

Burgstadtgymnasium Querfurt

Besondere Lernleistung zum Thema:

Experimentelle Charakterisierung und Vergleich von Neutronenspektren aus Kernspaltung
und Kernfusion

Name: Lauri Bütöf

Klasse: 12c

Schuljahr: 2025/26

betreuender Fachlehrer: Herr Wille

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1 Neutronenquellen im Vergleich.....	4
2.1.1 Die DT-Fusionsreaktion: Kinematik und das quasi-monoenergetische 14.1-MeV-Neutronenspektrum	4
2.1.2 Die Kernspaltung: Das kontinuierliche prompte Spaltneutronenspektrum.....	6
2.2 Wechselwirkung von schnellen Neutronen mit Materie	6
2.3 Grundlage der Neutronendetektion mit organischen Szintillatoren	7
2.3.1 Funktionsweise des Stilben-Detektors	7
2.3.2 Pulsformdiskriminierung zur Trennung von Neutronen und Photonen	8
3. Experimenteller Aufbau und Durchführung	9
3.1 Vorstellung der Neutronenquellen.....	9
3.1.1 Der Ausbildungs- und Forschungsreaktor AKR-2	9
3.1.2 Der GENIE35 an der HSZG	13
3.1.3 Der DT-Neutronengenerator am IKTP.....	13
3.2 Die verwendete Messapparatur	14
3.3 Beschreibung des Messablaufs	15
3.3.1 Messung des Neutronen(Spalt) spektrums am AKR-2	15
3.3.2 Messung des Neutronen(Fusions) spektrums am GENIE35.....	16
3.3.3 Messung des Neutronen(Fusions) spektrums am DD-NG des IKTP am HZDR	17
3.3.4 Messung mit Materialproben	18
4. Ergebnisse und Diskussion.....	19
4.1 Darstellung der entfalteten Neutronenspektren.....	19
4.2 Direkter Vergleich der Spektren von AKR-2 und DT-NG	22
4.2.1 Diskussion der Energieverteilung und der Spektrumsform	22
4.2.2 Physikalische Interpretation der Unterschiede.....	23
4.3 Analyse der spektralen Veränderung durch Probenmaterialien.....	24
4.4 Einordnung der Ergebnisse	27
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	27
6. Python-Programm Dokumentation.....	28
Abbildungsverzeichnis	
Quellenverzeichnis	
Selbstständigkeitserklärung	

Abkürzungsverzeichnis

AKR-2: Ausbildungskernreaktor-2

z.B.: zum Beispiel

bzw.: beziehungsweise

HSZG: Hochschule Zittau/Görlitz

HZDR: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

IKTP: Institut für Kern- und Teilchenphysik

TU: Technische Universität

[R.x]: x'te Rechnung

[x]: x'te Quelle

(x): x'te Formel

Abb.x: x'te Abbildung

°C: Grad Celsius

eV: Elektronenvolt

eVee: elektronenenergieäquivalente Elektronenvolt

eVep: protonenenergieäquivalente Elektronenvolt

PSD: Pulsformdiskriminierung

v.u.n.o.: von unten nach oben

DT: Deuterium-Tritium-Reaktion

DD: Deuterium-Deuterium-Reaktion

NG: Neutronengenerator

engl.: englisch

ger.: german (ger.) deutsch

a.u.: (engl.) arbitrary units (ger.) arbiträre Einheit

1. Einleitung

Basierend auf meinen derzeitigen Interessen in Politik und Naturwissenschaften, ist das Themenfeld schnell auf die Klimakrise und die Energiewende eingegrenzt worden, besonders zukünftige Möglichkeiten, kinetische Energie des Windes, Kernenergie und Strahlungsenergie in elektrischen Strom umzuwandeln. Heutige Möglichkeiten, elektrischen Strom zu „erzeugen“, haben Probleme, kontinuierlich elektrischen Strom dem Netzwerk ohne

Akkumulatoren zuzuführen. Um diese Probleme zu lösen, wird an kommerzieller Kernfusion geforscht. Diese verspricht, eine nahezu unendliche Energiequelle zu sein. Ein Versprechen von „unendlicher“ Energie klang für mich sehr interessant, daher kam die Idee, sich mit Kernfusion auseinander zu setzen. Außerdem spielt diese Art von Energiequelle eine große Rolle, um auch in Zukunft dem menschengemachten Klimawandel ein Ende zu setzen.

Dabei spielen Neutronenspektren eine essenzielle Rolle, um die Sicherheit von kerntechnischen Anlagen sicherzustellen, weil diese es ermöglichen, die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit von Neutronen unterschiedlicher Energien mit unterschiedlichen Materialien festzustellen.

Meine Problemfrage lautet: Welche Relevanz haben die Unterschiede in den Neutronenspektren der Kernfusion und der Kernspaltung?

Danke an die TU Dresden, die HSZG und das IKTP für die Möglichkeit, die Experimente durchzuführen, insbesondere Herr Dr. Ing. Viebach¹, Herr Dr. Ing. Lange¹, Herr Weichel¹ und Herr Knospe¹, die mir beim Zusammenstellen der Arbeit und der Durchführung der Experimente geholfen haben.

2. Theoretische Grundlagen

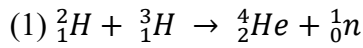
2.1 Neutronenquellen im Vergleich

2.1.1 Die DT-Fusionsreaktion: Kinematik und das quasi-monoenergetische 14.1-MeV-Neutronenspektrum

Bei der DT-Fusion werden die Elemente Deuterium und Tritium miteinander verschmolzen. Deuterium ${}^2_1\text{H}$ und Tritium ${}^3_1\text{H}$ sind Isotope des Wasserstoffs, mit einem Neutron bzw. zwei Neutronen. Normalerweise hält die Coulombbarriere, welche aufgrund der Abstoßung von gleichnamigen Ladungen existiert, die Teilchen (in diesem Fall Protonen) davon ab, in der Natur zu fusionieren. Um diese zu überwinden, werden bei Fusionsreaktoren, wie ITER, die Isotope unter sehr hohen Temperaturen von 150 Millionen °C zur Reaktion gebracht. [2] Wenn Deuterium und Tritium fusionieren, entstehen die Reaktionsprodukte Helium-4 ${}^4_2\text{He}$, ein Neutron ${}^1_0\text{n}$ und 17,6 MeV, siehe (1), die sich auf die kinetische Energie der Teilchen aufteilt.

¹ Mitarbeiter der TU Dresden

Das Heliumatom hat dann 3.5MeV und das Neutron 14.1 MeV, weil nur aufgrund von Impulserhaltung diese Verteilung der Energie möglich ist, also ist das Neutronenspektrum quasi-monoenergetisch, wie es auch aus [R.1] hervorgeht. [3] In der Rechnung zeige ich, wie aus der Gleichung der nicht-relativistischen kinetischen Energie eine Formel zur Geschwindigkeitsberechnung hergeleitet werden kann. Die Gleichung dient dazu, die Geschwindigkeiten der Fusionsprodukte auszurechnen mit den gegebenen Energie- und Massewerten. Mit der Geschwindigkeit und der Masse bestimme ich den Impuls der Spaltprodukte. Daraufhin wird der Impuls gleichgesetzt, um die beiden Impulse zu vergleichen. Schlussendlich kommt ein vernachlässigbarer Impulsunterschied zustande. Also hat das Neutron 14,1 MeV und das Heliumatom 3,5 MeV.



$$[R.1] E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

$$v({}^4_2He) = \sqrt{\frac{2 * 3,5MeV * c^2}{3728,401331MeV}} = 12,98997741 * 10^6 \frac{m}{s}$$

$$v({}^1_0n) = \sqrt{\frac{2 * 14,1MeV * c^2}{939,5654219MeV}} = 51,9375841 * 10^6 \frac{m}{s}$$

$$\vec{p} = mv$$

$$\vec{p}({}^4_2He) = 6,6464769983 * 10^{-27}kg * 12,98997741 * 10^6 \frac{m}{s}$$

$$\vec{p}({}^4_2He) = 8.6337586053 * 10^{-20}kg \frac{m}{s}$$

$$\vec{p}({}^1_0n) = 1,674927500610^{-27}kg * 51,9375841 * 10^6 \frac{m}{s}$$

$$\vec{p}({}^1_0n) = 8.6244387549 * 10^{-20}kg \frac{m}{s}$$

$$\vec{p}({}^1_0n) = 8.6244387549 * 10^{-20}kg \frac{m}{s} \approx \vec{p}({}^4_2He) = 8.6337586053 * 10^{-20}kg \frac{m}{s}$$

2.1.2 Die Kernspaltung: Das kontinuierliche prompte Spaltneutronenspektrum

Kernspaltung ist ein physikalischer Vorgang, bei dem ein Atomkern in mindestens zwei weitere Kerne geteilt wird und dabei zusätzlich Neutronen frei werden.

Am Beispiel Uran-235 $^{235}_{92}\text{U}$, das mit langsamen/thermischen Neutronen mit einer Energie von 0,025eV beschossen wird, fängt Uran das Neutron ein und wird zum instabilen Uran-236 $^{236}_{92}\text{U}$, welches sich in Krypton-92 $^{92}_{36}\text{Kr}$, Barium-141 $^{141}_{56}\text{Ba}$ und drei Neutronen spalten kann. Es existieren noch weitere Möglichkeiten. [8] Auf diese Teilchen (Spaltprodukte) verteilt sich kinetische Energie, welche bei der Kernspaltung aus der Bindungsenergie umgewandelt wird. Dabei fallen auf die Neutronen 0 bis 10 MeV. Diese Energieverteilung lässt sich mit einem Watt-Spektrum näherungsweise darstellen, wobei die Neutronen ein kontinuierliches und promptes Spektrum aufweisen. [4]

Prompte Neutronen sind Neutronen, die innerhalb von 10^{-14}s nach der Spaltung entstehen. Kontinuierliche Neutronenspektren weisen eine fortlaufende Verteilung von Neutronenintensität über einen Energiebereich, in diesem Beispiel 0 bis 10 MeV auf. [1][17]

2.2 Wechselwirkung von schnellen Neutronen mit Materie

Neutronen im MeV Bereich werden als schnelle Neutronen bezeichnet. Bei diesem bestimmten Energiebereich ergeben sich mehrere Möglichkeiten der Wechselwirkung: die elastische, inelastische Streuung, der Neutroneneinfang und die Kernspaltung.

Bei elastischer Streuung überträgt das Neutron einen Teil seiner kinetischen Energie/Impuls auf ein anderes Teilchen und die Gesamtenergie bzw. der Impuls bleibt erhalten.

Die inelastische Streuung ist dadurch charakterisiert, dass das Neutron kinetische Energie an das getroffene Teilchen abgibt, der Kern deswegen angeregt wird und Gammastrahlung emittiert. Also hat das System nach der Streuung einen geringeren Impuls als zuvor.

Der Neutroneneinfang beschreibt den Prozess, bei dem ein Neutron vom Kern absorbiert wird, was zur Bildung eines Isotops führt, oder es wird ein Teilchen des Kerns herausgelöst, was besonders bei schnellen Neutronen geschehen kann, z.B. bei Neutronen aus der DT-Fusion.

Schnelle Neutronen können auch Kerne spalten. Dabei würde ein Atomkern sich mindestens in zwei weitere Kerne und ein oder mehr Neutronen spalten. [8][16][17]

2.3 Grundlage der Neutronendetektion mit organischen Szintillatoren

2.3.1 Funktionsweise des Stilben-Detektors

Stilben ist ein organischer Kristall, der viele Wasserstoffkerne (Protonen) hat. Deswegen eignet er sich besonders gut als Detektormaterial. Hauptsächlich wird Stilben in Szintillatoren verwendet, um Neutronen und Gammastrahlung zu messen. Szintillation beschreibt den Vorgang, bei dem durch ein Teilchen ein Stoff zum Emittieren von Photonen angeregt wird. [10][11][16] Ein Photomultiplier mit Stilben, ist in der Abbildung 1 zusehen.

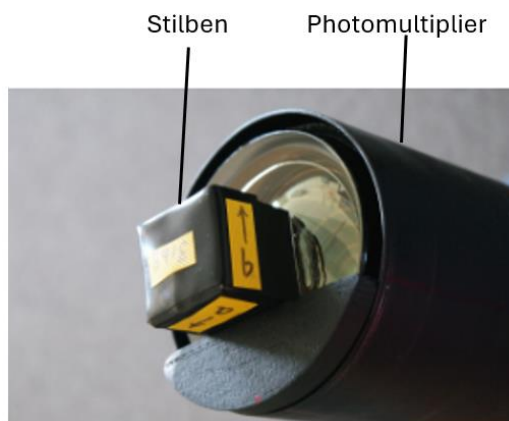


Abbildung 1 Stilben vor einem Photomultiplier

Wenn ein Neutron auf den Szintillator trifft, regt es ein Proton in dem Stilben durch elastische Streuung an. Das angeregte Proton ist bestrebt, diesen Zustand zu verlassen, also gibt es seine Energie wieder ab als Photon. Neutronen regen die Elektronen nicht an, weil sie keine elektrische Ladung haben, also keine elektromagnetische Wechselwirkung mit den Elektronen eingehen. Zunächst können die einzelnen Photonen nicht gemessen werden, also wird ein Photomultiplier genutzt, der als erstes aus einer Photokathode besteht. Die Photonen treffen auf diese Photokathode und lösen wegen des äußeren Photoeffektes freie Elektronen aus der Oberfläche. Eine Photokathode ist eine Metallplatte mit sehr geringer Auslösearbeit. Diese Elektronen werden durch bis zu 20 Dynoden beschleunigt und lösen bei jeder Dynode weitere Elektronen heraus. Eine Elektronenkaskade entsteht. [6][16] Dynoden sind Elektroden, die so angeordnet sind, dass aus der ersten Elektrode herausgelösten Elektronen auf die nächste mit mehreren 100eV treffen. Die Elektronen wurden durch das elektrische Feld beschleunigt. [19]

Am Ende des Photomultiplier ist eine Anode angebracht, die die Elektronen in Strompulse umwandelt. [6][16]

Die Strompulsamplituden werden durch einen Analog-Digital-Wandler einem Wert zugeordnet und dieser übermittelt diese an ein Programm, welches die Anzahl zählt von gleichen Amplituden. Die Strompulsamplitude ist proportional zur Photonenanzahl, welche wiederum proportional zur Energie des Teilchens ist. Ein Mehrkanalanalysator erstellt ein Histogramm aus der Anzahl gleicher Amplituden (Ordinatenachse) und ihrer zugeordneten Werte (Abszissenachse). Dieses Histogramm wird auch Spektrum genannt. [7] Ein Protonenrückstoßhistogramm des AKR-2 ist in Abbildung 2 zu sehen.

