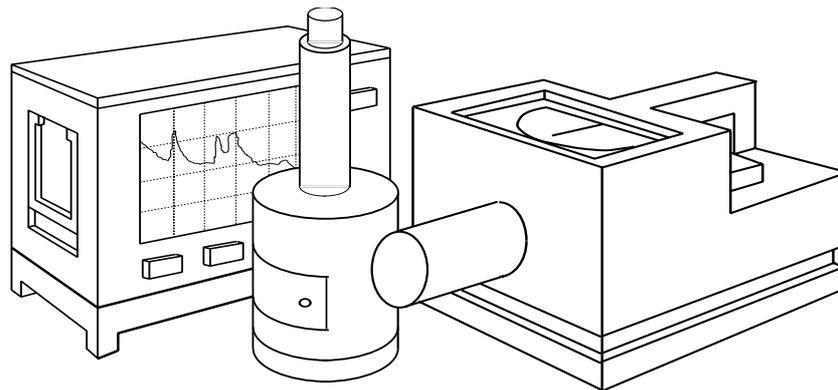


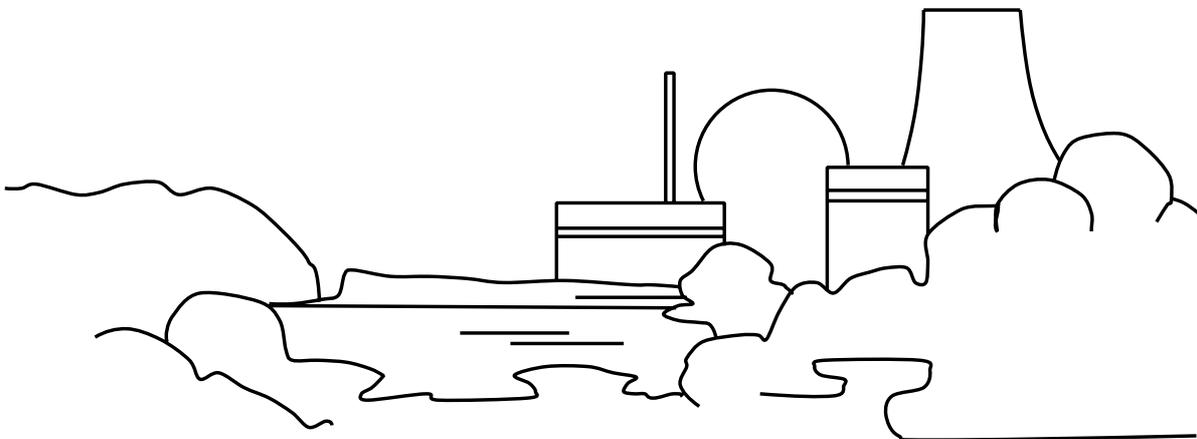
**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DRESDEN**
Institut für Energietechnik
Ausbildungskernreaktor



REAKTORPRAKTIKUM

VERSUCH

"Neutronenflussdichteverteilung"



Praktikumsanleitung
Versuch “Neutronenflussdichteverteilung”

Gliederung:

1. . . . Zielstellung
2. . . . Einleitung
3. . . . Messung der Neutronenflussdichteverteilung
4. . . . Versuchsdurchführung
 - 4.1. . . Beschreibung der Messeinrichtung
 - 4.2. . . Bestrahlung der Aktivierungsquellen
 - 4.3. . . Energiekalibrierung des Spektrometers
 - 4.4. . . Auswertung und Protokollierung

Stand: 12.05.2011

1. Zielstellung

Die Kenntnis der räumlichen Neutronenflussdichteverteilung ist in jedem Reaktor von großem Interesse: in Forschungsreaktoren als Eingangsgröße für viele Experiment (z. B. Quellstärke bei Bestrahlungen), in Leistungsreaktoren als Bestimmungsgröße für die Verteilung der Wärmequellen. Im Versuch wird die radiale Flussdichteverteilung der thermischen Neutronen gemessen. Die dazu angewandte Aktivierung geeigneter Detektorfolien ist eine der wichtigsten Messmethoden der Reaktortechnik.

