



Technische
Universität
Dresden

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **RM3**

Erstellt: Dr. Thomas Kormoll

Bearbeitet: Dr. Andreas Jansen

Aktualisiert: am 07.05.2026

Neutronenaktivierung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	2
2.1	Neutronenwechselwirkung	2
2.2	Beta-Zerfall	3
3	Aktivierung	4
4	Messprinzip	5
5	Aufgabenstellung	6
6	Hinweise zum Experiment	7
6.1	Zubehör	7
6.2	Versuchsablauf und Auswertung	7

1 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 in der nuklearen Astrophysik von Bedeutung. Ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung neutroneninduzierter 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 als Flussdichte φ bezeichnet.

Der Wirkungsquerschnitt σ hängt von der Energie der beteiligten Neutronen ab. Nach der Freisetzung aus einem Atomkern besitzen Neutronen eine charakteristische 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.

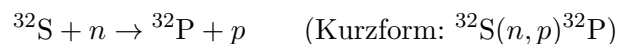
2 Grundlagen

2.1 Neutronenwechselwirkung

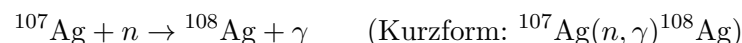
Wenn Neutronen mit Atomkernen wechselwirken, können unterschiedliche Reaktionen auftreten. Eine wichtige Größe zur Beschreibung dieser Prozesse ist der sogenannte Q-Wert. Er gibt an, ob bei einer Kernreaktion Energie frei wird oder zugeführt werden muss. Physikalisch entspricht er der Differenz der Ruhemasse aller Reaktionspartner vor und nach einer Reaktion.

Bei der **elastischen Streuung** bleibt der Kern unverändert. Neutron und Kern tauschen lediglich Energie und Impuls aus, ähnlich wie bei einem Stoß zweier Billardkugeln. Der Q-Wert ist in diesem Fall null. Diese Art der Wechselwirkung ist allgegenwärtig und spielt eine zentrale Rolle beim Abbremsen schneller Neutronen in Materie. Besonders effektiv geschieht dies in wasserstoffhaltigen Materialien wie Wasser oder Polyethylen. Dieser Prozess wird als Moderation bezeichnet.

Bei sogenannten **Schwellenreaktionen** ist der Q-Wert negativ. Dies bedeutet, dass Energie (von außen) benötigt wird, damit die Reaktion stattfinden kann. Solche Reaktionen können daher nur durch schnelle Neutronen mit ausreichender Energie induziert werden. Ein Beispiel dafür sind $(n; p)$ -Reaktionen, bei der ein Neutron ein Proton aus dem Kern herauslöst:



Bei **Neutroneneinfangreaktionen** wird das Neutron vollständig vom Kern aufgenommen. Neutroneneinfangreaktionen finden hauptsächlich durch $(n; \gamma)$ -Reaktionen an stabilen Nukliden statt. Der dabei entstehende Kern ist angeregt und gibt die überschüssige Energie meist in Form von Gammastrahlung ab. Solche Reaktionen sind durch einen typischerweise positiven Q-Wert gekennzeichnet, da Energie frei wird. Zum Beispiel:



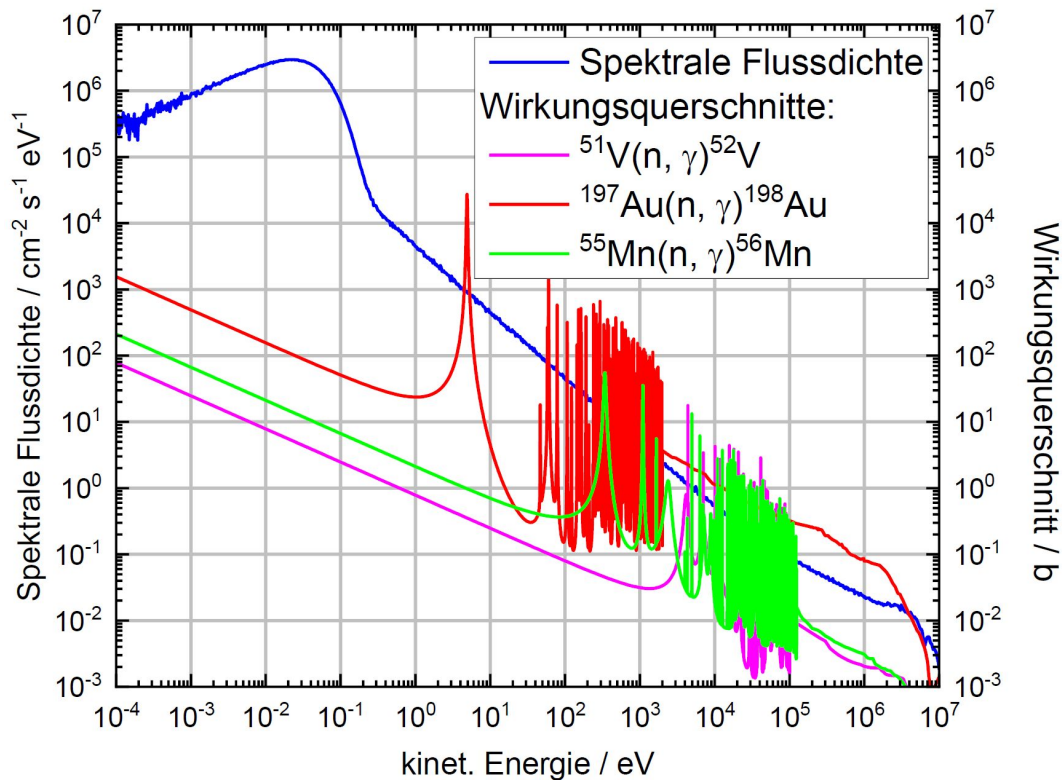


Abb. 1: Spektrale Flussdichte der Neutronen und Wirkungsquerschnitte einiger Einfang-Reaktionen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion stattfindet, hängt stark von der Energie der Neutronen ab. Langsame (thermische) Neutronen haben häufig eine höhere Wahrscheinlichkeit eingefangen zu werden als schnelle Neutronen. Im thermischen Energiebereich zeigen die Wirkungsquerschnitte eine gleichmäßige und rein umgekehrt proportionale Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. In Kombination mit dem breiten Maximum (durch die thermische Maxwellverteilung) in der spektralen Flussdichte der verwendeten Neutronenquelle ist dieser Bereich also für die meisten Reaktionen verantwortlich.

Bei höheren Energien treten dagegen ausgeprägte Maxima im Wirkungsquerschnitt bei spezifischen Energien auf. Diese sogenannten Resonanzen entstehen, wenn die Energie des Neutrons genau mit angeregten Zuständen des Atomkerns übereinstimmt. Ein besonders wichtiges Beispiel für das hier betrachtete Experiment ist Gold. Es besitzt eine ausgeprägte Resonanz im niedrigen Energiebereich (bei etwa ≈ 5 eV) (siehe Abbildung 1) und eignet sich daher hervorragend zur Bestimmung der reinen thermischen Flussdichte. Dazu erfolgt eine differenzielle Messung an zwei Goldproben, wobei eine Probe während der Aktivierung mit Cadmium abgeschirmt wird, die andere jedoch nicht. ^{113}Cd absorbiert Neutronen mit Energien unterhalb von etwa 0.5 eV sehr effizient. Durch die Differenzbildung kann also gezielt der Anteil thermischer Neutronen bestimmt werden.

2.2 Beta-Zerfall

Beim Beta-Zerfall wandelt sich ein Neutron im Atomkern in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Antineutrino emittiert werden. Dadurch erhöht sich die Ordnungszahl des Kerns um eins, während die Massenzahl unverändert bleibt. Ein Beispiel ist der Zerfall von ^{137}Cs :



Der entstehende Tochterkern (im Beispiel: $^{137\text{m}}\text{Barium}$) befindet sich häufig in einem angeregten (metastabilen) Zustand und relaxiert anschließend entweder durch Emission von γ -Strahlung oder weiteren Elektronen (Stichwort: innere Konversion).