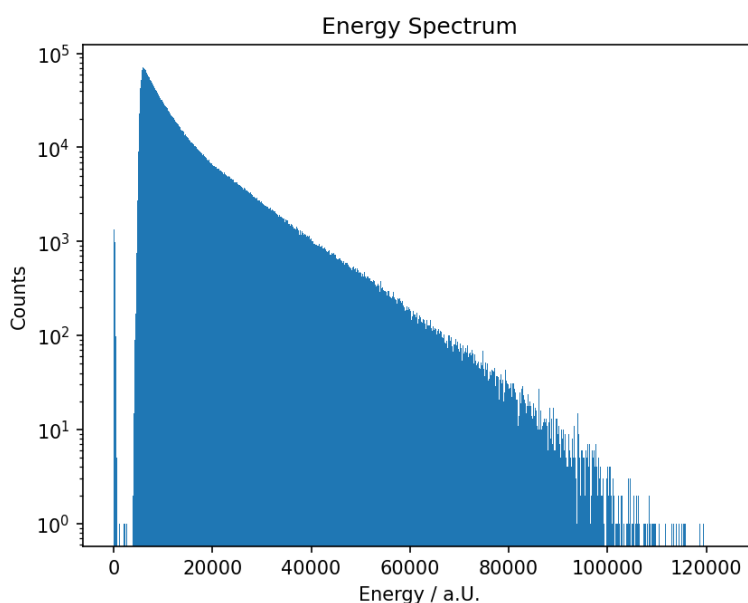


Abbildung 2 Protonenrückstoßhistogramm mit Counts in Abhängigkeit der Energie

2.3.2 Pulsformdiskriminierung zur Trennung von Neutronen und Photonen

Bei der Pulsformdiskriminierung wird die Länge des Pulses analysiert. Dafür bildet man unterschiedliche Pulse in einem Pulsamplitude-Zeit-Diagramm und legt zwei Bereiche fest. Ein Bereich wird als „fast“ bezeichnet. Dieser geht vom Start der Pulse, bis der dominierende Puls unter den anderen Pulsen liegt. Der andere Bereich, genannt „slow“, geht vom Ende von „fast“ bis zum Ende der Pulse. Um zu differenzieren, welcher Puls von Neutronen und welcher von Gammastrahlung ausgeht, schaut man sich das Verhältnis der Flächen, die die Pulse in den zwei Bereichen einschließen, in Bezug auf die gesamte Fläche an. Das gebildete Verhältnis wird PSD-Parameter genannt. Neutronen haben einen höheren PSD-Parameter als Gammastrahlung, weil sie einen längeren Puls haben und somit eine größere Fläche einschließen. [9] In der

Abbildung 3 ist zusehen, wie der PSD-Parameter in Abhängigkeit von der Energie in a.u. die Neutronen von den Photonen trennt. Dabei zeigt die Ordinatenachse den PSD-Parameter, die Abszissenachse, die Energie in a.u. und die Farbe zeigt einem die gezählten Ereignisse pro Energie pro PSD-Parameter. Die Farbe geht von violett für ein Ereignis bis rot für $5 \cdot 10^3$ Ereignisse. Außerdem sieht man zwei geometrische Figuren, welche die zwei Schweife umranden. Diese dienen der Markierung, um die Pulse von Neutronen (rot) und Photonen (grün) zu trennen. In der unteren Hälfte des Diagramms wird der Bereich mit der höchsten Anzahl an Ereignissen mit dem dazugehörigen PSD-Parameter. Links sind die Photonen dargestellt und rechts die Neutronen.

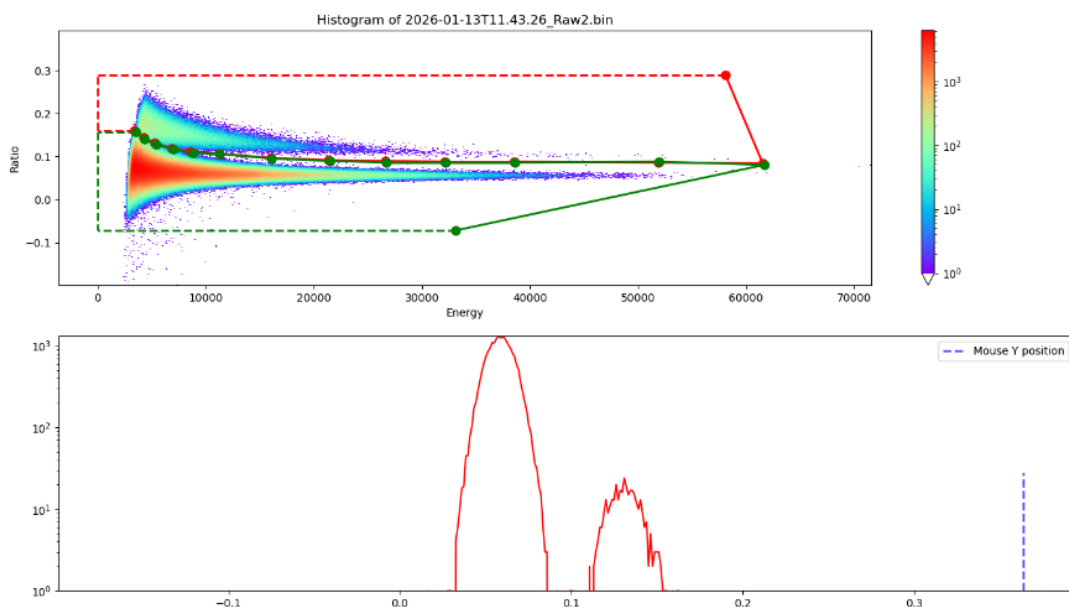


Abbildung 3 PSD-Histogramm mit gezählten Ereignissen

3. Experimenteller Aufbau und Durchführung

3.1 Vorstellung der Neutronenquellen

3.1.1 Der Ausbildungs- und Forschungsreaktor AKR-2

Der Kernspaltreaktor steht an der TU Dresden und ist angegliedert in der Fakultät für Maschinenwesen. In der Abbildung 4 sieht man (v.u.n.o.), dass der AKR-2 aus Druckwächter,

Vakuumpumpe, Aerosolfilter, Antrieb für Kernhubwerk und Neutronenquelle, Container für Neutronenquelle, Unterdrucksystem bzw. Reaktortank, Steuerstäbe, Neutronenquelle, Spaltzone, horizontale Experimentierkanäle, Graphitreflektor, Reaktorbehälter mit biologischer Abschirmung, Radialkanal, Reaktordeckel, vertikale Experimentierkanäle und dem Reaktorkopf mit Schutzgelenk besteht. Die Abbildung 5 zeigt den Reaktortank mit Spaltzone in der Mitte, der umgeben ist von drei Steuerstäben. Durch die Spaltzone gehen die Zentralkanäle und unmittelbar daneben verlaufen die Tangentialkanäle. Um die Spaltzone ist ein Graphitreflektor, der von einem Stahlmantel umgeben ist. Auf den Stahlmantel folgt ein Luftspalt. Die biologische Abschirmung des Reaktors besteht aus einer Paraffin- und danach einer Barytbetonschicht. Der Reaktor ist schlussendlich noch von einem Stahlmantel umgeben. Über der Spaltzone ist ein Radialkanal. [15] Damit der Reaktor weitere Spaltreaktion vollzieht, wird ein Graphitreflektor genutzt, der Neutronen durch Streuung wieder zurück auf die Spaltzone reflektiert. Experimentierkanäle ermöglichen es verschiedene Proben bzw. Detektoren dort für Experimente anzubringen. Innerhalb der Spaltzone findet die Spaltung des Atoms statt. Außerhalb der Spaltzone sind Steuerstäbe aus Cadmium, welche die Reaktivität des Reaktors regulieren. Durch Absorption der Neutronen kann auch gesteuert werden, wie viel Neutronen sich innerhalb der Spaltzone befinden. Zur Sicherheit existiert die Reaktorschnellabschaltung, bei der alle Steuerstäbe auf die Höhe der Spaltzone bewegt werden, um möglichst viele Neutronen zu absorbieren und die Kettenreaktion damit zu stoppen. Die Neutronenquelle kann über das Kernhubwerk aus der Spaltzone in einen Container gefahren werden. Bei der Reaktorschnellabschaltung wird die Neutronenquelle fallen gelassen und im Container durch Magnete aufgefangen, um die Kernspaltung in der Spaltzone zu stoppen. [15]

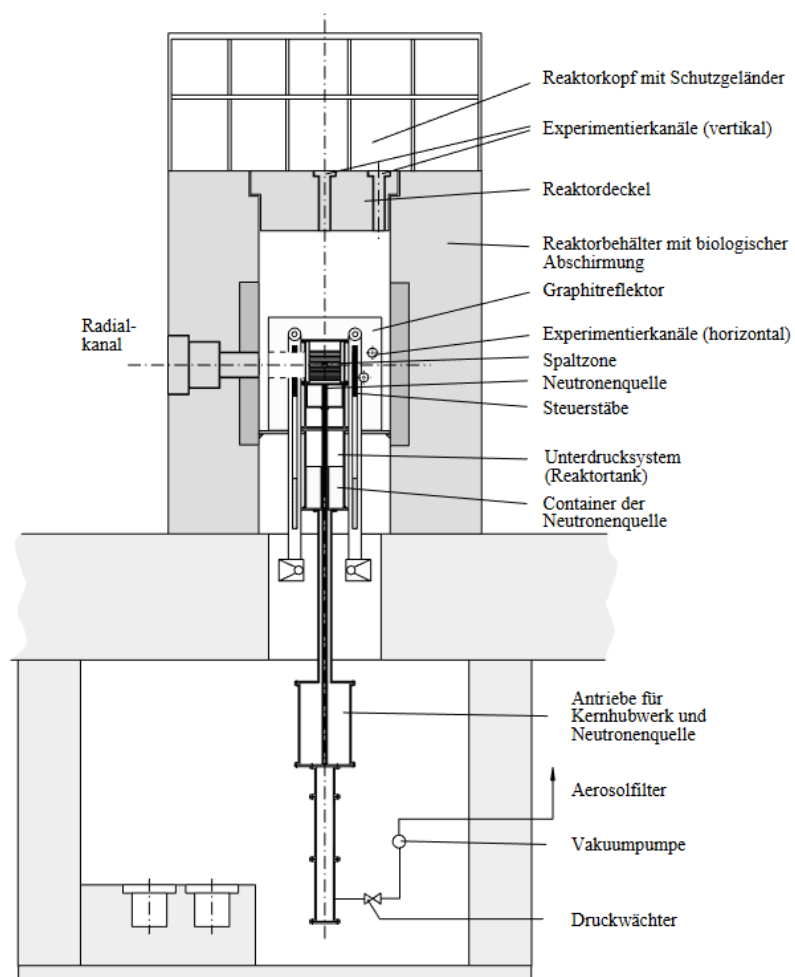


Abbildung 4 Aufbau des AKR-2 Seitenansicht

3.1.2 Der GENIE35 an der HSZG

Der GENIE35 ist von der Firma „Sodern“. [21] Das Deuterium kommt aus dem „Replisher“ (v.l.n.r.), wenn dieser erhitzt wird. In der Ionenquelle werden die Deuteriumatome durch die angelegte Spannung ionisiert. Darauf folgt die Beschleunigungsstufe, welche mit einer Hochspannung von 60 kV bis 100 kV die Deuterium-Ionen auf das DT-Target beschleunigt. [22]

3.1.3 Der DT-Neutronengenerator am IKTP

In der Abbildung 6 sieht man den Aufbau des DT-Neutronengenerator, der aus einem Duoplasmatron, Analyse-Magnet, Beschleunigungsröhren, Dipol-Magnet, Quadrupol Magneten und dem Deuterium- oder Tritiumziel besteht. Der Duoplasmatron ionisiert ein Gas mit 45kV aus Deuterium. Dabei entsteht ein Plasma aus Elektronen und Deuterium-Ionen ${}^2_1H^+$. Plasma beschreibt ein Zustand, in dem ein Teilchengemisch maßgeblich aus Ladungsträgern, also ionisierten Teilchen (in diesem Fall Deuterium-Ionen), besteht. Die Deuterium-Ionen (Deuteronen) werden durch eine Extraktions-Elektrode aus dem Plasma heraus beschleunigt. Darauf folgt eine Analyse-Magnet, der ungefähr, wie ein Massenspektrograph funktioniert. Dieser ist so eingestellt, dass nur Ionen durchgelassen werden, die die gewollte Masse und Ladung haben, dementsprechend monomere Deuterium-Ionen, also keine Verbindungen aus mehreren Deuterium-Ionen. Diese Ionen werden auf eine Beschleunigungsröhre abgelenkt, die die Teilchen auf bis zu 345keV durch eine Spannung von bis zu 300kV beschleunigt, weil die vorherige Spannung von 45kV zur Extraktion des Deuteriums mit beachtet werden muss. [5][12] Der Dipol-Magnet wird verwendet, um den Ionenstrahl auf das Quadrupol Magnetsystem abzulenken. [13] Ein Quadrupol ist ein Magnet, der wie eine Linse wirkt, weil er vier Pole hat, zwei Südpole und zwei Nordpole, welche den Ionenstrahl auf das Ziel fokussieren. [14] Als Ziel wird eine wassergekühlte Titaniummatrix verwendet, welche auf einem Kupferträger angebracht ist. In die Matrix wird Tritium oder Deuterium absorbiert. [12] In der Abbildung 11 sieht man die Quadrupol-Magnete und das Ziel, auf das die Deuterium-Ionen treffen.