2. Einleitung

Die radiale Verteilung der thermischen Neutronenflussdichte, wie sie mit der Mehrgruppen-Diffusionsrechnung gewonnen werden kann (Berücksichtigung der thermischen und schnellen Neutronen) zeigt Abb. 1. Im Bereich des Brennstoffes stimmt die Verteilung im wesentlichen mit der Zylinderfunktion $J_0(2,405 \cdot r/(R_K + \delta))$ überein, die die erste Nullstelle bei einem Radius $R = R_K + \delta$ hat. Der Vergleich mit der Verteilung $J_0(2,405 \cdot r/R_K)$ für den nackten Reaktor zeigt, dass sich aufgrund des Reflektors der Reaktor so verhält wie ein nackter Kern mit einem um die Strecke δ vergrößerten Radius.

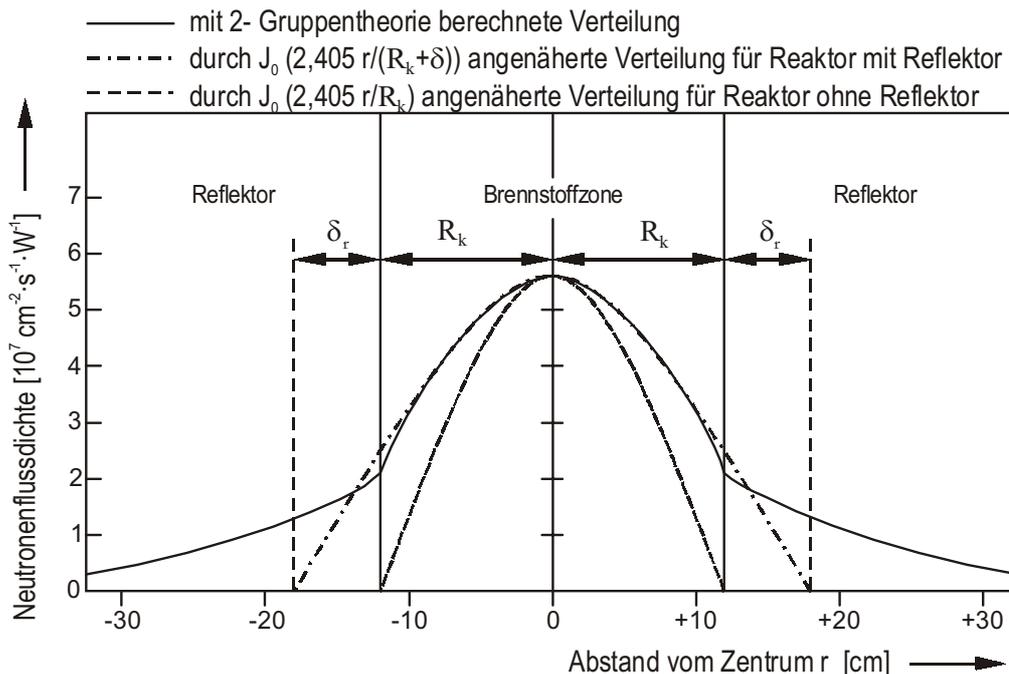


Abb. 1, Radiale Flussdichteverteilung im AKR-2

Die kritische Bedingung schreibt für einen Reaktor gegebener Zusammensetzung eine Mindestgröße vor, die so bestimmt ist, dass die Leckverluste gerade durch die Neutronenvermehrung im Inneren abgedeckt werden. Durch den Reflektor erreicht man diese Mindestgröße, die bei nacktem Reaktor dem Radius $R = R + \delta$ entspricht, mit dem wesentlich kleineren Kernvolumen zum Radius R_K . Man spart dadurch wertvollen Brennstoff und nennt δ Reflektorsparnis.