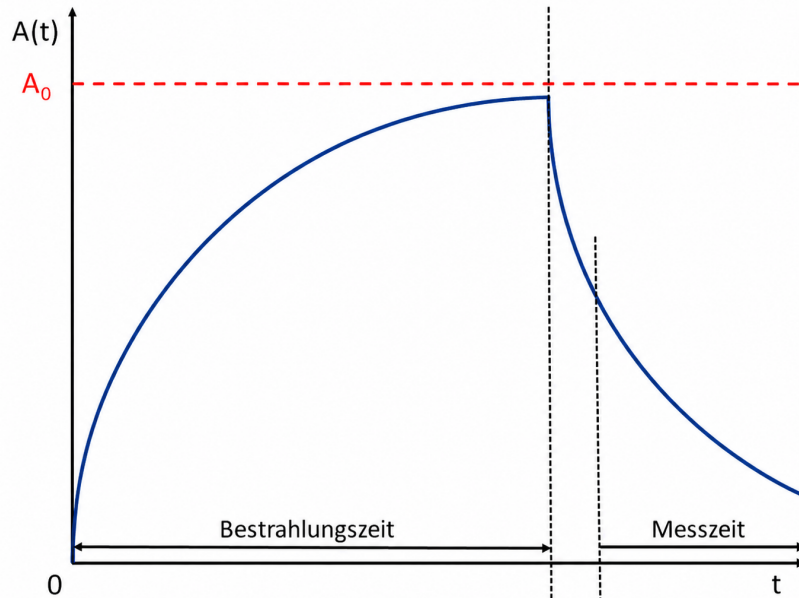


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der Anzahl aktivierter Kerne. Im monoton ansteigenden Abschnitt ist die Probe der Neutronenstrahlung ausgesetzt. Im exponentiell abfallenden Abschnitt wurde die Probe zur Messung aus dem Neutronenfeld entfernt.

3 Aktivierung

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

$$dN_{ac}(t) = N_{st} \left(\int \sigma(E) \frac{d\varphi}{dE} dE \right) dt - \lambda N_{ac}(t) dt \quad (2)$$

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: 1) die Aktivierung durch den Neutronenfluss und 2) den Zerfall der bereits aktivierten Kerne. Durch Lösen der Differentialgleichung ergibt sich für die Anzahl der aktivierten Kerne in Abhängigkeit von der Zeit:

$$N_{ac}(t) = \frac{N_{st}}{\lambda} \left(1 - e^{-\lambda t} \right) \cdot \int \frac{d\varphi}{dE} \sigma(E) dE \quad (3)$$

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

$$A_0 = N_{st} \int \sigma(E) \frac{d\varphi}{dE} dE \stackrel{\text{therm. gemittelt}}{\approx} N_{st} \langle \sigma \rangle_{th} \langle \varphi \rangle_{th} \quad (4)$$

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

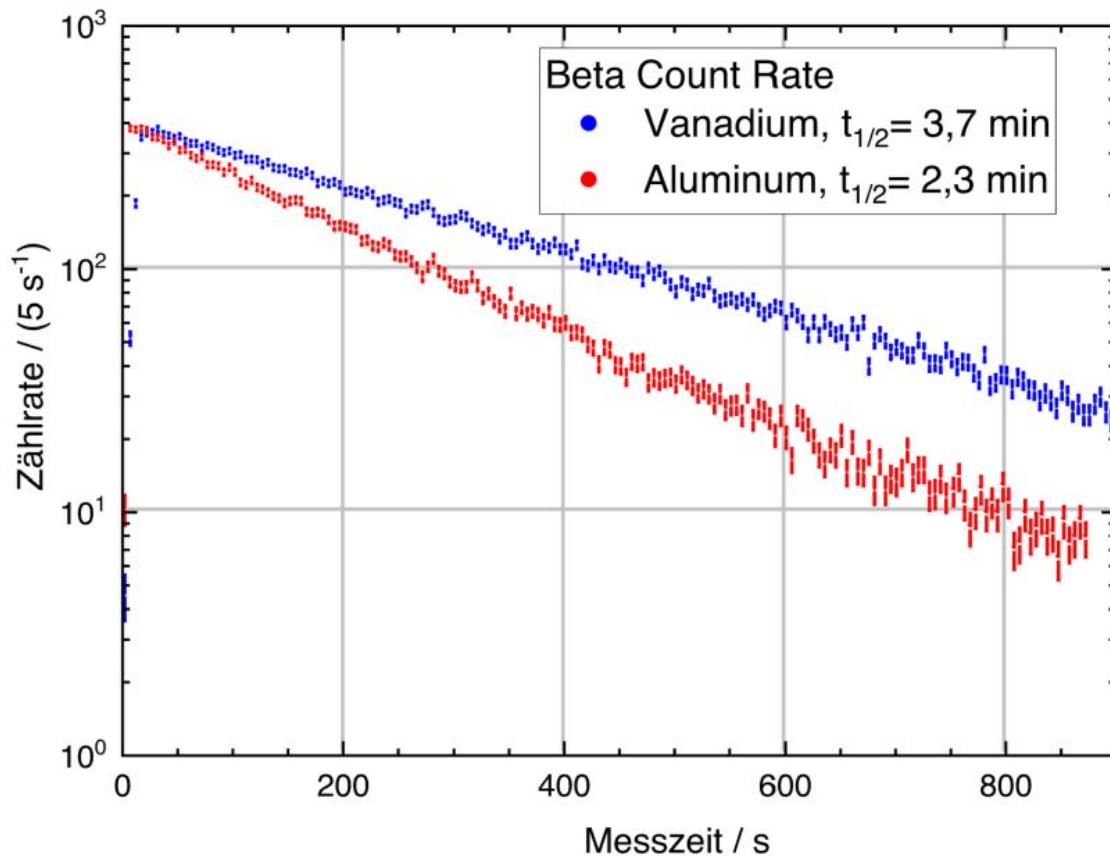


Abb. 3: Beispiel einer Zählrate von Vanadium (blau) und Aluminium (rot).