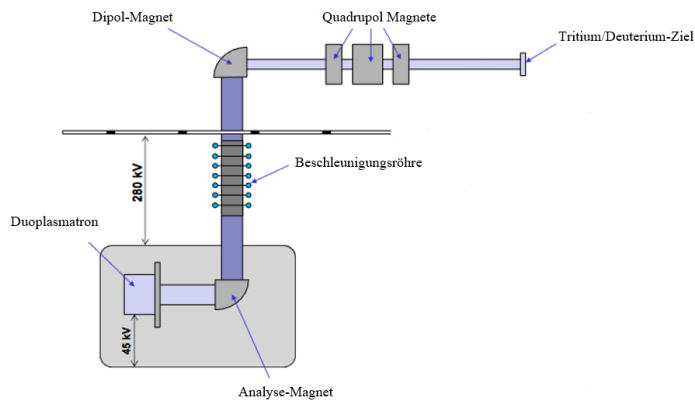


Abbildung 6 Aufbau des NG am IKTP ohne Detektor

3.2 Die verwendete Messapparatur

In der Abbildung 7 sieht man den Versuchsaufbau für die Messung eines Neutronenstrahls aus einer Neutronenquelle. Dieser Strahl wird detektiert durch einen Neutronendetektor. Die Detektordaten werden erfasst und verarbeitet. Der Versuchsaufbau in der Abbildung 8 mit Probe ist identisch mit dem ohne Probe. Es ändert sich nur, dass man eine Probe in den Neutronenstrahl platziert. Die Daten wurden durch das „neXmess“-System erfasst und in Histogrammen dargestellt. [23] Am AKR-2 wurde ein Stilben mit einer Höhe von 51mm verwendet, sowie am IKTP und am GENIE35 wurde ein Stilben mit einer Höhe von 20mm verwendet.

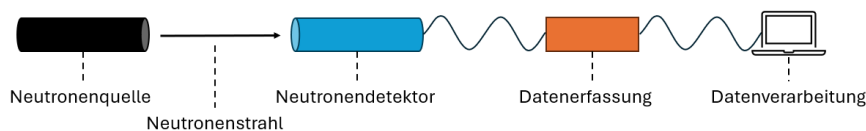


Abbildung 7 Messaufbau ohne Probe

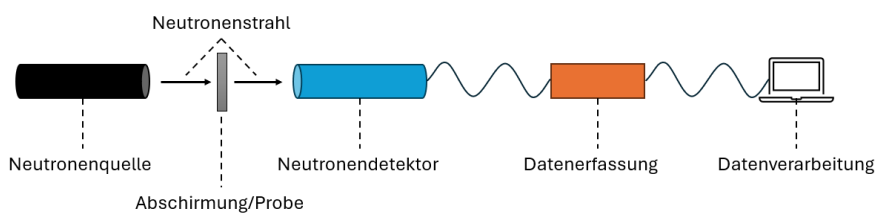


Abbildung 8 Messaufbau mit Probe

3.3 Beschreibung des Messablaufs

3.3.1 Messung des Neutronen(Spalt) spektrums am AKR-2

Die Messung des Spektrums am AKR-2 ist in der Abbildung 9 zu sehen. Auf der linken Seite ist der AKR-2 und der Experimentierkanal 7 und auf der rechten Seite steht der Stilben-Detektor im Abstand von 2m und in der Höhe von 1,30m. Dabei hat der ADC auf eine Ereigniszählrate von $500 * 10^6 \text{ Hz}$. Der Detektor funktioniert mit einer Spannung von 1,24kV, welche über einen Hochspannungsquelle erzeugt wurde. Am AKR-2 dauerte die Messung eine halbe Stunde.

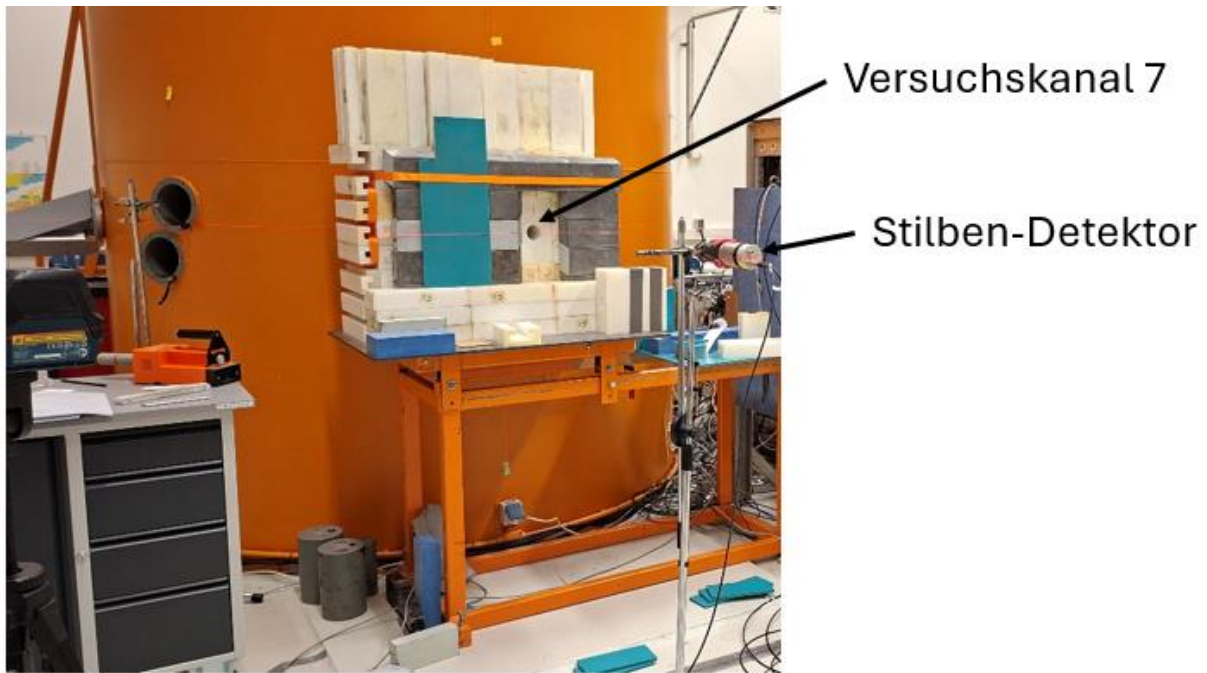


Abbildung 9 AKR-2 mit Stilben-Detektor vor Versuchskanal 7

3.3.2 Messung des Neutronen(Fusions) spektrums am GENIE35

Die Messung des Spektrums am DT-NG ist in der Abbildung 10 zu sehen. Auf der linken Seite ist der GENIE35 und auf der rechten Seite steht der Stilben-Detektor im Abstand von 20cm und in der Höhe von einem Meter, ausgehend von dem Boden. Der Stilben-Detektor ist mit dem ADC über ein Datenkabel verbunden. Dabei hat der ADC auf eine Ereigniszählrate von $500 * 10^6 \text{ Hz}$. Der Detektor funktioniert mit einer Spannung von 1,24kV, welche über einen Hochspannungsquelle erzeugt wurde. Am GENIE35 dauerte die Messung eine Stunde.

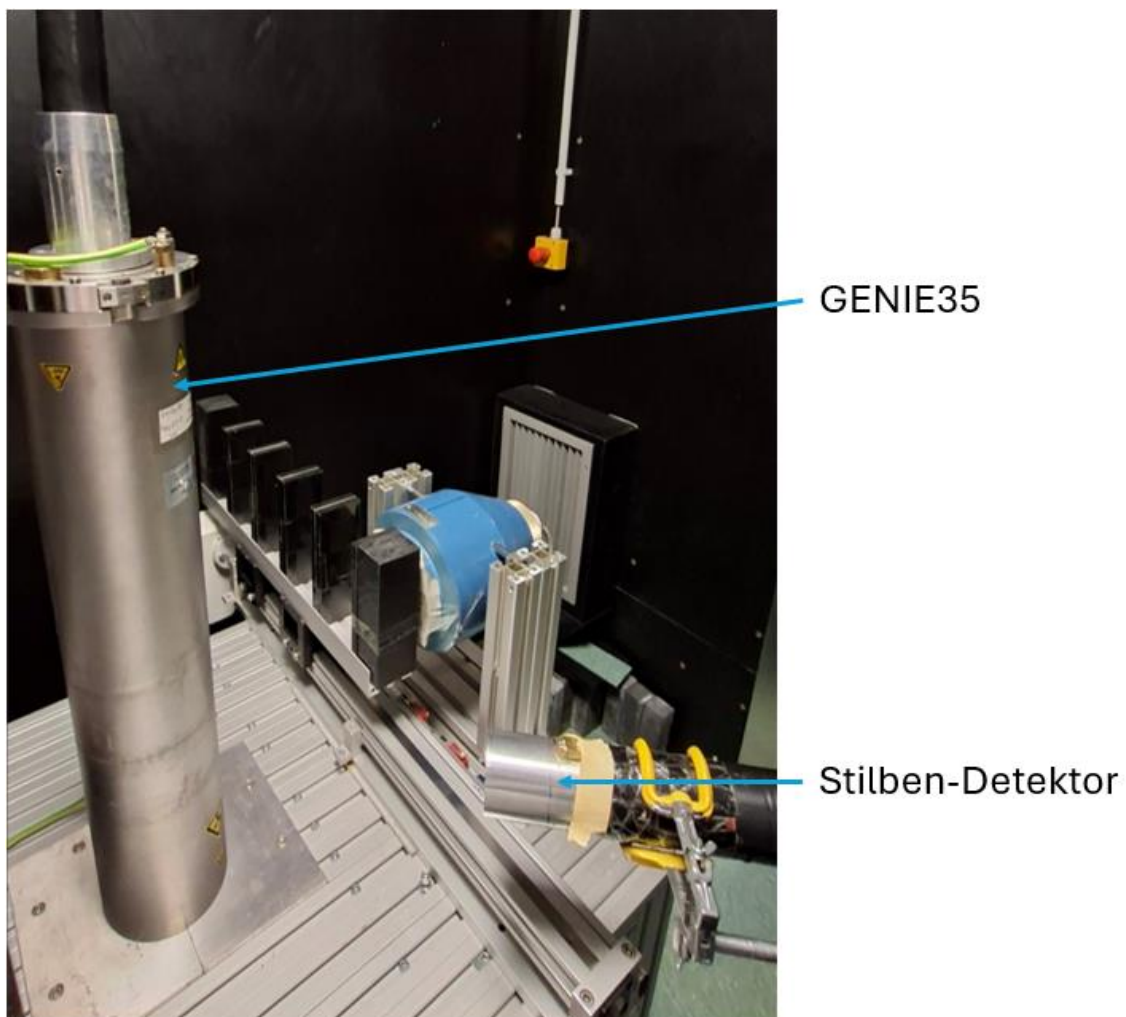


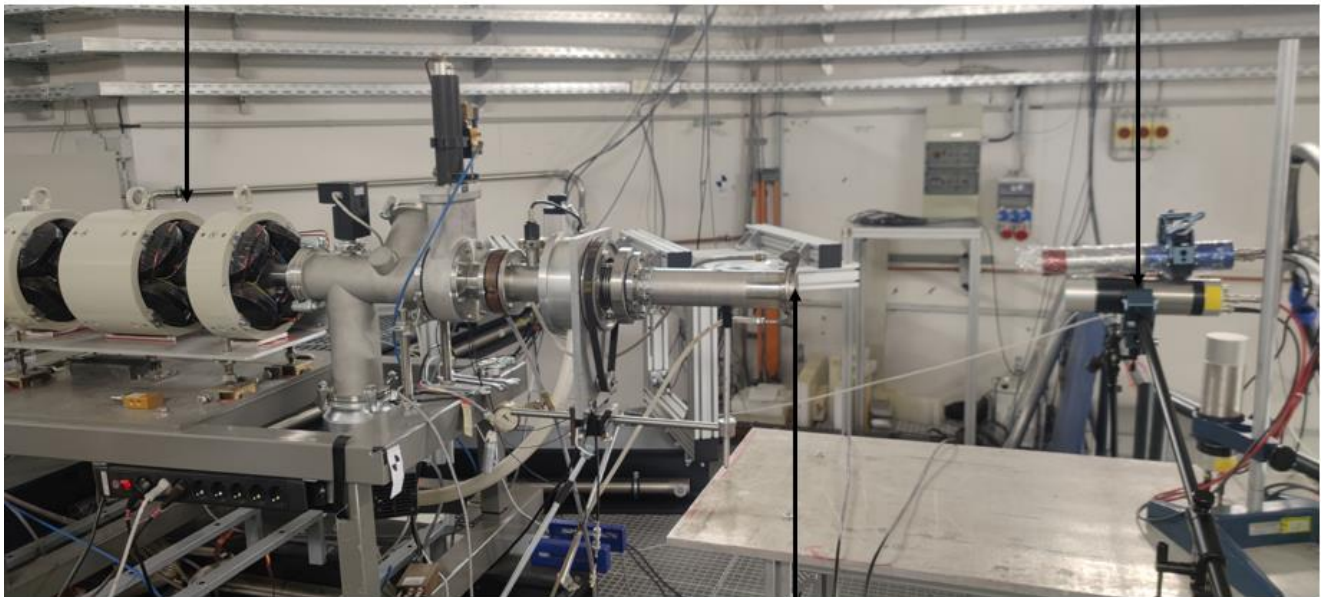
Abbildung 10 GENIE 35 mit Stilben-Detektor

3.3.3 Messung des Neutronen(Fusions) spektrums am DD-NG des IKTP am HZDR

Die Messung des Spektrums am DD-NG ist in der Abbildung 11 zu sehen. Auf der linken Seite ist ein Teil des DD-NG, das Deuterium-Target und auf der rechten Seite steht der Stilben-Detektor im Abstand von 50cm und in der Höhe von 40cm. Der Stilben-Detektor ist mit dem ADC über ein Datenkabel verbunden. Dabei hat der ADC auf eine Ereigniszählrate von $500 * 10^6 \text{ Hz}$. Der Detektor funktioniert mit einer Spannung von 1,24kV, welche über einen Hochspannungsquelle erzeugt wurde. Am DD-NG dauerte die Messung eine Stunde.