Für die axiale Flussdichteverteilung gilt im wesentlichen dasselbe, nur dass hier an Stelle der Zylinderfunktion die Winkelfunktion $\cos(\pi \cdot (z/2)/(Z_K + \delta))$ tritt (Z_K ist die halbe Kernhöhe).

Die Parameter $2,405/(R_K + \delta) = B_r$ und $\pi \cdot (z/2)/(Z_K + \delta) = B_z$ der Verteilungsfunktionen spielen als Bestimmungsgrößen für die Geometrie eine wichtige Rolle. $B^2 = B_r^2 + B_z^2$ wird Buckling oder Flusswölbung genannt, weil diese Größe in der Reaktorfundamentalgleichung

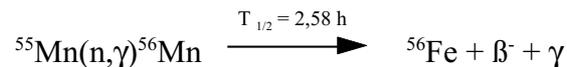
$$\Delta\Phi(r,z) + B^2 \cdot \Phi(r,z) = 0$$

die zweite räumliche Ableitung und damit die Krümmung der Kurven bestimmt.

3. Messung der Neutronenflussdichteverteilung

Als Detektoren werden Aktivierungs sonden verwendet. Sie sind unempfindlich gegenüber Gammastrahlung und können so klein gehalten werden, dass sie räumlich gut definiert sind und die Neutronenflussdichteverteilung nicht merklich gestört wird. Äquivalente Sonden können gleichzeitig an verschiedenen Messpunkten bestrahlt werden, so dass die relative Flussdichteverteilung von Leistungsschwankungen des Reaktors nicht beeinträchtigt wird.

Für Messungen von thermischen Neutronenflüssen besonders geeignet ist Mangan, mit der Reaktion



Der Wirkungsquerschnitt von Mangan (13,3 barn) ist im thermischen Gebiet sehr genau proportional zum Kehrwert der Neutronengeschwindigkeit ($1/v$ -Absorber). Resonanzen treten erst ab 0,337 keV auf und tragen zum integralen Wirkungsquerschnitt weniger als 5 % bei. Dieser Betrag kann natürlich an verschiedenen Stellen des Reaktors verschieden groß sein (Ortsabhängigkeit des Reaktorspektrums). Man kann aber auf eine Berücksichtigung dieses Effektes bei Mangan verzichten, da er innerhalb der erreichbaren Fehlergrenzen liegen würde. Die Halbwertszeit von 2,58 h ist für die Praxis sehr günstig: Sie ist so groß, dass Zeitkorrekturen nicht entscheidend werden, andererseits so klein, dass auch geringe Neutronenflussdichten gut messbare Aktivitäten ergeben. Das Zerfallschema und einen Ausschnitt des γ -Spektrums von Mangan zeigt Abb. 2.

Zur Feststellung der Aktivierung wird zweckmäßigerweise die Gammastrahlung herangezogen, weil dann die Selbstabsorption in der Probe sehr gering ist, so dass Störungen durch Unregelmäßigkeiten in der Sondendicke vermieden werden.

Beim AKR-2 können in den Reaktorkern selbst keine Messsonden eingelegt werden. Man kann aber die Sonden in den zentralen, durch den Kern laufenden Experimentierkanal 1-2 bringen. Verwendet man als Sondenhalter einen Stab aus Aluminium, welches sich reaktorphysikalisch wie Luft verhält, so befinden sich die Sonden in einer Umgebung, deren Streu- und Moderator-eigenschaften dem Kern bzw. Reflektormaterial ähnlich sind. Die im Experimentierkanal gemessene Verteilung stimmt dann mit der für den Reaktorkern nach der 2-Gruppen-Diffusionstheorie berechneten Verteilung überein (siehe Abb. 3).

Als Sondenformen haben sich Mangan-Scheiben mit ca. 1 cm Durchmesser gut bewährt. Der Sondenhalter enthält in je 2 cm Abstand Spalte zur Aufnahme der Scheiben. Das Gewicht der Sonden kann als gleich angesetzt werden. Sie wiegen zwischen 0,048 ... 0,051 g.

