

Versuchsdatum: 21.11.2011

Neutronendiffusion

Iris Conradi und Melanie Hauck
Gruppe 118

3. Februar 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	4
1.1	Schnelle Neutronen	4
1.2	Thermische Neutronen	5
2	Messprinzip	6
2.1	Relaxationslänge	6
2.2	Diffusionslänge	6
2.3	Detektor	7
2.4	Neutronenquelle	7
3	Durchführung	7
4	Fehlerbetrachtung	8
5	Bestimmung der Relaxationslänge	9
6	Bestimmung der Diffusionslänge	10
7	Literatur	11

1 Theoretische Grundlagen

In diesem Versuch beobachten wir das Verhalten von Neutronen in Wasser.

1.1 Schnelle Neutronen

Es gibt drei Arten von Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Materie.

Absorption Neutronen können von einem Kern aufgenommen werden. Dadurch entsteht ein angeregter Zustand. Wenn der Kern von diesem Zwischenzustand wieder in einen energetisch niedrigeren Zustand übergeht, so werden γ -Quanten, geladene Teilchen oder Neutronen ausgestrahlt.

Bei dieser Wechselwirkung wird der Wirkungsquerschnitt mit niedrigeren Energien größer.

Diese Wechselwirkung tritt in unserem Versuch zum einen beim Durchgang der Neutronen durch das Wasser mit den Sauerstoffkernen auf. Zum anderen wird sie zur Detektion der Neutronen ausgenutzt (s.u.).

elastische Streuung Hierbei geht keine Energie in innere Energie über. Die Neutronen übertragen einen großen Teil ihrer kinetischen Energie auf die vormals ruhenden Kerne.

Auch bei dieser Wechselwirkung haben die Neutronen für niedrige Energien große Wirkungsquerschnitte.

In unserem Versuch tritt dies beim Stoß der Neutronen mit den Protonen des Wasserstoffs auf.

inelastische Streuung Hier geht ein Teil der kinetischen Energie der Neutronen in innere Energie der Kerne über.

Dies tritt in unserem Versuch nicht auf.

Somit ergibt sich für unseren Versuch für den totalen Absorptionskoeffizienten Σ_t folgende Beziehung.

$$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_{el} = N(\sigma_a + \sigma_{el}) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet N die Dichte der Kerne und σ die Wirkungsquerschnitte. In diesem Zusammenhang definiert man die Relaxationslänge λ .

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma_t} \quad (2)$$

Sie ist die mittlere freie Weglänge der Neutronen.

Somit findet man für den Fluss im Abstand r zu einer punktförmigen isotrop abstrahlenden Quelle

$$\Phi(r) = \frac{Q}{4\pi r^2} e^{-r/\lambda}. \quad (3)$$

Q bezeichnet die von der Quelle pro Zeiteinheit ausgestrahlten Photonen. Allerdings behandelt diese Gleichung nur den Fluss der Primärneutronen, also der Neutronen, die noch keine Wechselwirkung erfahren haben.

Die Gleichung ist auch dahingehend vereinfacht, dass sie in dieser Form nur für Quellen gilt die Neutronen einer Energie abstrahlen. Die Relaxationslänge hängt von der Energie der Neutronen ab.

1.2 Thermische Neutronen

Durch die Wechselwirkung mit der Materie verlieren die Neutronen an Energie. Die Energie der Neutronen sinkt durch wiederholte Wechselwirkungsprozesse, bis sie im thermischen Gleichgewicht mit der Materie sind. Diese Neutronen werden als thermische Neutronen bezeichnet. Ihre kinetische Energie entspricht der thermischen Energie $k_B T$ der Materie.

Um den Fluss der thermischen Neutronen zu beschreiben, betrachtet man eine Diffusionsgleichung. Wir gehen von einer punktförmigen Quelle für thermalisierte Neutronen aus. Außerdem verwenden wir die vereinfachenden Annahmen, dass der Fluss sowohl zeit- als auch energieunabhängig ist und die Absorption gering ist. Man findet somit:

$$\Phi_{th}(r) = \frac{Q}{4\pi r D} e^{-r/L}. \quad (4)$$

Dabei gilt:

$$D = \frac{1}{3\Sigma_s} \quad L = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} \quad (5)$$

wobei Σ_s den Streuquerschnitt und D den Diffusionskoeffizienten bezeichnet. L steht hierbei für die Diffusionslänge.

Die Diffusionslänge entspricht der Hälfte der mittleren Entfernung der Neutronen zur Quelle.

2 Messprinzip

2.1 Relaxationslänge

Zur Bestimmung der Relaxationslänge λ können wir die Gleichung (3) in folgender Form verwenden:

$$\ln(r^2\Phi(r)) = -\frac{1}{\lambda}r + \ln\frac{Q}{4\pi} . \quad (6)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann man λ durch eine lineare Regression bestimmen.

Die Gleichung (3) gilt jedoch für eine monoenergetische Quelle und sie beschreibt nur das Verhalten der Primärneutronen.