Quadrupol Magnete

Stilben-Detektor



Deuterium-Ziel

Abbildung 11 Neutronengenerator IKTP mit Stilben-Detektor

3.3.4 Messung mit Materialproben

Abbildung 12 zeigt die Messung mit einer Titan-Probe vor dem Stilben-Detektor am AKR-2. Der Stilben-Detektor steht direkt an der Probe, das ermöglicht geringere Raumeffekte. Die Distanz zwischen Detektor und AKR-2 beträgt dabei 1m, bei einer Höhe von 1,30m. Das gewährleistet bei gleicher Dauer der Messung die gleiche Anzahl an Neutronen, da das Titan im Energiebereich von 1MeV bis 10MeV einen Teil der Neutronenstrahlung abschirmt. [16][18] Am AKR-2 dauerte die Messung mit Probe eine halbe Stunde.

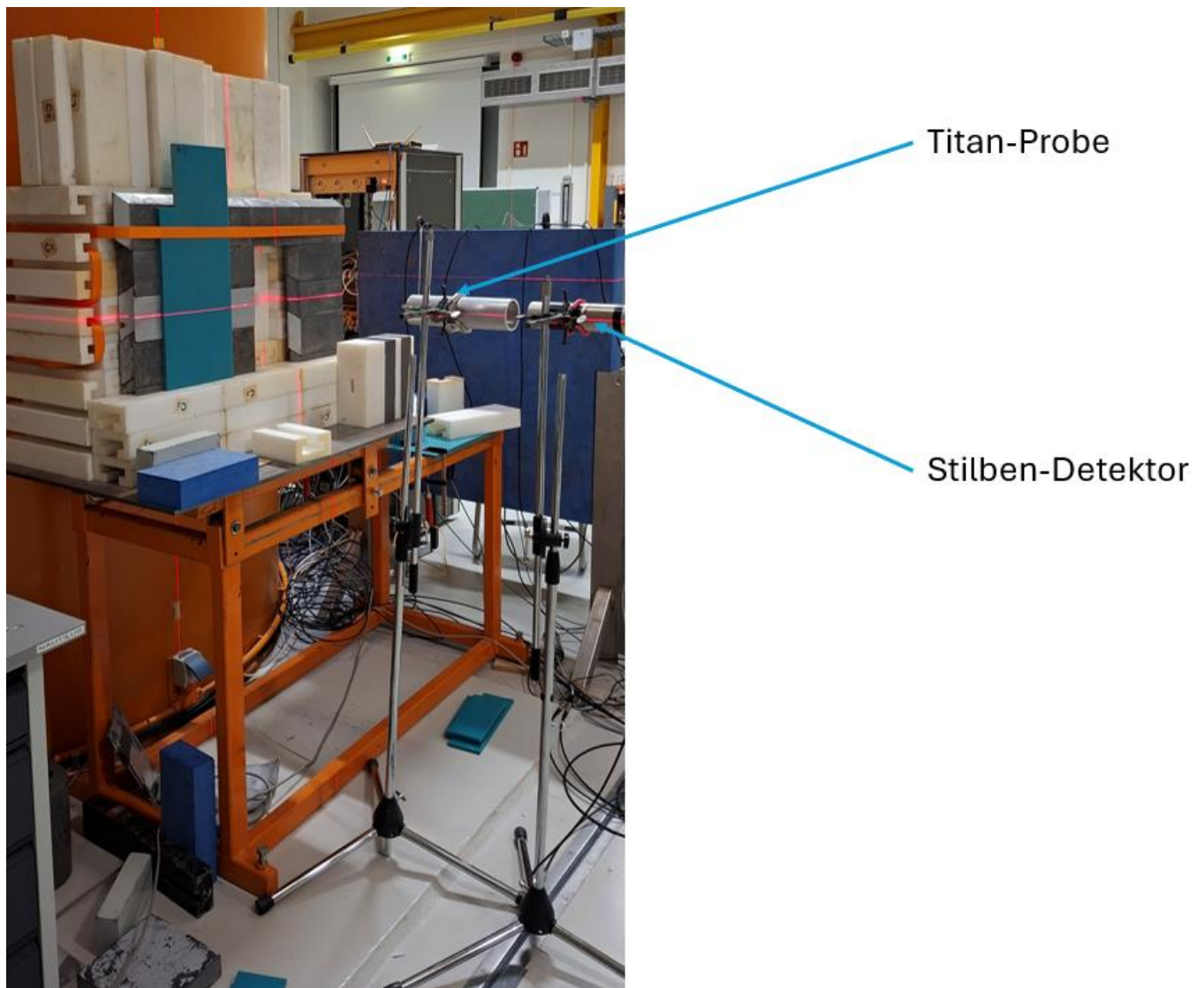


Abbildung 12 Titan-Probe zwischen Stilben-Detektor und AKR-2

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Darstellung der entfalteten Neutronenspektren

Die Neutronenspektren werden durch die Formeln (2), (3), (4), (5) und (6) entfaltet. Formel (3) folgt aus Formel (2), wenn man annimmt, dass $K(E_N, E_P)$ eine rechteckige Responsematrix ist. [24] Eine Responsematrix ist die detektorspezifische Ansprechfunktion auf Neutronen und Photonen, also wie werden bestimmte Ereignisse im Detektor in die Daten eingeordnet. [25] Rechteckige Responsematrix meint, dass der Detektor jede Energie gleich gewichtet, was durch die Heaviside-Stufen-Funktion dargestellt wird. [27] Die Formel (3) beschreibt $\Phi(E_N)$, das Neutronenspektrum in Abhängigkeit von der Neutronenenergie, Formel (4) beschreibt die nicht-lineare Lichtausbeute von Protonenrückstößen $P(E_P)$ in der Abhängigkeit der Protonenenergie, Formel (5) beschreibt die Detektoreffizienz $\varepsilon(E_N)$ von Stilben in der Abhängigkeit der Neutronenenergie und der Höhe des Stilben-Kristalls und Formel (6) beschreibt den makroskopische Wirkungsquerschnitt von Wasserstoff Σ_H in Abhängigkeit von der Neutronenenergie. [24][26]

Zur Entfaltung des Spektrums muss Formel (4) interpoliert werden, um von Protonenrückstoßspektren, die auf elektronenenergieäquivalente Elektronenvolt eVee kalibriert sind, auf protonenenergieäquivalente Elektronenvolt eVep umzurechnen. Zur Kalibrierung des Protonenrückstoßspektrums auf eVee wird die Comptonkantenkalibrierung verwendet, auch Kornilov-Methode genannt, [33] weil die Lichtausbeute von Elektronenrückstößen linear ist. [24] Die Comptonkante wird durch die Messung von einer Gammastrahlungsquelle, wie Cs-137 oder dem Neutroneneinfang von Wasserstoff, bei dem ein Wasserstoffatom ein Neutron aufnimmt und zu Deuterium und einem Gamma umgewandelt wird, bestimmt (7). [24][28] Dafür sucht man den maximalen negativen Anstieg des Elektronenrückstoßspektrum, also der Wendestelle des Spektrums bzw. dem Tiefpunkt der ersten Ableitung. Der Mittelwert aus der Anfangs- und Endstelle der Geraden ist angenähert äquivalent dem Wert der Comptonkante in Energiekanälen. Bei der Formel (7) ist der Wert der Comptonkante 1994keV [28] und bei Cs-137 ist die Comptonkante bei 477keV. [29] Darauf folgt die Entfaltung des Neutronenspektrums mit der Formel (3), um diese verwenden zu können muss man Formel (4) ableiten. Danach muss die Kettenregel für Ableitungen auf die Multiplikation aus dem Anstieg des Protonenrückstoßspektrums und die vorher abgeleitete Formel (4) angewendet werden, für die Entfaltung. [24]

$$(2) N[P(E_P)] = \int_{E_P}^{\infty} \Phi(E_N) K(E_N, E_P) dE_N$$

$$(3) \Phi(E_N) = -\frac{E_N}{\varepsilon(E_N)} * \frac{d}{dE_P} \left[N(P) \frac{dP}{dE_P} \right]$$

$$(4) P(E_P) = B(\omega) E_p^{1,5} \cdot e^{(0,016 E_p^{-1,5} - 0,021 E_p^{0,9})} \text{ mit (4,1)}$$

$$(4,1) B(\omega) = B_0 \cdot f(\omega); B_0 = 0,176; f(\omega) = 1 + 0,2 \sin(\omega) \text{ und } \omega = 0^\circ$$

$$(5) \varepsilon(E_N) = 1 - e^{(-\Sigma_H(E_N) \cdot \mathcal{L})}$$

$$(6) \Sigma_H(E_N) = 4,67 * 10^{-2} \left(\frac{17,593}{1+7,417 E_N + 0,1105 E_N^2} + \frac{2,7167}{1+0,2427 E_N + 0,0028 E_N^2} \right)$$

$$(7) {}^1_1H + {}^1_0n^0 \rightarrow {}^2_1H + \gamma$$

Abbildung 13 zeigt das entfaltete Neutronenspektrum des AKR-2 ohne Probe. Abbildung 14 zeigt das entfaltete Neutronenspektrum des GENIE35. Abbildung 15 zeigt das entfaltete Neutronenspektrum des DD-NG. Und die Abbildung 16 zeigt das Neutronenspektrum des AKR-2 im Vergleich mit Lektürewerten. Die Achsen der Abbildungen sind halb-logarithmisch. Auf der Ordinaten-Achse ist der Neutronenfluss, welcher die Einheit a.u. hat, in Abhängigkeit von der Abszissen-Achse dargestellt, welche die Energie in MeV angibt.