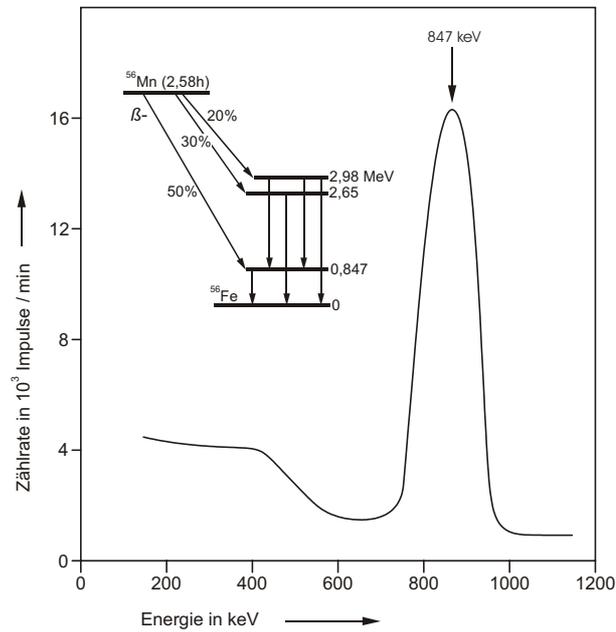


Abb. 2, Ausschnitt aus dem γ -Spektrum und dem Zerfallsschema von ^{56}Mn

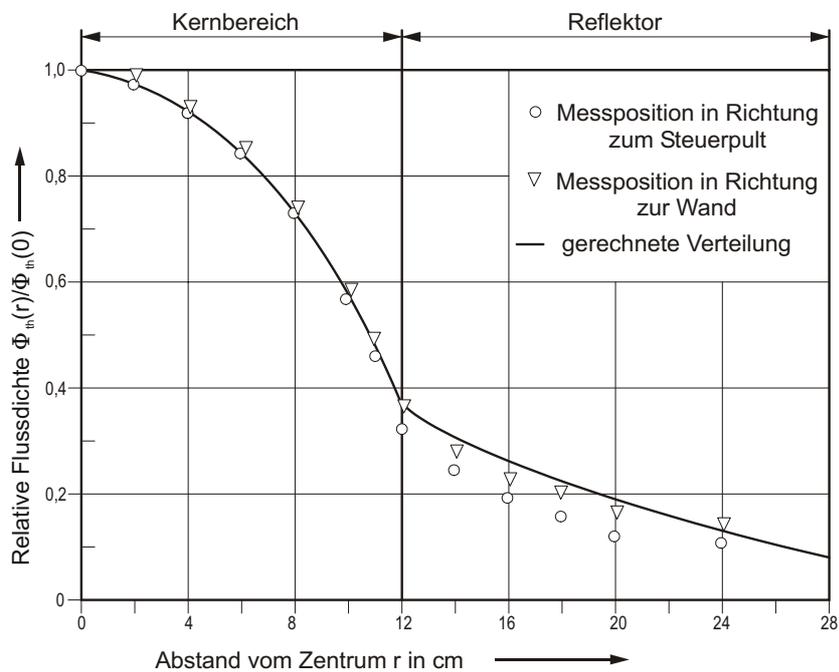


Abb. 3, Typische relative radiale Flussdichteverteilung im AKR-2

4. Versuchsdurchführung

4.1. Beschreibung der Messeinrichtung

Abb. 4 zeigt den Aufbau der Messeinrichtung. Sie besteht aus einer Szintillationsmesssonde mit angeschlossenem Vorverstärker und dem Auswerterechner. Die Sonden und der Sondenhalter sind ebenfalls zu erkennen. Der Szintillationsdetektor wird über einen spektroskopischen Verstärker mit einem Vielkanalanalysator gekoppelt, der die einfallenden Impulse registriert und entsprechend ihrer Impulshöhe, welche die Energieinformation beinhaltet, bewertet und in aufeinander folgende Impulshöhenkanäle einsortiert. Dabei wird der primäre Ladungsimpuls im ladungsempfindlichen Vorverstärker in einen Spannungsimpuls umgewandelt (Ausgangsspannung ist proportional der Eingangsladung). Im spektroskopischen Verstärker wird der Impuls bis in die Größenordnung von 1...10 V verstärkt, bevor er vom Vielkanalanalysator registriert und der Höhe nach eingeordnet werden kann. Es entsteht ein Impulshöhenspektrum, in dem die von jedem detektierten Gammaquant an den Detektor übertragene Energie durch ein Ereignis in dem jeweiligen Energiekanal dargestellt wird. Es werden jedoch für die diskreten Energien keine scharfen Linien im Spektrum sichtbar, sondern aufgrund statistischer Schwankungen der im Detektor ablaufenden Elementarprozesse sowie in der Verarbeitungselektronik erhält man eine Impulshöhenverteilung in Form einer Gaußschen Glockenkurve (Peak). Die mittlere Impulshöhe entspricht dabei der Energie der Gammaquanten. Mittels eines