4 Messprinzip

Im ersten Schritt des Versuchs werden die Proben durch Neutronenbestrahlung aktiviert. Durch den Einfang eines Neutrons entstehen in der Regel instabile Nuklide mit einem Neutron mehr als der ursprüngliche stabile Ausgangskern. Diese Nuklide sind häufig Beta-Strahler und zerfallen daher unter Emission von Elektronen und Antineutrinos (siehe Gleichung 1). Ein bekanntes Beispiel hierfür ist Cobalt (⁶⁰Co), das sich im Stahl von Kernreaktoren anreichern kann und dadurch einen erheblichen Beitrag zur Aktivität während der Stilllegung kerntechnischer Anlagen leistet.

Nach der Aktivierung werden die Proben aus der Neutronenquelle entnommen und zügig zum Detektor transportiert. Der Abfall der Probenaktivität (rechte Hälfte in Abbildung 2) setzt unmittelbar nach der Entnahme aus der Neutronenquelle ein. Die Aktivitätsmessung beginnt jedoch erst, nachdem die Probe auf dem Detektor positioniert wurde. Diese Transferzeit muss bei der Auswertung berücksichtigt werden, um die Aktivität zum Zeitpunkt des Endes der Bestrahlung korrekt zu bestimmen. Ein Beispiel für die zeitlich abnehmende Zählrate verschiedener Reaktionsprodukte ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Messung der Beta-Strahlung basiert auf der Detektion der beim Zerfall emittierten Elektronen. Diese durchdringen zunächst eine dünne Folie (siehe Abbildung 4, Eintrittsfenster) und gelangen in einen Szintillationsdetektor. Im Szintillatormaterial erzeugen sie schwache Lichtblitze, deren Intensität proportional zur vom Elektron deponierten Energie ist. Die entstehenden Lichtimpulse werden anschließend von einem Photomultiplier erfasst, der das optische Signal in ein elektrisches Spannungssignal umwandelt. Die Proportionalität der Lichtemission zur deponierten Energie ermöglicht die Durchführung einer Beta-Spektroskopie.

Um von der Messung auf die Aktivität einer Probe zurückzuschließen, muss die Detektionseffizienz berücksichtigt werden. Sie beschreibt den Anteil der tatsächlich emittierten Zerfälle, die vom Detektionssystem erfasst und als Zählimpulse registriert werden. Die Effizienz hängt wesentlich

von der Geometrie der Probe sowie von der Wahrscheinlichkeit ab, dass die Elektronen die Probe verlassen und den Detektor tatsächlich erreichen können. Daher sollte im Versuch darauf geachtet werden, dass die Proben immer so identisch wie möglich auf dem Detektor platziert werden. Zusätzlich können im Detektor nur Ereignisse oberhalb einer minimalen Signalstärke registriert werden, die oberhalb des elektronischen Rauschpegels des Systems liegt. Schwächere Signale werden nicht erfasst und gehen verloren. Um die Detektionseffizienz zu optimieren, müssen die Hochspannung des Photomultipliers sowie die Schwellenwerte des Datenerfassungssystems regelmäßig überprüft und angepasst werden. Dies stellt daher die erste Aufgabe im Labor dar.