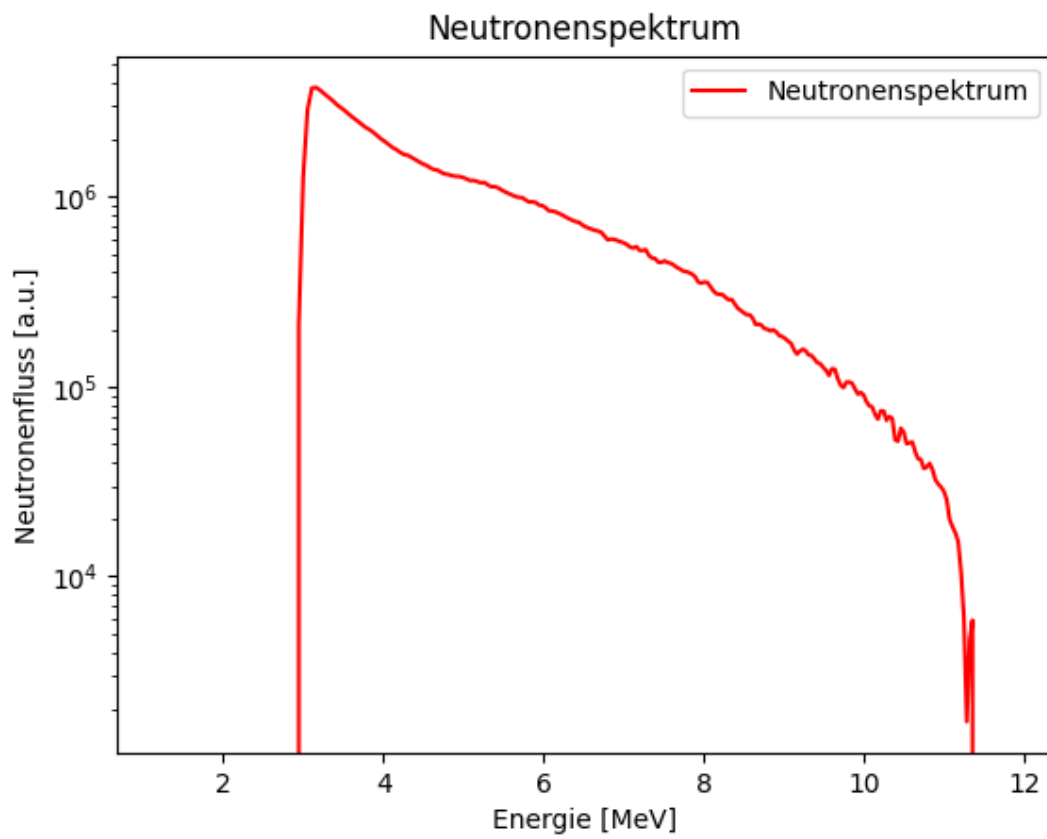


Abbildung 13 Neutronenspektrum AKR-2

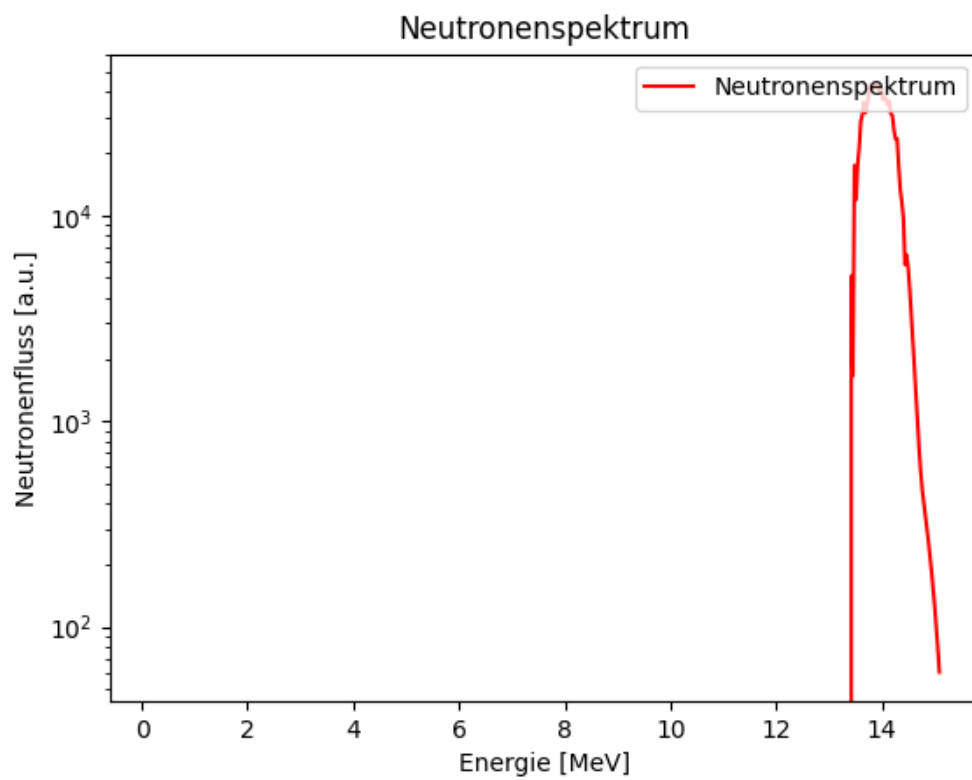


Abbildung 14 Neutronenspektrum GENIE35

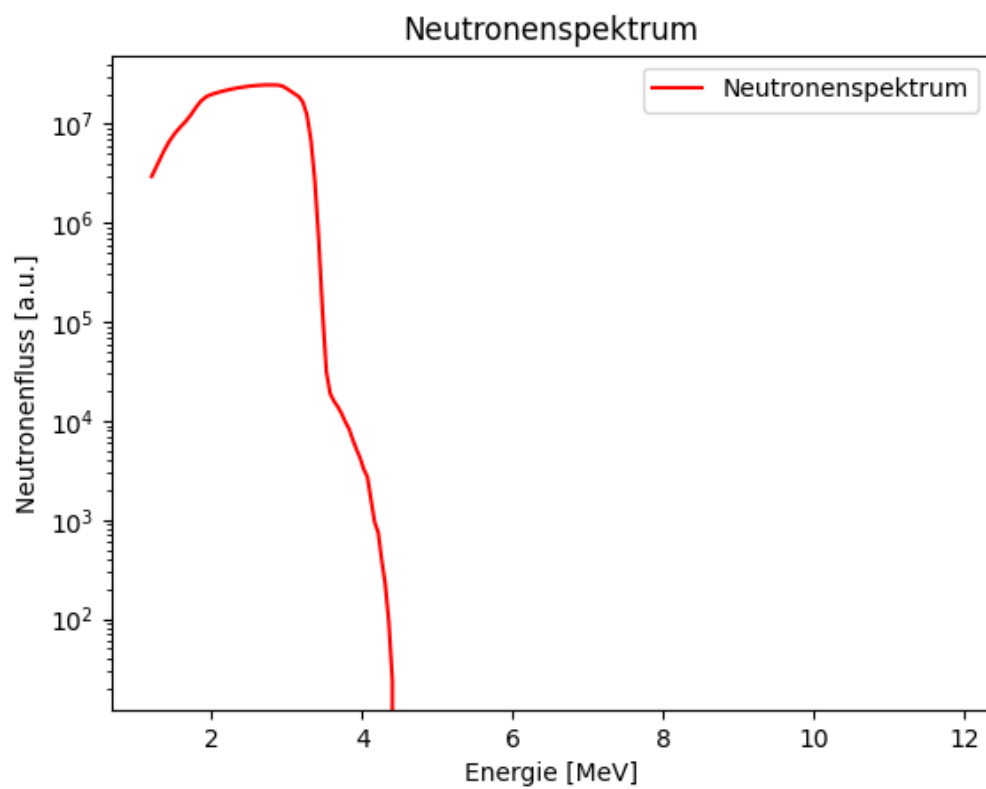


Abbildung 15 Neutronenspektrum DD-NG IKTP

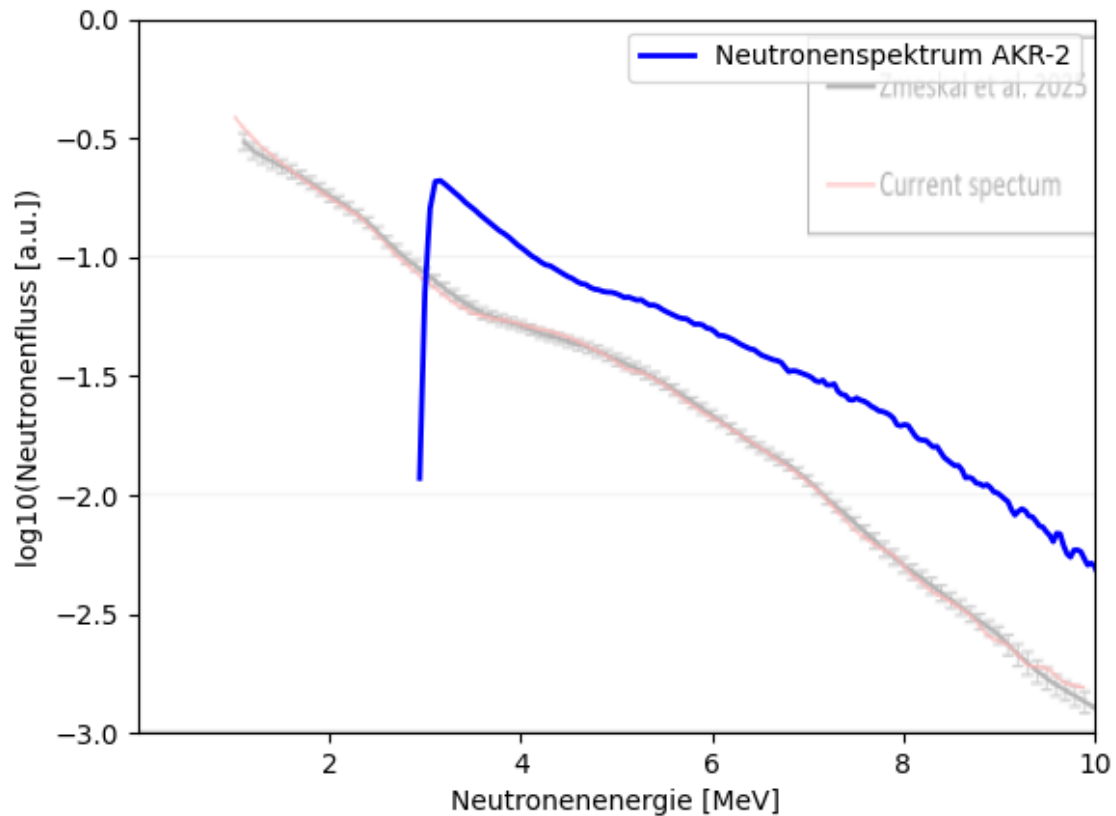


Abbildung 16 Vergleich Neutronenspektrum AKR-2 mit vorheriger Messung

4.2 Direkter Vergleich der Spektren von AKR-2 und DT-NG

4.2.1 Diskussion der Energieverteilung und der Spektrumsform

Die Abbildung 17 zeigt die Spektren des GENIE35 und AKR-2 in einem Diagramm. Generell sieht man, dass sich beide Spektren innerhalb des Energiebereichs der schnellen Neutronen befinden, also innerhalb von einem MeV und 20 MeV. [16] Außerdem ist der Hochpunkt des GENIE35-Spektrums bei der Stelle 14 MeV mit dem Neutronenfluss von ca. 10^4 . Dieser Wert findet sich wieder im Spektrum des AKR-2 bei elf MeV. Der erste Unterschied besteht in dem Energiebereich, welcher von dem Spektrum abgedeckt wird. Das Spektrum des AKR-2 deckt den Energiebereich von 2,9 MeV bis 11,3 MeV ab, und das Spektrum des GENIE35 deckt einen Bereich von 13,4 MeV bis 15,1 MeV ab. Da heraus resultiert die Unterscheidung beider in ein kontinuierliches Spektrum im Falle des AKR-2 und in ein quasi-monoenergetisches im Falle des GENIE35. Außerdem ist festzuhalten, dass das Spektrum des AKR-2 einen höheren

Neutronenfluss besitzt als der GENIE35. Insbesondere die Maxima bei 3 MeV im AKR-2-Spektrum und das des GENIE35 bei 14 MeV.

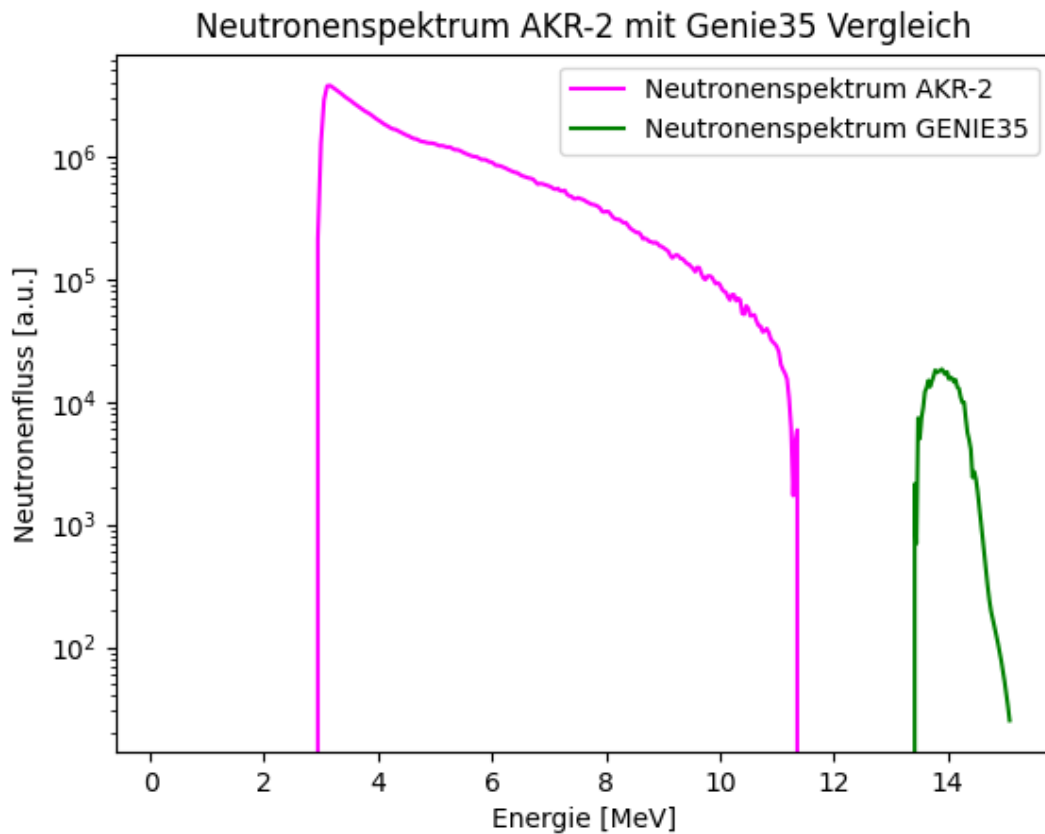


Abbildung 17 Vergleich Neutronenspektrum AKR-2 mit GENIE35

4.2.2 Physikalische Interpretation der Unterschiede

Die Fusion der Kerne von Deuterium und Tritium setzt ein Maximum bei ca. 14,1 MeV basierend auf der Impulserhaltung der Reaktionsprodukte [R.1] voraus. Deswegen ergibt sich auch das quasi-monoenergetische Spektrum. Das Neutronenspektrum des AKR-2 ist kontinuierlich verteilt, weil es eine statistische Verteilung ist, welche Energie die Neutronen in Folge der Kernspaltung bekommen. Der Energiebereich der Spaltung von Uran liegt zwischen einigen wenigen eV und ca. 10 MeV, [1][17] das Spektrum des AKR-2 verläuft bis 11,3 MeV. Eine mögliche Ursache dafür ist die AmBe-Quelle, welche der Spaltreaktion im AKR-2 Neutronen zu führt, um das Uran in der Spaltzone zur Spaltung anzuregen. [15][32]

4.3 Analyse der spektralen Veränderung durch Probenmaterialien

In der Abbildung 18 wird deutlich, dass die Titan-Probe einen Teil des Neutronenstrahls abschwächt, wenn man das abgeschirmte Neutronenspektrum in das gleiche Diagramm mit dem Neutronenspektrum ohne Titan setzt. Basierend auf dem Lambert-Beer'schen- Gesetz kann man mit der Länge der Probe im Strahl und der Intensität des Strahls mit und ohne Probe, den mikroskopischen Wirkungsquerschnitt im Energiebereich des Neutronenspektrums bestimmen. Der bestimmte mikroskopische Wirkungsquerschnitt ist in der Abbildung 19 zu sehen. [31] Darüber hinaus wird der mikroskopische Wirkungsquerschnitt in Barn in der Abhängigkeit der Energie in MeV angegeben. Barn ist eine Größe, die die Fläche angibt, auf der ein Neutron treffen kann, um eine Wechselwirkung mit dem anderen Teilchen einzugehen. Und ein Barn ist äquivalent zu $10^{-24}cm^2$ [17]

Bestimmt wurde dieser durch die Formeln (8), (9), (10) und (11). Weiterführend, wird Formel (8) umgestellt, nach dem makroskopischen Wirkungsquerschnitt, Formel (9) wird nach dem durchschnittlichen mikroskopischen Wirkungsquerschnitt umgestellt und für die Teilchendichte wird Formel (10) verwendet und in Formel (9) eingesetzt. Dabei beschreibt J die Intensität, Σ_T den makroskopischen Wirkungsquerschnitt von Titan, $\mathcal{L}$ die Länge der Probe im Neutronenstrahl, N die Teilchendichte von Titan, $\overline{\sigma_T}$ den mikroskopischen Wirkungsquerschnitt der stabilen Titan-Isotope, N_A die Avogadro-Konstante, $\overline{M_T}$ die Molare Masse der stabilen Titan-Isotopen, M_i die Molare Masse eines stabilen Titan-Isotopes, r_i ist die Vorkommens Häufigkeit eines Titan-Isotopes und ρ ist die Dichte von Titan. [31]

Vergleicht man den gemessenen mikroskopischen Wirkungsquerschnitt, mit dem der NEA, ist der Verlauf ähnlich, aber dieser hat eine andere Größenordnung. Dieser ist ca. doppelt so groß wie der gemessene, was auch im Vergleich zwischen der Abbildung 19 und der Abbildung 20 zu sehen ist. Außerdem ist zu betrachten, dass der experimentell bestimmte mikroskopische Wirkungsquerschnitt stark ausschlagende Messwerte in dem Energiebereich von 2,9 MeV bis 3,1 MeV auf, die nicht in den Daten der NEA existieren, deswegen verläuft der mikroskopische Wirkungsquerschnitt von 3 MeV bis 13 MeV.