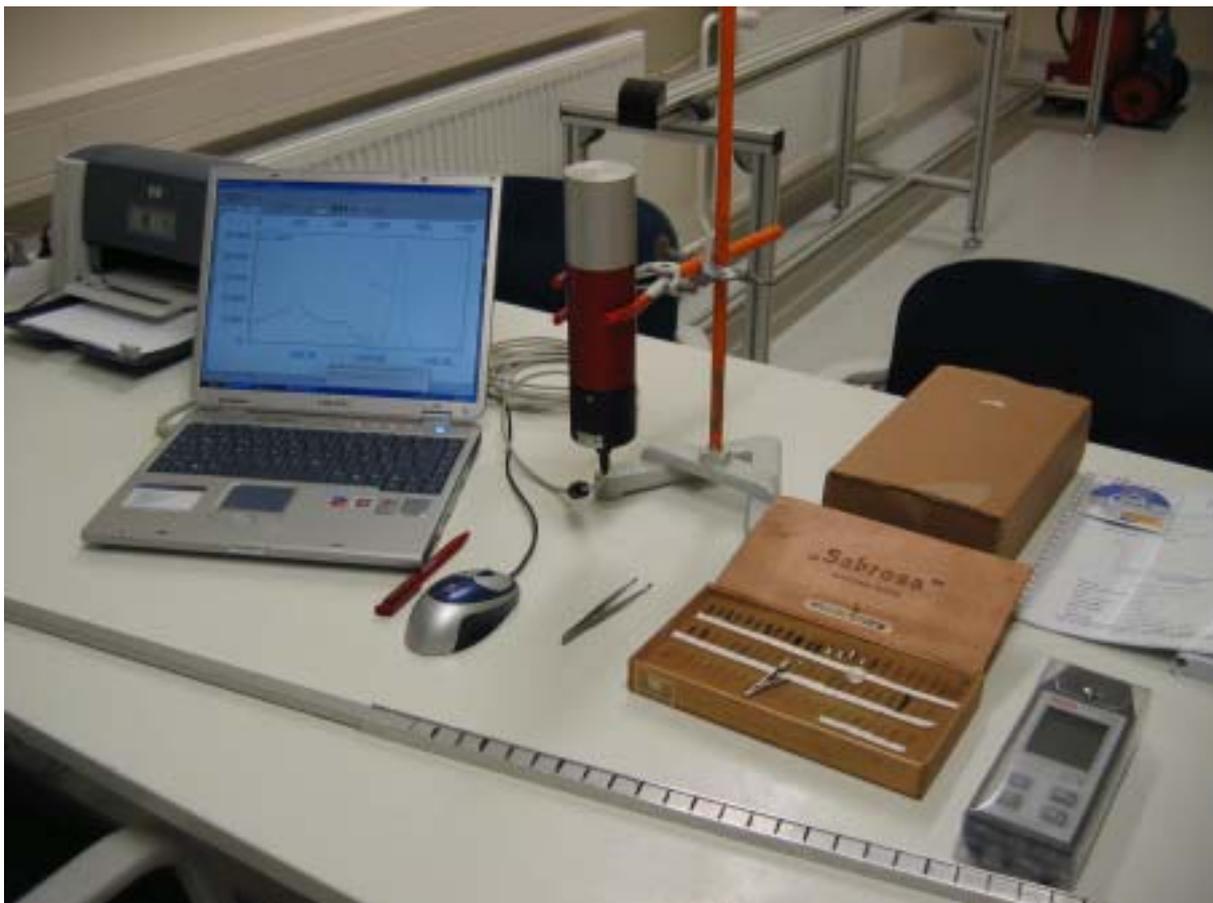


Abb. 4, Aufbau der Messeinrichtung

PC-Programms kann das Spektrum auf einem Bildschirm beobachtet, untersucht und gespeichert werden.

Die Gammaskopie erfolgt üblicherweise mit einem Szintillationsdetektor (z.B. NaJ) oder einem Halbleiterdetektor aus Ge(Li) bzw. zunehmend Reinstgermanium (HPGe, englischsprachig für High Purity Germanium).

Im Versuch wird ein Szintillationsdetektor verwendet. Szintillationsdetektoren sind relativ unkompliziert zu verwenden und haben eine hohe Nachweiseffektivität. Nachteilig bei Szintillationsdetektoren ist ihr beschränktes Energieauflösungsvermögen, d.h. die Fähigkeit, eng beieinander liegende γ -Energiepeaks als getrennte Linien zu identifizieren.

Szintillationsdetektoren bestehen aus einem Leuchtstoff (Szintillator), der von der radioaktiven Strahlung zur Emission von Lichtblitzen (Szintillationen) angeregt wird, und aus einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV), der die Lichtblitze in elektrische Impulse umwandelt.

Im Szintillator wird ein Teil der absorbierten Energie des γ -Quants durch Anregung des Szintillatormaterials und dessen Rückkehr in den Grundzustand in Licht umgewandelt. Für spektrometrische Untersuchungen muss zwischen der absorbierten Energie und der Zahl der emittierten Lichtquanten Proportionalität bestehen.