Im Experiment steht uns keine monoenergetische Quelle zur Verfügung. In der Messung erfassen wir die Primärneutronen und die Sekundärneutronen gemeinsam.

Da wie oben erwähnt der Wirkungsquerschnitt mit sinkender Energie steigt, erfolgen die weiteren Wechselwirkungen eines Neutrons in immer kürzeren räumlichen Abständen. Außerdem bewegen sich die thermischen Neutronen auf einer kleineren Längenskala als die schnellen Neutronen ($\lambda > L$).

Da bei der ersten Wechselwirkung schon ein Großteil der Energie des Neutrons abgegeben wurde, befinden sich die Sekundärneutronen noch recht nah am Ort der ersten Wechselwirkung des Neutrons.

Somit verhält sich der gemessene Fluss trotzdem entsprechend obiger Gleichung. Die damit ermittelte Relaxationslänge entspricht also nicht direkt der oben beschriebenen physikalischen Größe.

2.2 Diffusionslänge

Zur Bestimmung der Diffusionslänge aus einer linearen Regression, finden wir analog zu oben aus Gleichung (4) folgende Beziehung:

$$\ln(r\Phi_{th}(r)) = -\frac{1}{L}r + \ln\frac{Q}{4\pi D} . \quad (7)$$

In unserem Versuch kommen die thermischen Neutronen jedoch nicht in Form einer punktförmigen Quelle vor. Somit können wir Gleichung (4) nicht anwenden.

Um die Diffusionslänge bestimmen zu können, müssen wir den Fluss der thermischen Neutronen also indirekt bestimmen.

Wir führen zuerst mit Hilfe des Zählrohres eine Messung des Flusses durch. Anschließend umschließen wir die Quelle mit einer dünnen Cadmium-Kugel, die einen Durchmesser

von einigen Zentimetern hat. Neutronen, die innerhalb des Kugelradius thermalisiert worden sind, können die Kugelschale nicht durchdringen. Wir messen nun wieder den Fluss (außerhalb der Cadmium-Kugel).

Durch Differenzbildung erhalten wir nun den Fluss der innerhalb des Kugelradius thermalisierten Neutronen außerhalb der Kugel. Somit haben wir näherungsweise eine punktförmige Quelle für thermalisierte Neutronen.

Die Messung ohne Kugel können wir verwenden, um die Relaxationslänge zu bestimmen.

2.3 Detektor

Wir weisen die Neutronen nach, indem wir geladene Sekundärteilchen, die bei einer Kernreaktion des Neutrons entstehen, in einem Proportionalzählrohr.

Die Kernreaktion besteht darin, dass an einem Bor-Isotop Neutroneneinfang geschieht. Es entstehen Lithium-Ionen und α -Teilchen. Diese geladenen Teilchen können im Zählrohr registriert werden.

Die Empfindlichkeit des im Versuch verwendeten Zählrohres ist nach oben begrenzt. So können hochenergetische Neutronen (einige Primärneutronen) nicht detektiert werden.

2.4 Neutronenquelle

Im Versuch wird eine Am-Be-Quelle verwendet. Das Americium stellt eine α -Quelle dar. Die α -Teilchen reagieren mit dem Beryllium unter Aussendung eines Neutrons.

Es entstehen Neutronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum.

3 Durchführung

Wir haben mit der Messung ohne Abschirmung begonnen. Die Quelle wurde an der vorgegebenen Position im Tank eingehängt. So konnte mit Hilfe der am Detektor befindlichen Messskala der Abstand zwischen Quelle und Detektor eingestellt werden.

Wir haben bei einem Abstand von 14 cm begonnen und zunächst in 0.5 cm-Schritten weitere Messungen durchgeführt. Ab einem Abstand von 20 cm haben wir in 1 cm-Schritten bis hin zu 30 cm Messwerte aufgenommen.

Um eine Messung durchzuführen haben wir mit Hilfe der vorhandenen Auslesesoftware die Ereignisse 300 s lang aufgezeichnet. Man konnte erkennen, dass sich bei bestimmten

Energien Peaks ausbildeten. Die Software bietet die Möglichkeit einen bestimmten Bereich auszuwählen, in dem die Ereignisse gezählt werden sollen. Wir haben darauf geachtet, dass der Bereich niedriger Energien, in dem ein Abfall zu erkennen war, ausgespart wurde. In diesem Bereich liegt das elektronische Rauschen des Analog-Digital-Wandlers. Diese Messwerte würden das Ergebnis verfälschen.

Anschließend haben wir die Abschirmung um die Quelle angebracht. Wir haben die Messungen wieder bei einem Abstand von 14 cm begonnen. Dichter an der Quelle zu beginnen, ist nicht sinnvoll, da wir wie oben beschrieben von einer punktförmigen Quelle ausgehen. Die Messzeit von 300 s wurde beibehalten.

Wir haben festgestellt, dass die Zählraten der Messungen bei gleichen Abständen sich kaum unterschieden. Daher haben wir die Abschirmung nochmals entfernt und an dabei die Position des Detektors nicht verändert. Das Ergebnis dieser Messung lieferte einen deutlich höhere Zählrate.