$$(8) J_x(x) = J_0 e^{-\Sigma_T x} \rightarrow \Sigma_T = \frac{1}{\mathcal{L}} \ln \left(\frac{J_0}{J_L} \right)$$

$$(9) \Sigma_T = N * \overline{\sigma_T} \rightarrow \overline{\sigma_T} = \frac{\Sigma_T \overline{M_T}}{N_A \rho} \text{ mit (10)}$$

$$(10) N = N_A \frac{\rho}{M_T}$$

$$(11) \overline{M_T} = \sum_i^n M_i r_i$$

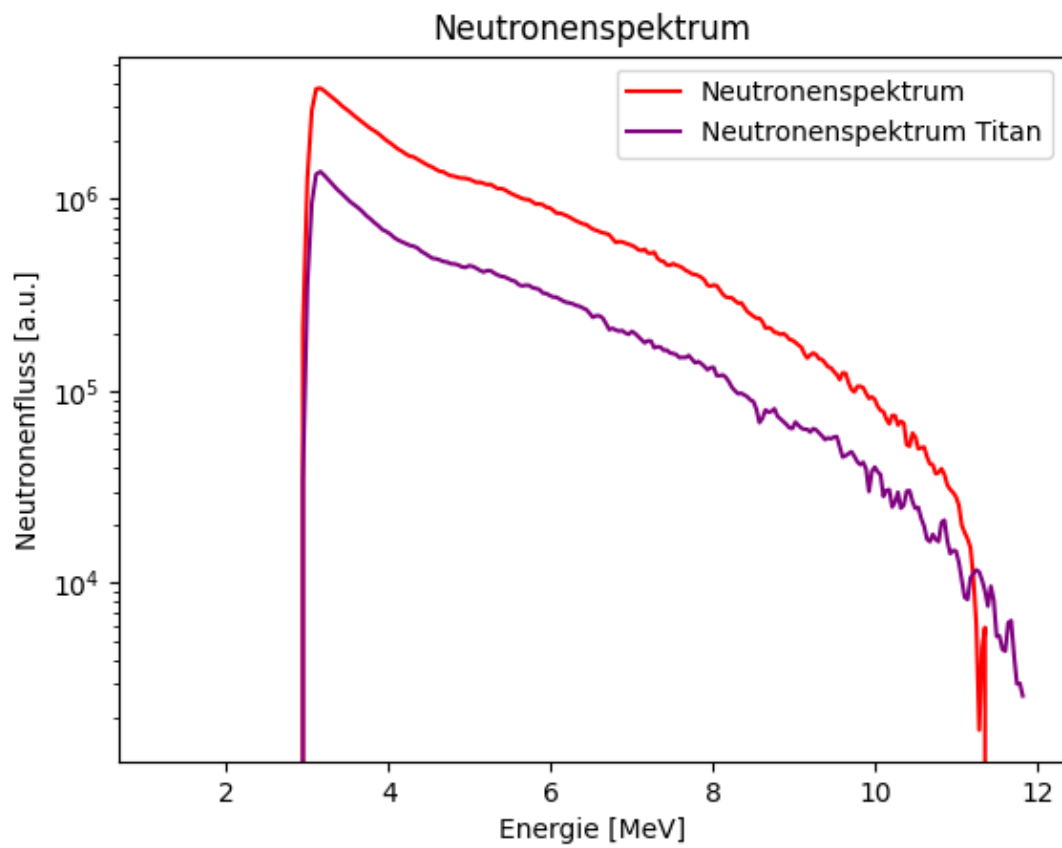


Abbildung 18 Vergleich Neutronenspektrum AKR-2 mit und ohne Probe

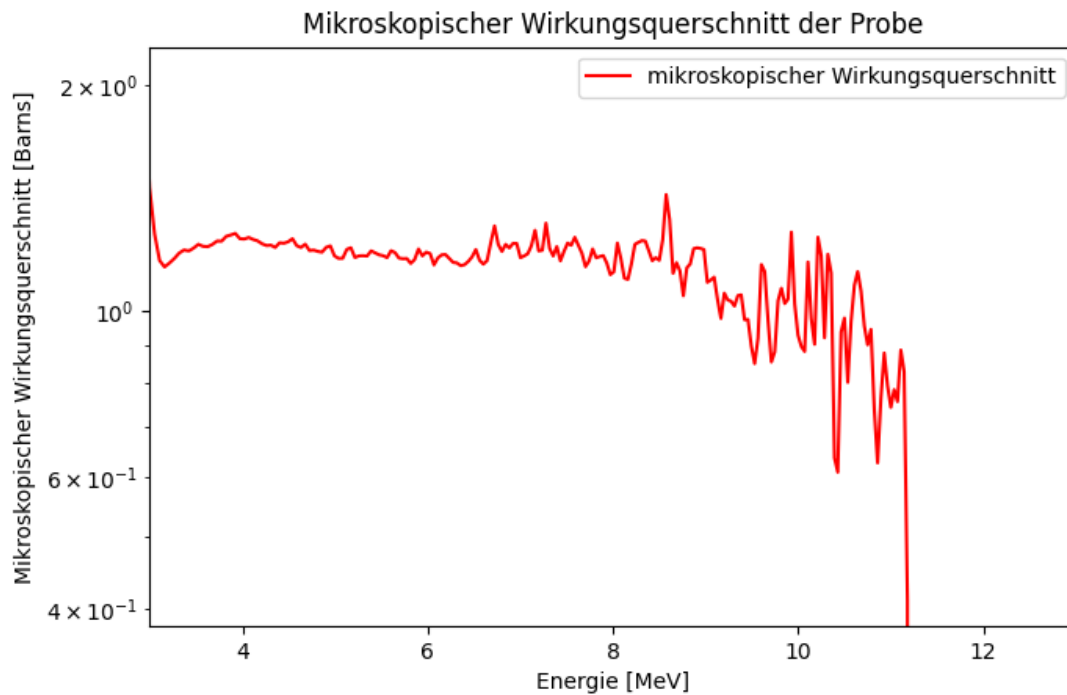


Abbildung 19 mikroskopischer Wirkungsquerschnitt der Titan-Probe

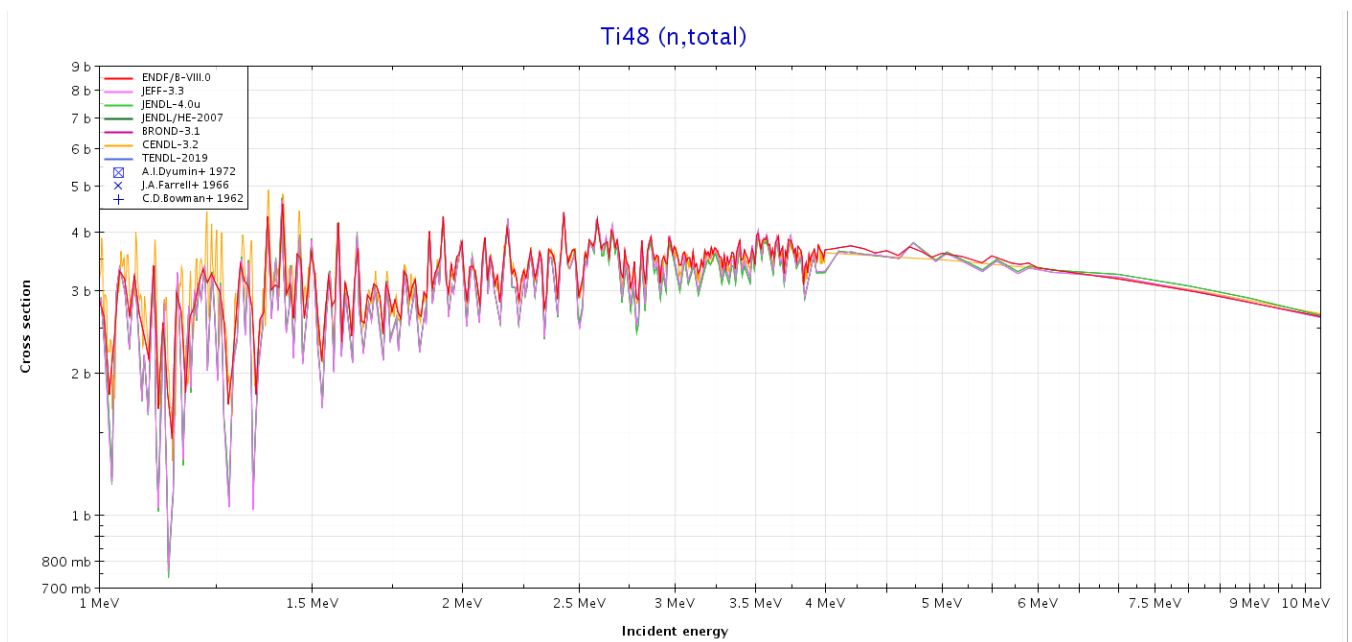


Abbildung 20 Janis-Datenbank mikroskopischer Wirkungsquerschnitt von Titan-48

4.4 Einordnung der Ergebnisse

Die Unterschiede der Neutronenspektren haben eine Relevanz. Zu sehen ist diese Relevanz unter anderen in dem Punkt 4.3. Die Bestimmung der Neutronenspektren ermöglicht die Messung von mikroskopischen Wirkungsquerschnitten unterschiedlicher Proben. Der mikroskopische Wirkungsquerschnitt ist wichtig für die Sicherheit an Orten, die mehr Strahlung exponiert sind als der Hintergrundstrahlung auf der Erde, um die Wechselwirkung von unterschiedlicher Strahlung zu kennen. Und damit Materialien auszuwählen, welche die Strahlung abschirmen zum Schutz von Menschen in der Umgebung. Im Kontext des Unterschiedes von den Neutronenspektren spielt dieser eine wichtige Rolle, weil der GENIE35 zwar die Neutronenenergie in bestehenden Fusionskraftwerken abdeckt und man somit Materialien finden kann, die nur sehr gering mit Neutronen reagieren. Aber gestreute Neutronen haben geringere Energien als das ursprüngliche Neutron. Also braucht man andere Anlagen, die einen geringeren Energiebereich abdecken, z.B. den AKR-2, um auch den mikroskopischen Wirkungsquerschnitt in diesem Energiebereich zu bestimmen.

Zusätzlich ist die rechteckige Responsematrix nur eine Annahme. Die Responsematrix lässt sich durch quasimonoenergetische Neutronenquellen bestimmen, weil man bei diesen bereits weiß, welches Energiemaximum man hat. Darauf folgend kann man die so bestimmte Response-Matrix nutzen, um Spaltspektren, wie vom AKR-2, genauer zu bestimmen als mit der angenommenen Responsematrix.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit habe ich mir angeschaut, welche theoretischen Grundlagen dem Bestimmen von Neutronenspektren vorausgehen, wie ein Messaufbau an kerntechnischen Anlagen aussieht, welche Möglichkeiten bestehen, ein Neutronenspektren auszuwerten, wie die gemessenen Neutronenspektren aussehen und welche Anwendung es gibt von gemessenen Neutronenspektren mit einer Probe im Neutronenstrahl.

Kritisch zu reflektieren ist, dass die Entfaltung der Neutronenspektren nicht den Lektürewerten entspricht, wie man in Abbildung 16 sieht. Durch Veränderung einiger Parameter konnte die Smooth-Funktion des Python-Programms ausgemacht werden, welche das Neutronenspektrum positiv in x-Richtung verschob. Die Smooth-Funktion kann nicht weggelassen werden, da sie

Peaks im Spektrum auf den eigentlichen Verlauf anpasst. Außerdem stimmt der mikroskopische Wirkungsquerschnitt, der ermittelt wurde, nicht mit den offiziellen Werten überein. Das könnte daran liegen, dass für die Auswertung nicht die richtige Probenlänge verwendet wurde oder der Neutronenstrahl nicht kollinear zur Achse war, in der der Stilben-Detektor zum Experimentierkanal stand.

In weiteren Arbeiten könnte man den mikroskopischen Wirkungsquerschnitt von weiteren Proben bestimmen, andere Entfaltungsalgorithmen verwenden oder die Response-Matrix von den verwendeten Detektoren bestimmen.