Als Szintillatoren zur Spektroskopie von Gammastrahlung haben sich anorganische Einkristalle aus Natriumjodid, die einen geringen Zusatz von Thallium zur Aktivierung der Lichtemission enthalten, bewährt (NaJ(Tl)-Szintillatoren). Sie besitzen infolge der großen Dichte $\rho = 3,67 \text{ g/cm}^3$ und des hohen Gehaltes von 85 Masse-% Jod, dessen Ordnungszahl $Z = 53$ beträgt, ein starkes Absorptionsvermögen für Quantenstrahlung. Es können glasklare, für das eigene Fluoreszenzlicht gut durchlässige und homogen aktivierte Kristalle bis zu großen Abmessungen von z.B. 300 mm Dicke und 400 mm Durchmesser hergestellt werden. In ihnen wird auch energiereiche Quantenstrahlung hinreichend absorbiert. Handelsübliche Kristalle befinden sich in luftdichten Kapseln (wegen der hygroskopischen Eigenschaften von NaJ) z.B. aus Aluminium, die an der Lichtaustrittsfläche mit einem Glas- oder Kunststofffenster verschlossen sind. Zur Vermeidung größerer Lichtverluste sind alle Flächen des Kristalls außer der Lichtaustrittsfläche nicht poliert und mit einer reflektierenden Schicht z.B. aus MgO umgeben.

