

RM3: Neutronenaktivierung

Einleitung

Durch Neutronen induzierte Radioaktivität spielt eine entscheidende Rolle bei der Stilllegung von Kernkraftwerken und Fusionsreaktoren, da das Verständnis der Neutronenwechselwirkungen dabei von zentraler Bedeutung ist. Diese Reaktionen sind zudem von Bedeutung in der nuklearen Astrophysik. Ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung von neutroneninduzierten Reaktionen ist der *Wirkungsquerschnitt*, bezeichnet mit σ . Dieser ist definiert als die mittlere Anzahl der Wechselwirkungen pro Targetkern, geteilt durch die *Fluenz*. Die *Fluenz* stellt die durchschnittliche Anzahl von Teilchen, insbesondere Neutronen, pro Flächeneinheit dar. Dabei ist die Fläche senkrecht zur Bewegungsrichtung der Neutronen orientiert, um eine gleichmäßige Berücksichtigung aller Richtungen zu gewährleisten. Die zeitliche Ableitung der Fluenz wird Flussdichte φ genannt.

Der Wirkungsquerschnitt σ hängt von der Energie der beteiligten Neutronen ab. Wenn Neutronen aus einem Atomkern freigesetzt werden, besitzen sie kinetische Energie. In der hier verwendeten Neutronenquelle entstehen Neutronen durch den Beschuss von Beryllium mit Alphateilchen aus einem Alpha-Strahler. Dabei werden Neutronen mit Energien bis zu 11 MeV freigesetzt. Diese Neutronen werden anschließend in einem Moderator gestreut, wobei viele von ihnen abgebremst und zu *thermischen Neutronen* werden. Thermische Neutronen zeichnen sich durch kinetische Energien im Bereich von mehreren zehn meV aus.

Neutronenwechselwirkung

Der *Q-Wert* ist ein entscheidender Parameter zur Klassifizierung von Neutronenwechselwirkungen. Er beschreibt die Differenz der Ruhemasse aller Reaktionspartner vor und nach einer Reaktion. Bei der elastischen Streuung tauschen die Reaktionspartner Impuls und Energie aus, ohne ihre Identität zu verändern, was zu einem Q-Wert von null führt. Diese Art der Wechselwirkung ist allgegenwärtig und spielt eine wichtige Rolle bei der Abbremsung schneller Neutronen – insbesondere in wasserstoffreichen Materialien wie Polyethylen und Wasser. Dieser Prozess wird als *Moderation* bezeichnet.

Schwellenreaktionen treten auf, wenn der Q-Wert negativ ist, was bedeutet, dass Energie benötigt wird, um die Reaktion auszulösen. Solche Reaktionen können nur durch schnelle Neutronen mit ausreichender Energie induziert werden, wie es beispielsweise bei (n; p)-Reaktionen der Fall ist. Ein Beispiel dafür ist



Auf der anderen Seite erfolgt der *Neutroneneinfang* hauptsächlich durch (n; γ)-Reaktionen an stabilen Nukliden. Diese sind durch einen positiven Q-Wert gekennzeichnet und setzen Energie in Form von Photonen frei. Zum Beispiel



Bei diesen Reaktionen haben langsamere Neutronen eine höhere Wahrscheinlichkeit zu reagieren, da der Wirkungsquerschnitt mit zunehmender Neutronengeschwindigkeit abnimmt.

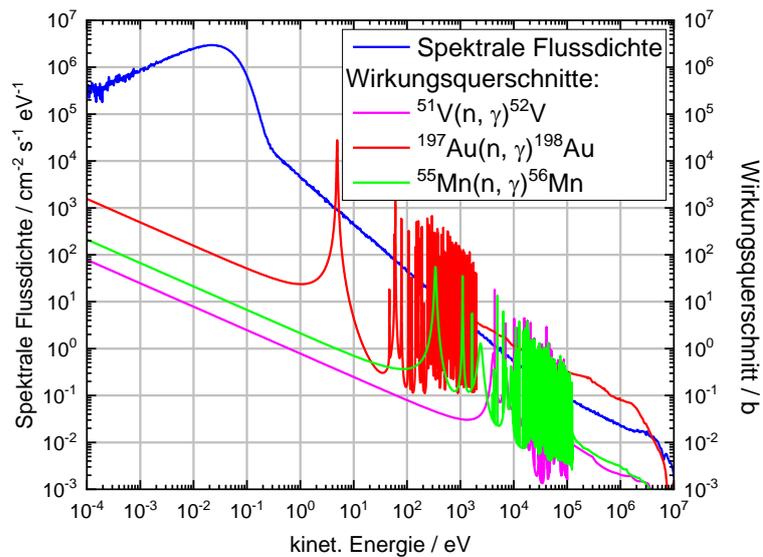


Abbildung 1: Spektrale Flussdichte der Neutronen und Wirkungsquerschnitte einiger Einfang-Reaktionen.