6. Python-Programm Dokumentation

Zur Auswertung der Messdaten wurde Python als Programmiersprache verwendet. Importiert wurden die Bibliotheken `matplotlib.pyplot`, `numpy` und `scipy.interpolate`. Die aufgenommenen Messdaten sind als Textdatei gespeichert oder als Binärcode. Dabei stellt die erste Spalte die Energie in a.u. dar und die zweite Spalte den zugeordneten PSD-Parameter. Zur Verarbeitung der Daten nutzt man die Histogrammfunktion von `numpy`, um gleiche Energiewerte zu zählen. Daraus wird ein Diagramm mit der Anzahl der Ereignisse, an der Ordinatenachse und die Energie, an der Abszissenachse dargestellt. Mit der Comptonkantenkalibrierung wird das erstellte Histogramm auf elektronenenergieäquivalente Elektronenvolt kalibriert. Darauf folgt, dass man die so erhaltenen Energiewerte über die interpolierte Formel (4) auf protonenenergieäquivalente Elektronenvolt kalibriert. Abschließend wird in der Formel (3) für die E_P - und E_N -Werte die protonenenergieäquivalenten Elektronenvolt genutzt. Mit den so erhaltenen Werten wird schlussendlich die Formel (3) verwendet, um das Neutronenspektrum zu berechnen. Das dadurch erhaltene Spektrum wird durch die Bibliothek `matplotlib.pyplot` dargestellt, indem die E_N als Abszissenachsenwerte genutzt und die Ordinatenachse stellt die ausgerechneten Werte für das Neutronenspektrum dar.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schuster, Patricia/Feng, Patrick/Brubaker, Erik: On the Relationship Between Scintillation Anisotropy and Crystal Structure in Pure Crystalline Organic Scintillator Materials (2017), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.11188>, aufgerufen: 16, 11, 2025

Abbildung 2 Eigen erstelltes Histogramm durch ein Python Programm

Abbildung 3 Eigen erstelltes PSD-Histogramm

Abbildung 4 o.V. (2005): Ausbildungskernreaktor AKR-2, Beschreibung des Aufbaus, der Funktionskontrolle und der Betriebsprotokollierung der Reaktoranlage AKR-2, https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/wket/ressourcen/dateien/akr2/Lehrmaterialien/aufbau_d.pdf?lang=de, aufgerufen: 4, 11, 2025

Abbildung 5 o.V. (2005): Ausbildungskernreaktor AKR-2, Beschreibung des Aufbaus, der Funktionskontrolle und der Betriebsprotokollierung der Reaktoranlage AKR-2, https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/wket/ressourcen/dateien/akr2/Lehrmaterialien/aufbau_d.pdf?lang=de, aufgerufen: 4, 11, 2025

Abbildung 6 Klix, Alex/Döring, Toralf/Leichtle, Dieter/Zuber, Kai (2018): The intensive DT neutron generator of TU Dresden, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817002004>, aufgerufen:4, 11, 2025

Abbildung.7 Versuchsaufbau ohne Probe vereinfachte Darstellung

Abbildung.8 Versuchsaufbau mit Probe vereinfachte Darstellung

Abbildung.9 eigen erstelltes Bild des AKR-2-Versuchsaufbau AKR-2 Versuchskanal 7 und Stilbendetektor

Abbildung.10 eigen erstelltes Bild des HSZG-Versuchsaufbau GENIE35 und Stilbendetektor

Abbildung 11 eigen erstelltes Bild des IKTP-Versuchsaufbau am Neutronengenerator

Abbildung.12 eigen erstelltes Bild der Messung am AKR-2 mit Probe

Abbildung.13 Neutronenspektrum des AKR-2 entfaltet nach Formel (3)

Abb.14 Neutronenspektrum des GENIE35 entfaltet nach Formel (3)

Abb.15 Neutronenspektrum des IKTP entfaltet nach Formel (3)

Abb.16 Neutronenspektrum des AKR-2 entfaltet nach Formel (3) im Vergleich zu vorherigen Messungen und bezogen auf die Zeit der Messung [30]

Abb.17 Neutronenspektrum des AKR-2 im Vergleich zum Neutronenspektrum des GENIE35

Abb.18 Neutronenspektrum des AKR-2 mit Titan-Probe entfaltet nach Formel (3)

Abb.19 mikroskopischer Wirkungsquerschnitt eigens bestimmt nach Formel (8) bis (11)

Abb.20 mikroskopischer Wirkungsquerschnitt von Titan-48 aus der Janis-Datenbank der OECD/NEA [18]

Quellenverzeichnis

[1] o.V. (o.J.): Spaltneutronen,

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spaltneutronen/13489>, aufgerufen: 23. 10. 2025

The screenshot shows the top of the Spektrum.de website. At the top is a browser address bar with the URL <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spaltneutronen/13489> and icons for refresh, security, and bookmarks. Below this is the Spektrum.de logo in the center, with links for MAGAZINE, ARCHIV, and AFSH on the right. A horizontal navigation bar contains links for BIOLOGIE, CHEMIE, ERDE/UMWELT, IT/TECH, KULTUR, MATHEMATIK, MEDIZIN, PHYSIK, and PSYCHOLOGIE. Below the navigation bar is a breadcrumb trail: Startseite » Lexika » Lexikon der Physik » Spaltneutronen.

sa. 1
nute
ken
zilen

LEXIKON DER PHYSIK

Spaltneutronen

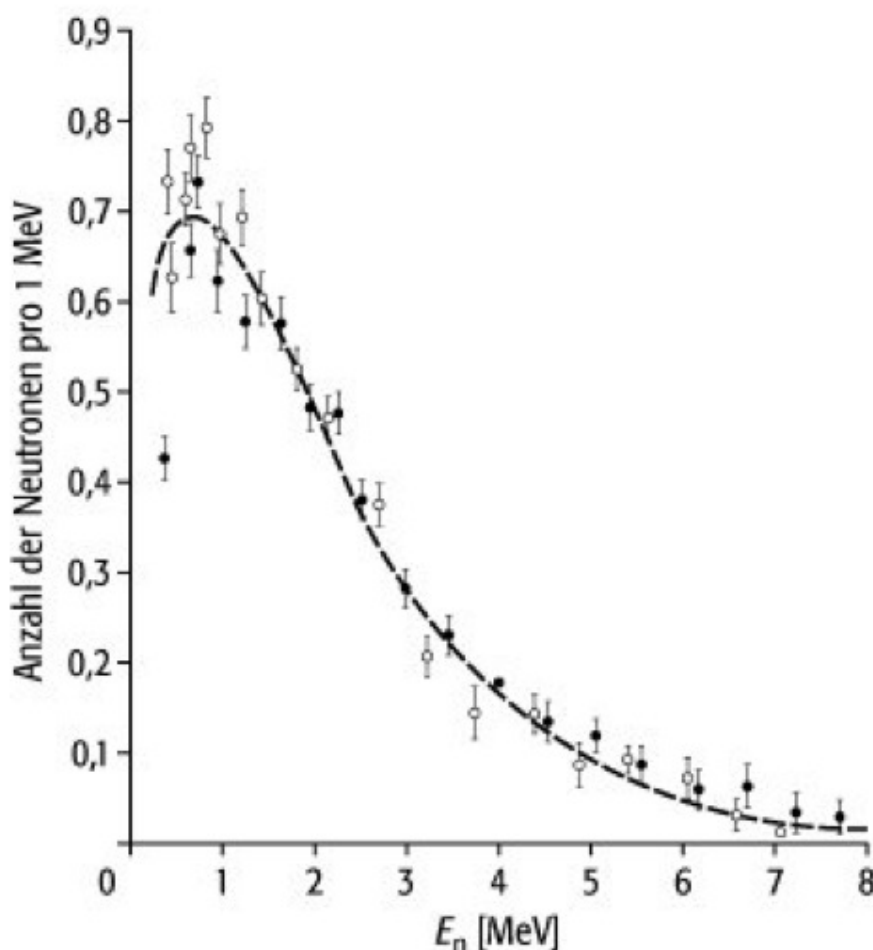
Spaltneutronen, bei der Spaltung von Atomkernen im wesentlichen in einem Verdampfungsprozeß von den Spaltfragmenten prompt (10^{-19} s) emittierte Neutronen (*prompte Neutronen*). Ihre Anzahl ν pro Spaltung steigt mit der verfügbaren Anregungsenergie des spaltenden Kerns. Für die thermische Spaltung von ^{233}U bzw. ^{235}U beträgt ν 2,5 bzw. 2,4, für ^{239}Pu 2,9. Die spektrale Verteilung bei thermischer Spaltung (siehe Abb.) folgt einem Verlauf

$$\nu(E_n) \sim \sqrt{E_n} \exp(-E_n/1,29)$$

mit Neutronenenergien E_n von bis zu 10 MeV.

mit Neutronenenergien E_n von bis zu 10 MeV.

Als Folge anschließender Betazerfälle der Spaltfragmente in angeregte Kernzustände mit $E^* > E_B^{(n)}$ ($E_B^{(n)}$: Neutronenbindungsenergie), treten mit einem geringen Anteil von ca. 1% um einige Sekunden bis zu Minuten *verzögerte Neutronen* auf. Die zwei wesentlichen Neutronengruppen entstehen durch den Zerfall von ^{87}Br mit einer β^- -Halbwertszeit $T_{1/2}(\beta^-) = 55,6 \text{ s}$ und von ^{137}J mit $T_{1/2}(\beta^-) = 24,5 \text{ s}$. Verzögerte Neutronen sind entscheidend für die *Reaktorsteuerung* von thermischen Kernreaktoren.



Spaltneutronen: Spektrum der Spaltneutronen als Funktion ihrer Energie E_n . Die leeren Kreise stellen das Spaltspektrum für die ^{235}U -Spaltung, die gefüllten Kreise das für ^{239}Pu -Spaltung mit thermischen Neutronen dar.

[2] o.V. (o.J.): What is Fusion?, <https://www.iter.org/fusion-energy/what-fusion>, aufgerufen: 23, 10, 2025

www.iter.org/fusion-energy/what-fusion

ABOUT FUSION ENERGY THE MACHINE THE PROJECT NEWS & MEDIA

STATS

We need temperatures of **150,000,000 °C** to achieve D-T fusion in the laboratory. This is **10 times hotter** than the temperature at the core of the Sun.

Every second, our Sun turns 600 million tonnes of hydrogen into helium, releasing an enormous amount of energy. But without the benefit of gravitational forces at work in our universe, achieving fusion on Earth has required a different approach.

Twentieth-century fusion science identified the most efficient fusion reaction in the laboratory setting to be the reaction between two hydrogen (H) isotopes deuterium (D) and tritium (T). The DT fusion reaction produces the highest energy gain at the "lowest" temperatures. It requires nonetheless temperatures of 150,000,000 degrees Celsius—ten times higher than the hydrogen reaction occurring in the Sun.

Read more about making it work in the laboratory [here](#).

deuterium-tritium fusion reaction

150,000,000 °C

H deuterium **H tritium**

He helium **a neutron**

+ 3.5 MeV (20% of energy) + 14.1 MeV (80% of energy)

In the laboratory, the most efficient fusion reaction is between two hydrogen isotopes deuterium (D) and tritium (T). The fusion of these light hydrogen atoms produces a heavier element, helium, and one neutron.

[3] Klix, Alex/Döring, Toralf/Leichtle, Dieter/Zuber, Kai (2023): Fusion neutronics experiments utilizing the intense DT neutrongenerator of Technical University of Dresden, <https://isfnt2023.com/wp-content/uploads/2023/12/P5B5.pdf> aufgerufen: 23, 10, 2025

isfnt2023.com/wp-content/uploads/2023/12/P5B5.pdf

6 von 21 Automatischer Zoom

5 14.09.2023 Axel Klix ISFNT-15, Las Palmas de Gran Canaria, 2023

Beamline and target

D + T → ⁴He + n + 17.6 MeV

Deuterium ion beam

α particle (≈3,5 MeV)

Si detector

Solid target containing tritium

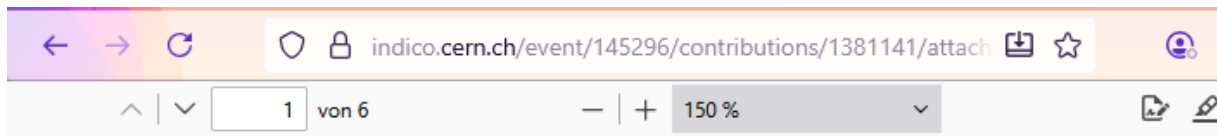
Primary monitor: Si detector in beam tube
Secondary monitor: ²³⁸U fission chamber
Optional deuterium target (2.5 MeV).

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

Neutron energy ≈14.1 and 2.5 MeV
Licensed up to 10¹² s⁻¹ (DT neutrons)
Typical operation 10⁹ -10¹¹ s⁻¹
Nearly isotropic

Windows aktivieren

[4] Watterson, J (2007): The Fission Spectrum,
<https://indico.cern.ch/event/145296/contributions/1381141/attachments/136909/194258/lecture24.pdf>, aufgerufen: 23,10,2025



The Fission Spectrum

**When a heavy nucleus
(for example ^{236}U , produced by $^{235}\text{U} + \text{n}$)
fissions, a great deal of energy is released (something like 200 MeV).**

This energy is mainly divided between the kinetic energy of the fission products and the fission neutrons (refer to a previous slide). As a result, the fission neutrons are *energetic* – they are *fast neutrons*.

(Remember that neutrons with energies in the MeV range are known as “fast” neutrons.)

These neutrons can be thought of as “evaporating” from the surface of the highly excited compound nucleus during the fission process.

The energy distribution of these *fission spectrum* neutrons is often represented by the so-called *Watt Distribution*.

[5] Osswald, Max/Bemmerer, Daniel/Döring, Toralf/Lehnert, Björn/Turkat, Steffen/Zuber, Kai (2025): Beam characterization of a DT neutron generator for Big Bang Nucleosynthesis studies, fis.tu-dresden.de/portal/files/67380022/DPG2025_Osswald.pdf#page=1.00, aufgerufen: 09, 04, 2026

The Watt Distribution (Spectrum)

The distribution of the number of neutrons with energy in the fission spectrum is well represented by a mathematical function, the *Watt* function.

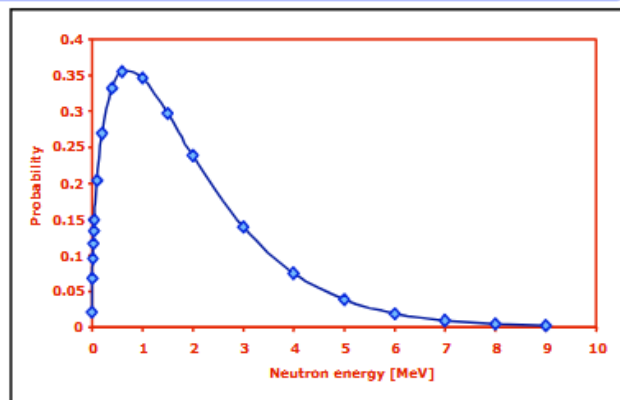
The probability of a neutron from fission having an energy between E and $E+dE$ is the function $P(E)dE$.

$$P(E) = 0.4865 \sinh(\sqrt{2E}) e^{-E} \text{ MeV}^{-1}$$

This is an *empirical* formula – it is just a convenient way of expressing the experimental distribution.

This distribution is for neutrons from the fission of ^{235}U with a slow neutron and is shown in the figure.

Note: It only changes slightly for other types of fission.



Einsteins einfachem Konzept beträgt die maximale kinetische Energie $E_{\max}$ eines Elektrons, das aus der Oberfläche eines Materials mit der Austrittsarbeit W emittiert wird,

$$E_{max} = h\nu - W \quad . \quad (10.23)$$

Im allgemeinen erreichen allerdings nur wenige emittierte Elektronen die Maximalenergie $E_{\max}$. Entscheidend ist die Beobachtung, daß der Photoeffekt bei Frequenzen $\nu \leq W/h$ vollständig verschwindet, wobei die Abschneidefrequenz oder -wellenlänge vom W -Wert des verwendeten Material abhängt.