Das energetische Auflösungsvermögen von NaJ(Tl)-Kristallen für Quantenstrahlung wird üblicherweise für die γ -Linie des Radionuklids Cs-137 (662 keV) angegeben. Die besten Werte, die mit ausgewählten Spektrometerkristallen und SEV erreichbar sind, liegen bei etwa 6 %. Für nicht ausgesuchte handelsübliche Spektrometerkristalle und SEV ergeben sich im allgemeine relative Halbwertsbreiten von 8...12 %.

Die Lichtquanten des Szintillators müssen weitgehend verlustlos auf die Fotokatode des Sekundärelektronenvervielfachers (SEV) übertragen werden. Immersionsschichten (z.B. Silikonöl) zwischen dem Szintillator und dem SEV-Eintrittsfenster vermindern die Totalreflexion. Auf der Fotokatode entstehen durch fotoelektrischen Effekt einige freie Fotoelektronen. Zwischen Fotokatode und Anode des SEV befinden sich eine Reihe von Zwischenelektroden (Dynoden), an die über Spannungsteiler eine gestaffelte Hochspannung angelegt wird. Im Spannungsfeld zwischen jeweils zwei dieser Dynoden werden die Elektronen beschleunigt und reißen an der nächsten Dynode durch Stoßionisation weitere Elektronen heraus. Das Dynodensystem des SEV bewirkt eine rauscharme Vervielfachung der ursprünglichen Elektronenanzahl

(Faktor 10^5 bis 10^9). Mittels des SEV werden somit die Lichtblitze des Szintillators in energieproportionale elektrische Strom- bzw. Spannungsimpulse umgewandelt und verstärkt. Da das Umgebungslicht die schwachen Szintillationen des Detektors bei weitem überdecken und zudem die Fotokatode des SEV zur Elektronenemission anregen würde, muss das gesamte Szintillator/SEV-System lichtdicht gekapselt werden.

4.2. Bestrahlung der Aktivierungs sonden

Am Versuchsplatz wird der Sondenhalter mit den Probesonden gefüllt. Es werden für den Versuch 30 Sonden jeweils in 2 cm Abstand positioniert. Damit ist eine komplette Erfassung des Neutronenflusses im Inneren des AKR-2 möglich. Der relative Neutronenfluss kann in Bereich der Spaltzone und im Reflektor gemessen werden.

Nun werden durch die Praktikums teilnehmer der Experimentierkanal 1 des AKR-2 geöffnet, die Kanalfüllstücke entladen und Wischtestproben entnommen. Im Anschluss wird der Reaktor gestartet und bei einer Leistung von 2 W kritisch gemacht. Zur weiteren Versuchsdurchführung ist es sinnvoll, die automatische Leistungsregelung zu nutzen. Bei einer stabilen Leistung von 2 W kann der Sondenhalter in den Experimentierkanal 1 eingeführt werden. Eine Markierung am Sondenhalter hilft bei der Positionierung. Der Beginn der Bestrahlungszeit ist zu protokollieren. Die Bestrahlung sollte ca. 45 Minuten dauern. In dieser Zeit ist der Aufenthalt vor dem geöffneten Experimentierkanal nicht gestattet.

4.3. Energiekalibrierung des Spektrometers

Während der Bestrahlung sollte die Energiekalibrierung des Spektrometers durchgeführt werden.

Bei der Auswertung von Impulshöhenspektren erhält man lediglich die Kanallage der Peaks und die entsprechenden Impulszahlen. Um zu jeder Kanallage auch die zugehörige Energie der Gammastrahlung zu erhalten, ist eine Energiekalibrierung des Spektrometers erforderlich. Dazu werden mit dem Vielkanalanalysator möglichst viele Fotopeaks bekannter Gammaquellen (Kalibrierquellen) ausgemessen und der Zusammenhang zwischen der Gammaenergie und der jeweils ermittelten Kanallage ermittelt. Am Praktikumsplatz stehen dafür üblicherweise die in Tabelle 1 aufgeführten Kalibrierquellen zur Verfügung.