Im thermischen Energiebereich zeigen die Wirkungsquerschnitte eine gleichmäßige und reine umgekehrt proportionale Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, was mit dem breiten Maximum (durch die thermische Maxwellverteilung) in der spektralen Flussdichte dazu führt, dass dieser Bereich für die meisten Reaktionen verantwortlich ist. Bei höheren Energien treten Resonanzspitzen in den Wirkungsquerschnitten auf, die bestimmten Energieniveaus innerhalb der Kernstruktur entsprechen. Gold ist hierbei aufgrund seiner ausgeprägten Niederenergie-Resonanz besonders hervorzuheben und spielt eine zentrale Rolle bei der Bestimmung der reinen thermischen Flussdichte. Eine differenzielle Messung an Gold erfolgt durch die Aktivierung zweier Proben, wobei eine mit Cadmium abgeschirmt wird. Da ^{113}Cd Neutronen unterhalb von 0.5 eV effizient absorbiert, ermöglicht diese Methode eine präzise Erfassung thermischer Neutronenwechselwirkungen.

Aktivierung

Befindet sich die Probe im Neutronenfeld, folgt die Anzahl der radioaktiven Nuklide der folgenden Differentialgleichung:

$$dN_{ac}(t) = N_{st} \left(\int \sigma(E) \frac{d\varphi}{dE} dE \right) dt - N_{ac}(t) \lambda dt \quad (1)$$

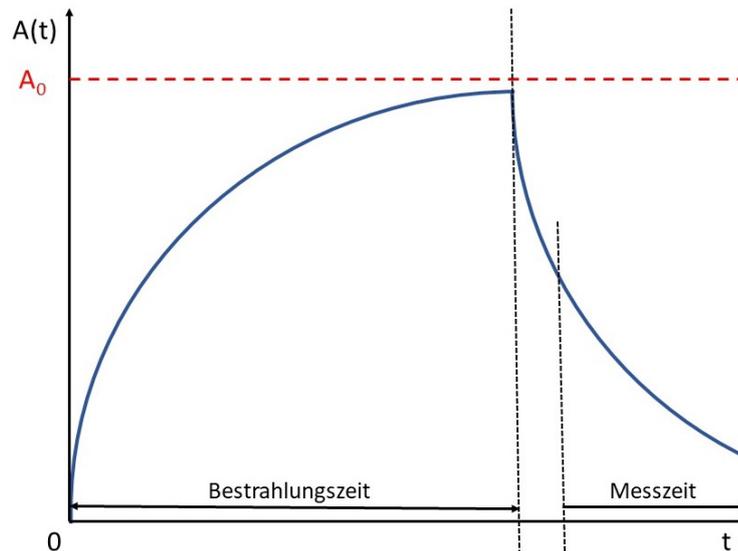


Abbildung 1. Zeitlicher Verlauf der Anzahl aktivierter Kerne. Im monoton ansteigenden Abschnitt ist die Probe der Neutronenstrahlung ausgesetzt. Im exponentiell abfallenden Abschnitt wurde die Probe zur Messung aus dem Neutronenfeld entfernt.

wobei:

$N_{ac}(t)$ Anzahl der aktivierten Kerne zum Zeitpunkt t

N_{st} Anzahl der stabilen Isotope

$\sigma(E)$ Aktivierungs-Wirkungsquerschnitt

$\frac{d\varphi}{dE}$ spektrale Flussdichte

λ Zerfallskonstante des aktivierten Isotops

Die Anzahl der aktivierten Kerne ändert sich somit durch zwei Prozesse: die Aktivierung durch den Neutronenfluss und den Zerfall der bereits aktivierten Kerne. Durch Lösen der Differentialgleichung ergibt sich für die Anzahl der aktivierten Kerne in Abhängigkeit von der Zeit:

$$N_{ac}(t) = N_{st} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \int \frac{d\varphi}{dE} \sigma(E) dE$$

Daraus folgt, dass $N_{ac}(t)$ monoton zunimmt (siehe Abbildung 2) bis die Probe nach ausreichend langer Bestrahlungszeit die Sättigungsaktivität $A_0 = N_{ac}(t \rightarrow \infty)$ erreicht:

$$A_0 = N_{st} \int \sigma(E) \frac{d\varphi}{dE} dE$$

Wird die Probe aus der Neutronenquelle entfernt, bleibt im Ausdruck aus Gleichung (1) nur noch der Zerfallsterm übrig. Dieser beschreibt den exponentiellen Zerfall der Anzahl aktivierter Kerne — ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt.