Photokathoden

Gewöhnliche Metalle haben meist sehr hohe Werte der Austrittsarbeit zwischen 4 und 5 eV, was nach Einsteins Gleichung (10.23) Grenzwellenlängen von ca. 310 bis 250 nm entspricht. Im Vakuum kann man aber auch Cäsium verwenden, das unter Atmosphärenbedingungen sofort korrodiert. Es besitzt die kleinste Austrittsarbeit aller Metalle mit $W_{Cs} = 1,92$ eV. Durch Beschichtung einer Dynode mit Cäsium wird eine Photokathode fast im ganzen sichtbaren Spektralbereich lichtempfindlich ($\lambda < 647$ nm).

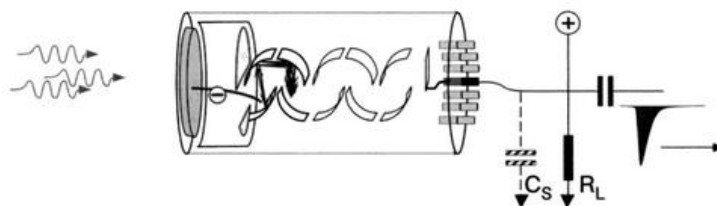


Abb. 10.5 Aufbau einer Photomultiplier-Röhre mit transparenter Dynode. Die Beschaltung ist für den Zählmodus ausgelegt.

Die Wahrscheinlichkeit, daß durch die Absorption eines Photons ein Photoelektron ausgelöst wird, die Quanteneffizienz, ist generell kleiner als eins. Wegen seiner hohen Quanteneffizienz, die bis zu 30% erreicht, wird sehr häufig der Halbleiter CsSb₃ zur Beschichtung der Photokathode verwendet. Sie wird in einer Vakuumröhre aus verschiedenen Gläsern unterschiedlicher Transparenz eingebaut und hat in diesen Kombinationen zur Klassifikation der spektralen Empfindlichkeit unter den Bezeichnungen *S-X-Kathode* geführt (X = 1,2,...). Die ebenfalls schon lange verwendete Trialkali-Kathode S-20 (*Na₂KCsSb*) erreicht auch bei 850 nm noch 1% Quanteneffizienz, und Cs-aktiviertes GaAs erreicht im nahen Infrarot sogar eine 1%-Grenzwellenlängen von 910 nm. Noch

[7] Boeglin, Werner (2025); Scintillation Detector, https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_manual3/scintillator.html, aufgerufen: 23. 10. 2025

wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_ma

22.2. Photo Multiplier

Table of Contents

- 22. Scintillation Detector
 - 22.1. Background
 - 22.2. Photo Multiplier
 - 22.3. Electronics and Data Acquisition
 - 22.4. Detection of Photons
 - 22.5. Experimental Procedure
 - 22.5.1. Testing the MCA
 - 22.5.2. PMT Operation
 - 22.5.3. Decay Schemes of ^{137}Cs and ^{60}Co
 - 22.5.4. Back Scattering Peak
 - 22.5.5. Background Measurement and Subtraction

Related Topics

Documentation overview

- Previous: 21. Compton Scattering with Scintillation Detector
- Next: 23. The Speed of Light

Quick search

The photomultiplier is an instrument that can detect photons. An incoming photon (e.g. a scintillation photon) hits the photo-cathode and via photo effect releases an electron. The probability for this process is about 20%, so you need on the average 5 photons to produce a single photo-electron. The released electron is then accelerated toward a metal plate called a dynode where upon impact it releases more electrons, typically 2. These in turn are accelerated to the next dynode where each electron knocks out 2 more electrons. In this matter one obtains an exponentially growing number of electrons. At the end all the released electrons are collected at the Anode where they produce a short, measurable electric current pulse.

22.3. Electronics and Data Acquisition

The output pulses of the PMT are amplified and then recorded. The size of a pulse is proportional to the number of photons hitting the photocathode. These in turn are proportional to the amount of energy the charged particle deposited in the scintillator. Therefore the output pulse is proportional to the energy deposited in the scintillator. The proportionality constant has to be determined experimentally. This process is called calibrating the detection system.

The amplified pulses are analyzed by an **Analog to Digital Converter (ADC)** which determines the pulse height and converts it into a number (typically between 0 and 1023, or 0 to 2047). These (ADC) numbers are then *histogrammed* i.e. each possible ADC value has a counter associated with it and each time a certain value occurs the corresponding counter is incremented. So if your ADC has a range from 0 to 1023, you have a total of 1024 counters. Each ADC value is called a channel and the counter value is called the channel contents. If you take data for a while you will see that some values occur more frequently than others. The total set of counter values and the corresponding ADC values is called a spectrum. When you plot a histogram the x-axis corresponds to the ADC value and the y-axis represents the corresponding counter values or channel contents. The process described above is performed by a Multi Channel Analyzer (MCA). The hardware part is installed in a PC and the associated software (Maestro) is running on the computer. A schematic of the setup is shown in Fig. 22.2

```

graph LR
    PMT[PMT] --> Amplifier[Amplifier]
    Amplifier --> ADC[ADC]
    ADC --> MCA[MCA/Computer]
    MCA --> Histogram[Histogram]
  
```

[8] Büggel, Lars/Bredthauer, Wilhelm/Brund, Klaus Gerd/Dorn, Hans-Jerg/Grote, Manfred/Hannibal, Ludger/Hegemann, Annelie/Höfer, Thilo/Karsten, Florian/Köhncke, Harald/Renner, Michael/Schell, Norbert/Schmidt, Martin/Wojke, Peter/Zimmerschied, Frank/Schmöger, Helmut/Welker, Horst: Impulse Physik. Oberstufe, (Hrsg.: Ernst Klett Verlag), Stuttgart, 2016

[9] Marchi, T/Pino, F./Fontana, C.L./Quaranta, A./Zanazzi, E./Vesco, M./Cinausero, M./Daldosso, N./Paterlini, V./Gramegna, F./Moretto, S./Collazoul, G./Degerlier, M./Fabris, D./Carturan, M. (2019): optical properties and pulse shape discrimination in siloxane-based scintillation detectors, <https://www.nature.com/articles/s41598-019-45307-8>, aufgerufen: 3, 11, 2025

- [10] Chen, Ruifu (2023): A review of particle detection using scintillation detector, <https://www.ewadirect.com/proceedings/tns/article/view/2739>, aufgerufen: 4, 11, 2025
- [11] Hull, Giulia/Zaitseva, Nazalia P./Cherepy, Nerine J./Newby, Jason R./Stoeffl, Wolfgang/Payne, Stephen A. (2009): New organic crystals for pulse shape discrimination, <https://ieeexplore.ieee.org/document/5075983>, aufgerufen: 3, 10, 2025
- [12] Klix, Alex/Döring, Toralf/Leichtle, Dieter/Domula, Alexander/Zuber, Kai (2018): The intensive DT neutron generator of TU Dresden, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817002004>, aufgerufen: 4, 11, 2025
- [12] Klix, Alex/Döring, Toralf/Leichtle, Dieter/Zuber, Kai (2018): The intensive DT neutron generator of TU Dresden, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817002004>, aufgerufen: 4, 11, 2025
- [13] Wagner, Tim (2021): Beam-based alignment at the Cooler Synchrotron COSY for an Electric Dipole Moment measurement of charged particles, <https://publications.rwth-aachen.de/record/825703/files/825703.pdf>, aufgerufen: 4, 11, 2025
- [14] Pinson, Jerald (2020): The power of attraction: Magnets in particle accelerators, <https://phys.org/news/2020-03-power-magnets-particle.html>, aufgerufen: 4, 11, 2025
- [15] o.V. (2005): Ausbildungskernreaktor AKR-2, Beschreibung des Aufbaus, der Funktionskontrolle und der Betriebsprotokollierung der Reaktoranlage AKR-2, https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/wket/ressourcen/dateien/akr2/Lehrmaterialien/aufbau_d.pdf?lang=de, aufgerufen: 5, 11, 2025
- [16] Höflich, Nina (2024): Simultaneous Tomography with Fast Neutrons and Gamma Rays using the Scintillator Stilbene, publications.rwth-aachen.de/record/978920/files/978920.pdf#page=15.31, aufgerufen: 5, 11, 2025
- [17] Ziegler, Albert: Reaktortechnik. Physikalisch-technische Grundlagen, (Hrsg.: Hans-Josef Allelein), 2.Auflage, Berlin, 2013
- [18] o.V. (o.J.): JANIS-Renderer, <https://www.oecd-neo.org/janisweb/book/neutrons/Ti48/MT1/renderer/5122>, aufgerufen: 11, 03, 2026
- [19] Tao, S.X./Chan, H.W./Van der Graaf, H. (2016): Secondary Electron Emission Materials for Transmission Dynodes in Novel Photomultipliers: <https://doi.org/10.3390/ma9121017>, aufgerufen: 5, 11, 2026
- [20] Boenig, H. (2019): Plasma science and technology, (Hrsg.: Cornell University Press), Ithaca und London, 2019
- [21] o.V. (o.J.): Neutron Tubes & Generators, <https://sodern.com/en/categories/tubes-and-neutron-generators>, aufgerufen: 12, 03, 2026
- [22] Soo, H/Park, M/Lee, B/Moon, M/Ho Ha, J/Lee, N.; Kim, Y/Kang, C/Cha, K/Chae, M/Ho Moon, J/Oh, K/Joo, J/Choi, H/Park, H/Kim, H/Lee, S/Kim, J. (2018): Characterization of a D-T Generator in Radiation Equipment Fab. Center,

[https://www.kns.org/files/pre_paper/40/18A-](https://www.kns.org/files/pre_paper/40/18A-116%EA%B9%80%ED%95%9C%EC%88%98.pdf)

[116%EA%B9%80%ED%95%9C%EC%88%98.pdf](https://www.kns.org/files/pre_paper/40/18A-116%EA%B9%80%ED%95%9C%EC%88%98.pdf), aufgerufen: 12, 03, 2026

[23] Melzer, Vincent/Weichel, Sascha/Reisdorf, Robert/Viebach, Marco/Lange Carsten/Hurtado, Antonio (2025): A Novel Measurement Setup for the Data Acquisition and Evaluation for Hydrogen-Filled Proportional Detectors and Stilbene Scintillation Detectors, <https://doi.org/10.1051/epjconf/202533810013>, aufgerufen: 12, 03, 2026

[24] Albert, Dietmar/Brückner, Uta/Hansen, Wolfgang/Vogel, Wolfhard (1982): Determination of leight efficiency of stilbene scintillators and their application to in-core spectrometry of fast neutrons, [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(82\)90460-4](https://doi.org/10.1016/0167-5087(82)90460-4), aufgerufen: 14, 03, 2026

[25] Prasad, S/ Clarke, SD/Pozzi, SA/Larsen, EW (2011): A response-matrix method for the calculation of neutron pulse height distributions in MCNP, <https://inis.iaea.org/records/p1kk8-gzz21>, aufgerufen: 14, 03, 2026

[26] Gaughan, N./Zhou, J./Bechetti, F.D./Torres-Isea, R.O./Febbrano, M./Zaitseva, N./Altmann, Y./Di Fulvio, A. (2021): Characterization of stilbene-d12 for neutron spectroscopy without time of flight, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165822>, aufgerufen: 14, 03, 2026

[27] Calabrese, Michelle A./Wagner, Norman J./Rogers, Simon A. (2016): An optimized protocol for the analysis of time-resolved elastic scattering experiments, <https://doi.org/10.1039/c5sm03039k>, aufgerufen: 14, 03, 2026

[28] Zmeškal, Marek/Košťál, Michal/Viebach, Marco/Lange, Carsten/Matěj, Zdeněk (2025): Measurement of the neutron and gamma spectra at the training and research reactor AKR-2, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111194>, aufgerufen: 14, 03, 2026

[29] Kong, Dehua/Zhang, Yanbiao/Lin, Zixi/Qiu, Yehao/Chen, Xiulian/Wang, Zhonghai (2025): The Automatic Calibration Method of the Compton Edge Based on Normalized Cross-correlation and Simulated Annealing Algorithm, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.16282>, aufgerufen: 14, 03, 2026

[30] Košťál; Michal/ Zmeškal, Marek/ Czako, Tomáš/Rodriguez, Juan José Gómez/Viebach Marco/Knospe, Alexander/Melzer, Vincent/Weichel, Sascha/Lange, Carsten/Hurtado, Antonio/Losa, Evžen/Šimon, Jan/Simakov, Stanislav/Schulc, Martin/Novák, Evžen/Peltan, Tomáš/Matěj, Zdeněk/Capote, Roberto (2025): Neutron transmission experiment with PTFE at AKR-2, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111741>, Fig.6, aufgerufen: 16, 03, 2026

[31] Wirtz, K./Beckhurts, K.H.: ELEMENTARE NEUTRONENPHYSIK, (Hrsg.: Springer-Verlag), 2.Auflage, Heidelberg, 1958

[32] Falezza, Filippo/Bishop, Jack /Kokalova, Tzany/Wheldon, Carl/Pirrie, Stuart/Conroy, Max/Curtis, Neil (2026): Simulation and analysis of an AmBe source, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.171233>, aufgerufen: 21, 03, 2026

[33] Kornilov, N.V./Fabry, I./Oberstedt, S./Hambsch, F.-J. (2009): Total characterization of neutron detectors with a ^{252}Cf source and a new light output determination, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.10.032>, aufgerufen: 21. 03. 2026

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und alle Formulierungen, die wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Quellen entnommen wurden, kenntlich gemacht habe.

Sofern sich - auch zu einem späteren Zeitpunkt - herausstellt, dass die Arbeit oder Teile davon nicht selbständig verfasst wurden, die Zitierhinweise fehlen oder Teile ohne Quellennachweis aus dem Internet entnommen waren, so wird die Arbeit auch nachträglich mit null Punkten gewertet.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit für schulische Zwecke benutzt werden kann.

Ort/Datum: Gatterstädt, den 09.04.2026

Unterschrift:.....