Nuklid	Co-60	Cs-137	Kr-85	Ho-166m	Pb-210	Am-241
Energie [keV]	1173 1332	662	514	184, 280, 411, 712, 810	47	60

Tab. 1, Kalibrierquellen und Gammastrahlungsenergien

Nachdem der Rechner in Betrieb genommen und der Szintillator Typ Scintispec angeschlossen wurde, wird das Programm winTMCA32 gestartet. Mit Hilfe des Pull-down-Menüs HARDWARE ist es möglich, die Hochspannung einzustellen und zu SETZEN. Für den Versuch wird eine Hochspannung von 681 V genutzt.

Die Kalibrierquellen werden auf die Messsonde gelegt. Im Pull-down-Menü SPEKTRUM wird der Punkt ENERGIEKALIBRIERUNG aktiviert. Der Cursor wird auf den ersten zu kalibrierenden Peak gesetzt und anschließend durch Doppelklick übernommen. Die zugehörige Energie wird in der Tabelle eingetragen und die nächste Zeile in der Kalibrierungstabelle gewählt. Dieser Vorgang wird für die weiteren Peaks des Kalibrierungsspektrums wiederholt. Nach Abschluss wird die Schaltfläche FIT gedrückt und mit SETZEN die Kalibrierung übernommen. Nun ist das Spektrometer energiekalibriert und es kann für die weiteren Messungen verwendet werden.

4.4. Auswertung und Protokollierung

Nachdem die Proben im Experimentierkanal 1 des Ausbildungskernreaktors AKR-2 ca. 45 min bestrahlt wurden, ist der Reaktor abzuschalten (vorher Automatik deaktivieren). Die Abschaltzeit ist zu protokollieren. Da die Halbwertszeit des Sondenhalteraluminiums 137 s beträgt, ist eine hohe Aktivierung zu erwarten. Deshalb sollte der Sondenhalter noch ca. 10 min im Experimentierkanal verbleiben. Danach wird er aus dem Kanal gezogen und die Dosisleistung ist zu messen. Erst danach ist der Transport der Proben an den Versuchsplatz erlaubt.

Bei den Auswertungen der Aktivierungsquellen ist der Fotopeak von Mn-56 mit einer Energie von 847 keV zu nutzen. Die geringfügigen Gewichtstoleranzen der einzelnen Mangan-Quellen sind für den Praktikumsversuch nicht relevant. Bei einer Absolutmessung müssten sie jedoch berücksichtigt werden.

Für die Ausmessung der einzelnen Quellen ist eine Live-Time des Spektrometers von 60 s einzustellen. Die einzelnen Quellen werden nun nacheinander einzeln ausgemessen, wobei zu Beginn der Messung die jeweilige Startzeit notiert wird. Damit ist es möglich, nach Abschluss der Messungen das Absinken der Aktivität seit Bestrahlungsende zu korrigieren. Für die Auswertung empfiehlt sich die Erarbeitung einer entsprechenden Auswerterroutine.

Die Bestimmung der relativen Aktivität erfolgt im Versuch durch die Bestimmung des Peakflächeninhaltes. Es ist die Netto-Fläche zu nutzen. Die Nettofläche kann nach Abschluss der Messung jeder Mn-Quelle durch folgende Funktion im Programm winTMCA32 ausgelesen werden:

- Pull-down-Menü BERECHNEN öffnen,
- mit der Schaltfläche PEAKSUCHE Mn-Peak markieren,
- durch erneute Nutzung des Pull-down-Menüs BERECHNEN wird das SPEKTRUM INTEGRIERT. Es öffnet sich ein zusätzliches Fenster.
- der Reiter ZÄHLRATE wird aktiviert und es kann die Nettofläche abgelesen werden.
- nach Protokollierung der Nettozählrate wird das Fenster wieder geschlossen und das Spektrum gelöscht. Nun ist das Spektrometer für eine neue Messung der nächsten Mn-Quelle bereit.