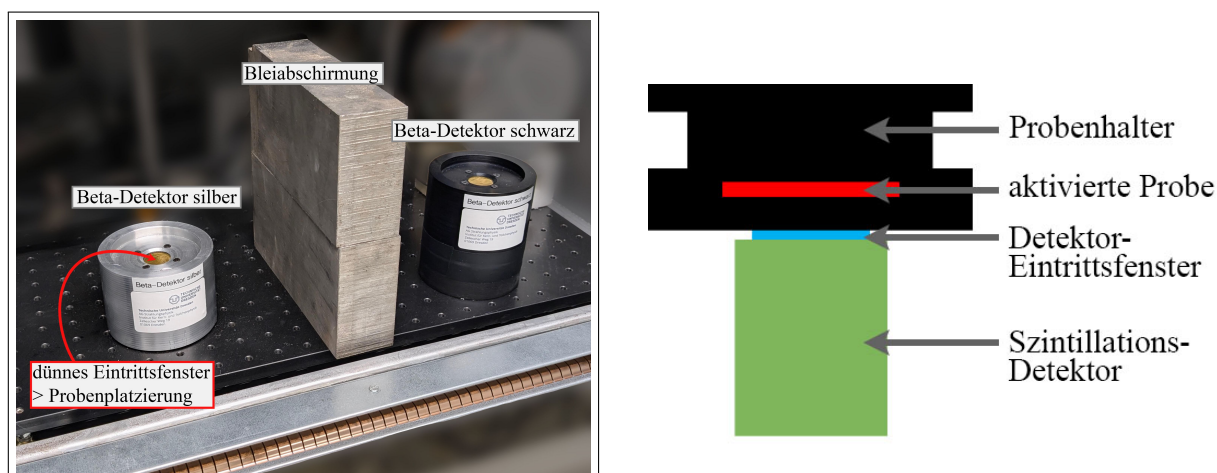


Abb. 4: Foto und schematischer Aufbau des Beta-Detektors mit Probenhalter.

5 Aufgabenstellung

Das Praktikum umfasst drei Hauptkomponenten:

- Als erstes ist die Kalibrierung des Detektors mit einer ^{137}Cs -Betaquelle erforderlich, um die Detektorschwelle sowie die passende Hochspannungseinstellung zu bestimmen.
- Als zweites erfolgt die Messung der thermischen Neutronenflussdichte mittels einer differentiellen Methode. Dabei werden die Zerfallskurven von einer cadmiumgeschirmten als auch von einer unabgeschirmten Goldprobe 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 IAEA Nuclear Database¹ oder die NUDAT3-Datenbank² herangezogen werden.
- Der dritte Teil umfasst die Untersuchung der Zeitabhängigkeit der Aktivität sowie der Detektionseffizienz verschiedener Proben. Dazu gehören:
 - die Berechnung der Bestrahlungszeit zur Erreichung von 95% der Sättigungsaktivität
 - die Abschätzung der erwarteten Probenaktivität basierend auf dem therm. Neutronenfluss
 - sowie die Festlegung einer geeigneten Messdauer

In diesem Zusammenhang wird ebenfalls die Zerfallskurve aufgenommen und auf Übereinstimmung mit den erwarteten Reaktionsprodukten geprüft.

¹IAEA Nuclear Database: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

²NUDAT3-Datenbank: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

6 Hinweise zum Experiment

6.1 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:
 - Cadmiumgeschirmtes und ungeschirmtes Gold
 - Aluminium, Silber, Vanadium, Mangan, Natriumchlorid
6. Abgeschirmte Neutronenbestrahlungsanlage
7. Probenhalter zur Einführung in das Neutronenbestrahlungssystem
8. Zugang zur IAEA Nuclear Database oder der NUDAT3-Datenbank für nukleare Eigenschaften
9. Zugang zu einem Jupyter Notebook, inklusive Python Script zur Darstellung und Auswertung der Messdaten

6.2 Versuchsablauf und Auswertung

(Details siehe Versuchsanleitung)

1. Die Verbindung von Detektor mit dem Digitizer sowie dem PC wird überprüft.
2. Die Detektoreinstellungen (Schwellwert und Hochspannung) werden gemäß Platzanleitung untersucht und angepasst. Die Werte werden mithilfe einer auf den Detektor gelegten ^{137}Cs -Betaquelle überprüft.
3. Die vom Betreuer im Voraus bis zur Sättigungsaktivität A_0 aktivierten Goldproben werden aus der Neutronenbestrahlungsanlage entnommen und jeweils für eine Dauer von 10 Minuten auf dem Detektor gemessen.
4. Zwei verschiedene Testmaterialien werden ausgewählt. Für jedes Material werden:
 - Die entsprechenden Reaktionsprodukte bestimmt.
 - Die zur Erreichung von 95% der maximalen Aktivität erforderliche Bestrahlungsdauer wird berechnet. Ebenso wird eine geeignete Messzeit für die Strahlungsmessung bestimmt.
 - Die Proben werden entsprechend der berechneten Zeit in die Neutronenquelle eingelegt.
 - Nach Erreichen der Zielaktivität werden die Proben **zügig** in den Detektor überführt.
 - Die Zählrate der Beta-Strahlung wird gemessen.
 - Die Messdaten werden mithilfe des bereitgestellten Jupyter Notebooks ausgewertet.
 - Angabe und Diskussion der Ergebnisse.
 - Unsicherheitsbetrachtungen (Grundlagen siehe Anleitungen RM1 und F2).

Autorenschaft

Diese Versuchsanleitung wurde in ihrer ursprünglichen Form von T. Kormoll erstellt. Aktuelle Änderungen wurden von A. Jansen durchgeführt.