroden (Dynoden). Zwischen je zwei Dynoden liegt ein Teil der an den SEV geschalteten Hochspannung an, so dass die Elektronen so stark beschleunigt werden, dass sie an der nächsten Dynode durch Stoßionisation weitere Elektronen herausreißen. Mit dem SEV werden somit Lichtblitze in elektrische Strom- bzw. Spannungsimpulse umgewandelt und sehr rauscharm verstärkt. Die Spannungsimpulse werden in einem nachgeschalteten elektronischen Verstärker weiter verstärkt und in einem Impulszähler gezählt. Den prinzipiellen Aufbau der Messanordnung zeigt Abb. 4.

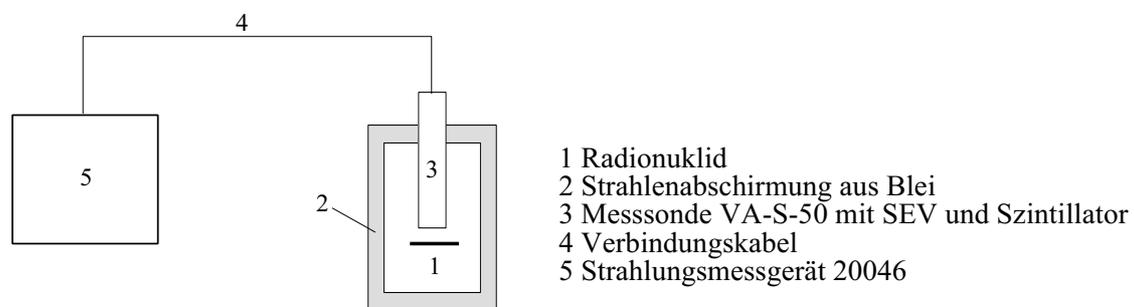


Abb. 4, Aufbau des Strahlungsmessplatzes

Am Strahlungsmessgerät werden die folgenden Parameter eingestellt:

Pegel	5.7 V
Hochspannung	- 1140 V (5.70 am Wendepotentiometer)
Verstärkung	22 dB
Messzeit	6 s = $1 \cdot 10^{-1}$ min
Kanalbreite	DIS

Die Bleiabschirmung dient weniger der Senkung des Strahlungspegels von innen nach außen als vielmehr der Absorption der Untergrundstrahlung von außen auf Grund des Reaktorbetriebes. Dieser Untergrund würde am un abgeschirmten Detektor eine beträchtliche Zahl von Störimpulsen auslösen.

3.3.2. Ausmessen des Abklingverhaltens der aktivierten Materialien

Vor dem Ausmessen der bestrahlten Proben wird jeweils ca. 5 x der Nulleffekt während 6 s gemessen und der Durchschnittswert gebildet. Strahlung, die trotz der Bleiabschirmung von außen auf den Szintillator gelangt, verursacht stets einen geringen Untergrund, der später auch dem Messeffekt überlagert ist und abgezogen werden muss.

Die am Reaktor bestrahlten Proben werden nach exakt 10 min aus dem Bestrahlungskanal genommen, sofort auf dem Probenhalter unter den Szintillator geschoben und ausgemessen. Die Zeit des Bestrahlungsendes muss exakt registriert und als Nullpunkt der Abklingzeit genommen werden.

Die Zahl der Impulse während jeweils 6 s wird im Abstand von 1 min über 10 - 15 min hinweg gemessen. Die gemessene Zeitabhängigkeit der Zählrate ist nach Abzug des Untergrundes grafisch geeignet darzustellen.

3.3.3. Bestimmung der Halbwertszeit

Die Halbwertszeiten für das Kupferisotop ^{66}Cu und für ^{28}Al sind aus der Abklingkurve zu bestimmen. Anhand der Abklingkurve und der daraus ermittelten Halbwertszeit ist schließlich die Probe aus dem unbekanntem Material zu identifizieren. Damit soll die prinzipielle Möglichkeit der Identifikation eines unbekanntem Materials durch die Aktivierungsanalyse erläutert werden. Führen Sie für jede Halbwertszeitbestimmung eine einfache Fehlerabschätzung durch. Sie beruht darauf, dass jede gemessene Zählrate mit einem statistischen Fehler behaftet ist. Aus der POISSON-Verteilung folgt, dass eine Zählrate Z mit einem statistischen Fehler $\Delta Z = \pm\sqrt{Z}$ gemessen wird. Tragen Sie diesen Fehler für einige Punkte in die Abklingkurve ein und bestimmen Sie dann grafisch die möglichen Abweichungen der Halbwertszeit.

3.3.4. Berechnung der Neutronenflussdichte am Bestrahlungsort

Der Zusammenhang zwischen der Neutronenflussdichte Φ am Bestrahlungsort und der Aktivität des Präparats pro Volumeneinheit nach Bestrahlungsende wird nach der Beziehung (9) hergestellt, wenn $t = t_b$ gesetzt wird. Dazu wird die Abklingkurve zum Nullpunkt $t = 0$ extrapoliert (entspricht der Zählrate zum Zeitpunkt t_b). Da uns jedoch nicht die Aktivität pro Volumeneinheit, sondern die der ganzen Sonde interessiert, muss Gleichung (9) noch mit dem Volumen der Sonde

multipliziert werden.