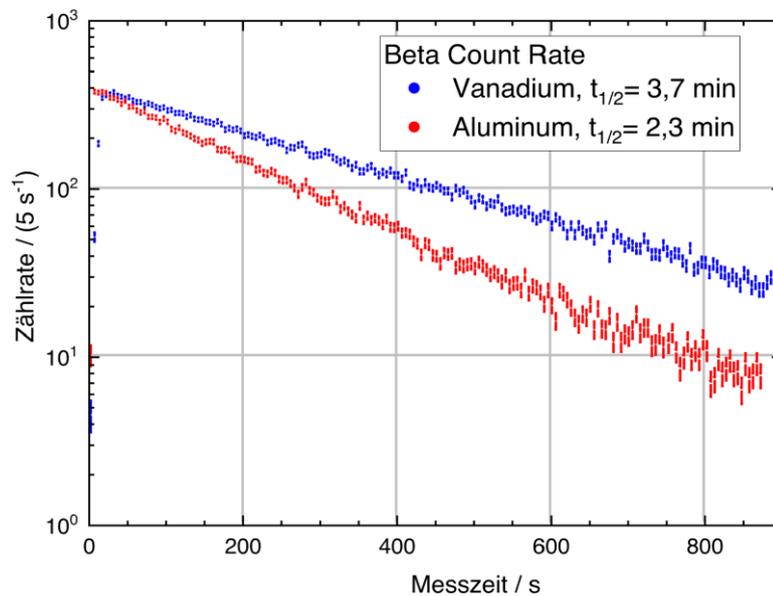


Abbildung 2. Beispiel einer Zählrate von Vanadium (blau) und Aluminium (rot).

Messung

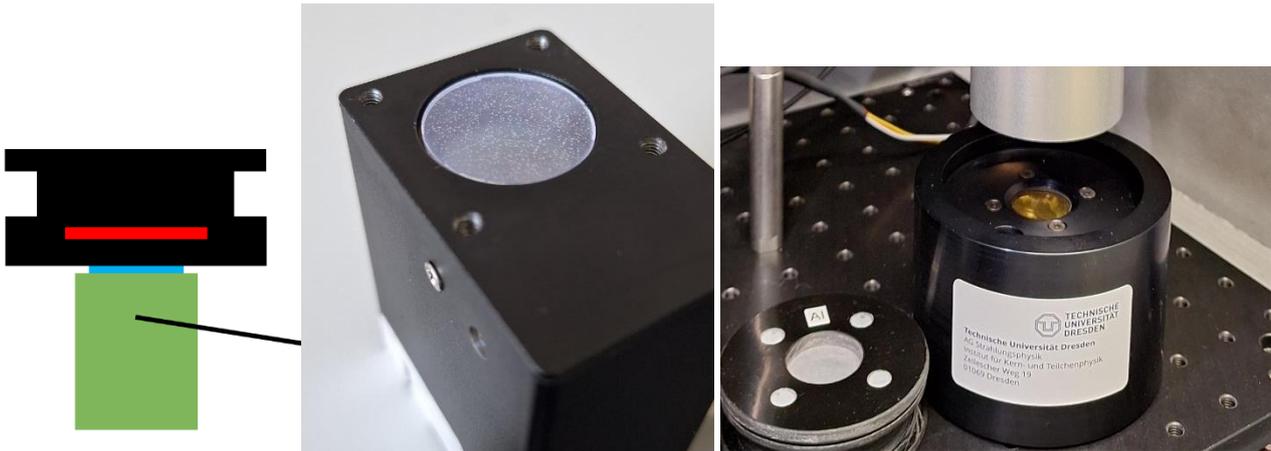
Wenn Neutronen von einem Zielkern eingefangen werden, enthalten die entstehenden Reaktionsprodukte typischerweise ein Neutron mehr als der stabile Ausgangskern, was sie in der Regel zu β^- -Strahlern macht. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist Cobalt (^{60}Co), das sich in Stahl ansammelt, der in Kernreaktoren verwendet wird, und erheblich zur Aktivität während der Stilllegung von Kernanlagen beiträgt.

Die Messung der Beta-Aktivität beginnt nach dem Transport der Probe aus der Bestrahlungskammer zum Detektionsgerät, was zu einer gewissen Verzögerung führen kann. Ein Beispiel für die Zählrate verschiedener Reaktionsprodukte ist in Abbildung 3 dargestellt.

Beta-Strahlung wird wie folgt nachgewiesen: Elektronen, die während des Zerfallsprozesses emittiert werden, durchdringen eine dünne Folie und gelangen in einen Szintillationsdetektor. Im Szintillatormaterial werden dabei schwache Lichtblitze erzeugt, deren Intensität proportional zur vom Elektron deponierten Energie ist. Diese Lichtimpulse werden von einem Photoelektronenvervielfacher erfasst, der das optische Signal in ein elektrisches Spannungssignal umwandelt. Da die Lichtemission proportional zur deponierten Energie ist, ermöglicht dieses Verfahren die Durchführung einer Beta-Spektroskopie.

Die Effizienz der Detektion von Beta-Strahlung hängt stark von der Geometrie der Probe sowie von der Wahrscheinlichkeit ab, dass ein Elektron die Probe verlassen und mit dem Szintillator wechselwirken kann.

Der Detektor kann nur Ereignisse mit einer minimalen Signalstärke zählen, die oberhalb des elektronischen Rauschpegels des Systems liegt. Schwächere Signale bleiben unentdeckt und gehen verloren. Um die Detektionseffizienz zu optimieren, müssen die Hochspannung des Photoelektronenvervielfachers sowie die Schwellenwerte des Datenerfassungssystems täglich überprüft und angepasst werden. Dies stellt die erste Aufgabe im Labor dar.



Probe und Probenhalter mit dem Beta-Detektor

Aufgabenstellung

Die Aufgabe umfasst drei Hauptkomponenten. Erstens ist die Kalibrierung des Detektors mit einer ^{137}Cs -Betaquelle erforderlich, um die Detektorschwelle sowie die passende Hochspannungseinstellung zu bestimmen.

Zweitens erfolgt die Messung der thermischen Neutronenflussdichte mittels einer differenziellen Methode. Dabei werden die Zerfallskurven von sowohl cadmiumgeschirmten als auch ungeschirmten Goldproben aufgezeichnet. Dies ermöglicht die Berechnung des Anteils der Aktivität, der speziell den thermischen Neutronen zuzuordnen ist, sowie die Bestimmung der Detektionseffizienz. Für die benötigten nuklearen Eigenschaften der Proben kann die NUDAT-3-Datenbank herangezogen werden.

Drittens umfasst die Untersuchung die Zeitabhängigkeit und Detektoreffizienz verschiedener Proben. Dazu gehören die Berechnung der Bestrahlungszeit, die nötig ist, um 95% der Sättigungsaktivität zu erreichen, die Abschätzung der erwarteten Probenaktivität basierend auf dem thermischen Neutronenfluss sowie die Festlegung der geeigneten Messdauer. In diesem Zusammenhang wird die Zerfallskurve aufgenommen und auf Übereinstimmung mit den erwarteten Reaktionsprodukten geprüft.

Hinweise zum Experiment

Zubehör:

1. Beta-Szintillationsdetektor
2. Messelektronik zur Hochspannungsversorgung sowie zur Pulsanalyse und -zählung
3. PC, über Netzwerk mit der Messelektronik des Szintillationsdetektors verbunden
4. Cäsium-Betaquelle zur Kalibrierung des Detektors
5. Verschiedene Proben zur Bestrahlung und Strahlungsmessung:
 - a. cadmiumgeschirmtes und ungeschirmtes Gold
 - b. Aluminium, Silber, Vanadium, Mangan, Natriumchlorid
6. Abschirmte Neutronenbestrahlungsanlage
7. Probenhalter zur Einführung in das Neutronenbestrahlungssystem
8. Zugang zur NUDAT-3-Datenbank für nukleare Eigenschaften

Versuchsablauf und Auswertung

(Details siehe Versuchsanleitung)

1. Der Detektor wird gemäß Anleitung mit dem PC verbunden.

2. Die ^{137}Cs -Betaquelle wird in den Detektor eingesetzt. Die Detektoreinstellungen (Schwellwert und Hochspannung) werden gemäß Anleitung bestimmt. Bei Bedarf *den* die *Betreuerin* um Hilfe bitten.
3. Die aktivierten Goldproben werden jeweils für eine Dauer von 10 Minuten im Detektor gemessen.
4. Zwei verschiedene Testmaterialien werden ausgewählt. Die entsprechenden Reaktionsprodukte werden bestimmt.
5. Die Bestrahlungsdauer, die notwendig ist, um 95% der maximalen Aktivität zu erreichen, wird berechnet. Ebenso wird die geeignete Messzeit für die Strahlungsmessung bestimmt.
6. Die Proben werden entsprechend der berechneten Zeit in die Neutronenquelle eingelegt.
7. Nach Erreichen der Zielaktivität werden die Proben zügig in den Detektor überführt.
8. Die Zählrate der Beta-Strahlung wird gemessen.
9. Die Messdaten werden mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms oder anders ausgewertet.
10. Angabe und Diskussion der Analyseergebnisse.
11. Unsicherheitsbetrachtungen (Grundlagen siehe Anleitungen RM1 und F2).