Dieser Wert darf nun aber nicht etwa der Aktivität gleichgesetzt werden, es besteht aber Proportionalität. In den Proportionalitätsfaktor gehen z.B. der Geometriefaktor und die Effektivität des Zählvorgangs ein. So treffen nicht alle emittierten Strahlungspartikel auf den Szintillator, ein Teil geht nach unten und den Seiten verloren (Geometriefaktor). Und selbst die Teilchen, die den Szintillator treffen, erzeugen nicht immer einen Lichtblitz, der im SEV registriert wird (Effektivität, energieabhängig!). Der Proportionalitätsfaktor wurde für das Kupferpräparat experimentell bestimmt und beträgt $C \approx 0.01$.

Analog (9) können wir also schreiben

$$Z(t_b) - n_0 = C \cdot V \cdot A(t_b) = C \cdot V \cdot \Sigma \cdot \Phi \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_b)] \quad (13)$$

$Z(t_b)$ ist die extrapolierte gemessene Zählrate für $t_a = 0$

n_0 ist der Nulleffekt, der von der gemessenen Zählrate abgezogen werden muss

Zusätzlich zu berücksichtigen ist, dass der Anteil der ^{65}Cu -Atomkerne nur 30.9 % im natürlichen Kupfer beträgt.

Durch Umformen von (13) erhält man also zur Berechnung der Neutronenflussdichte

$$\Phi = \frac{(Z(t_b) - n_0) \cdot AG}{C \cdot m \cdot 0.309 \cdot N_L \cdot \sigma \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_b)]} \quad (14)$$

Bemerkung: Korrekterweise liefert natürlich auch das aktivierte Isotop ^{64}Cu einen Beitrag zur gemessenen Zählrate. Wie in Übungsaufgabe (9) berechnet wird, beträgt dieser Anteil jedoch nur 10 % und soll hier vernachlässigt werden.

4. Strahlenschutz

Der Umgang mit Radionukliden erfordert spezielle Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen, um jegliche Gefährdung der Gesundheit auszuschließen und um eine unkontrollierte Verbreitung radioaktiven Materials zu verhindern. Durch strikte Einhaltung der Strahlenschutzmaßnahmen muss sich jeder an die besondere Arbeitstechnologie beim Umgang mit Strahlung gewöhnen. Das ist ein Lernprozess, der bei regelmäßigem Kontakt mit Radionukliden zur Gewohnheit werden muss.

Speziell bei diesem Versuch ist zu beachten:

1. Durch Wischtest überprüfen, ob der geöffnete Bestrahlungskanal kontaminationsfrei ist.
2. Niemals mit dem Körper direkt vor dem geöffneten Bestrahlungskanal stehen, sondern beim Hineinstecken der Präparate seitlich herantreten.

3. Beim Herumgehen um den Reaktor möglichst so laufen, dass der geöffnete Kanal nicht passiert wird.
4. Arbeitsablauf vorher genau planen, um Aufenthaltsdauer am geöffneten Kanal und Zeit beim Umgang mit der aktivierten Probe zu minimieren.
5. Aktiviertes Präparat nicht direkt mit den Händen anfassen, sondern zur Vergrößerung des Abstandes Zange oder Pinzette benutzen. Während der Manipulationen mit dem Präparat Gummihandschuhe tragen.

5. Kontrollfragen

1. Was versteht man unter dem Begriff Radioaktivität ?
2. Machen Sie sich die Begriffe Element - Isotop - Nuklid klar !
3. Worin sehen Sie den Unterschied zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität ?
4. Was drückt das Zerfallsschema eines Radionuklids aus ?
5. Wonach richtet sich die Auswahl radioaktiver Nuklide für einen bestimmten Verwendungszweck? Nehmen Sie als Beispiel Füllstandsmessungen in einem Lagerbehälter oder die Einnahme eines radioaktiven Medikaments in den menschlichen Körper zur Markierung!
6. Wieviel Prozent der Sättigungsaktivität werden nach einer Bestrahlungsdauer der 2-, 4- und 7-fachen Halbwertszeit erreicht? Ziehen Sie daraus Schlussfolgerungen für die notwendige Bestrahlungsdauer eines Nuklids bei der Aktivierung!
7. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit für ein thermisches Neutron, dass es bis ins Zentrum einer 1 mm starken Kupfer- bzw. Goldsonde gelangt, wenn es senkrecht auf die Oberfläche auftrifft? ($\sigma (n_{th}, \gamma)$ für Au-197 = 98.7 b, $\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$)
8. Welche Besonderheit ergibt sich beim Auftragen der Abklingkurve von natürlichem Kupfer? Denken Sie dabei an die Zusammensetzung des Elements!
9. Berechnen Sie die Aktivität der beiden bestrahlten Proben (Cu und Al) nach 10-minütiger Bestrahlungszeit, wenn als thermische Neutronenflussdichte $\Phi_{th} = 10^7 \text{ n/(cm}^2 \cdot \text{s)}$ angenommen wird! Warum ist die am Strahlungsmessplatz gemessene Zählrate geringer?
10. Erläutern Sie qualitativ den Detektionsprozess mit Szintillator und Sekundärelektronenvervielfacher!