Aus diesem Grund muss man annehmen, dass bei der Messung ohne Abschirmung ein systematischer Fehler vorlag. Es könnte sein, dass die Position der Quelle nicht exakt richtig war oder dass die ober Halbkugel der Abschirmung schon über der Quelle lag. Die Messreihe ohne Abschirmung können wir dennoch zur Bestimmung der Relaxationslänge verwenden.

Für die Differenzbildung musste jedoch erneut ohne Abschirmung gemessen werden.

Da nun ohnehin für jeden Abstand mit und ohne Abschirmung gemessen werden muss, haben wir uns entschieden einen Abstand einzustellen und an diesem Ort mit und ohne Abschirmung zu messen. Dadurch ist es uns gelungen den Fehler auf den Abstand zu minimieren. Die Differenzbildung geschieht nun für zwei Werte, die besser vergleichbar sind.

4 Fehlerbetrachtung

Die Einstellung des Abstandes zwischen Detektor und Quelle geschieht mit Hilfe einer Skala mit Einteilung in 0.5 mm-Schritten. Daher ist der Abstand mit einem statistischen Fehler von $\sigma_r = 0.25$ mm behaftet. Dies gilt auf Grund unseres Messverfahrens auch für die Differenzmessung.

Die Anzahl der Ereignisse N , die vom Detektor registriert wurde, ist eine poissonverteilte Größe. Daher ist der Fehler auf diese Größe $\sigma_N = \sqrt{N}$. Somit ist der Fehler auf die Differenz ΔN entsprechend der Gaußschen-Fehlerfortpflanzung gegeben durch $\sigma_{\Delta N} = \sqrt{N_{oA} + N_{mA}}$.

Die Zählrate ist $Z = N/300s$. Somit beträgt der Fehler auf die Zählrate $\sigma_Z = \sigma_N/300s$. Für den Fehler auf die Differenz der Zählrate ergibt sich somit $\sigma_{\Delta Z} = \sqrt{\sigma_{Z_{oA}}^2 + \sigma_{Z_{mA}}^2}$.

Die sich mit diesen Gleichungen ergebenden Werte sind der dem Messprotokoll angehängten Tabelle zu entnehmen.

5 Bestimmung der Relaxationslänge

Zur Bestimmung der Relaxationslänge führen wir eine lineare Regression entsprechend Gleichung (6) aus dem Theorieteil durch. Auf der Abszisse wird der Abstand aufgetragen. Diese Werte und die entsprechenden Fehler sind schon bekannt.

Für die Ordinate müssen wir $\ln(r^2 \cdot Z)$ berechnen, da die Zählrate dem Wert des Flusses an einem bestimmten Ort entspricht.

Der Fehler auf diesen Wert berechnet sich folgendermaßen:

$$\sigma_{Or} = \sqrt{\left(\frac{1}{Z}\right)^2 \cdot \sigma_Z^2 + \left(\frac{2}{r}\right)^2 \cdot \sigma_r^2} \quad (8)$$

Die Ordinatenwerte und die Fehler sind ebenfalls der an das Messprotokoll angehängten Tabelle zu entnehmen.

Wir haben eine lineare Regression durchgeführt. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis. Man kann erkennen, dass die Werte recht genau eine Gerade bilden. Nur zu Beginn gibt es eine kleine Abweichung. Die Steigung der Geraden beträgt $m_1 = (-0,0892781 \pm$

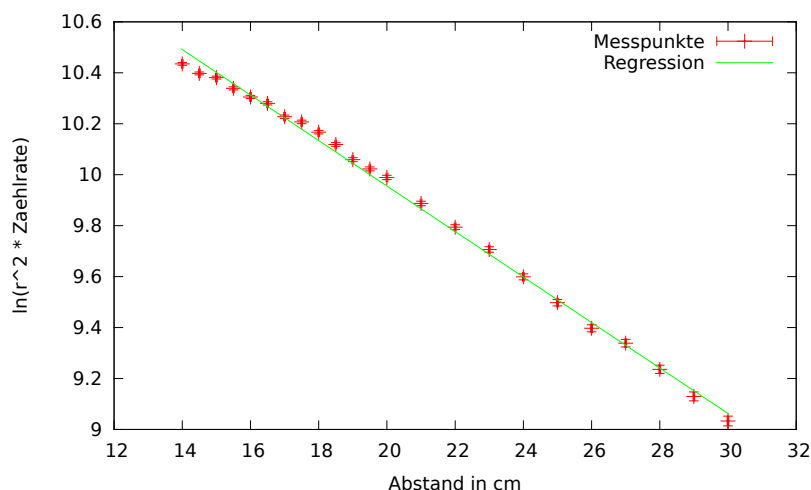


Abbildung 1: lineare Regression zur Bestimmung der Relaxationslänge λ

$0,001129)^{1/cm}$. Der y-Achsenabschnitt beträgt $b_1 = 11,7411 \pm 0,02398$.

Aus der Geradensteigung kann man nun die Relaxationslänge λ bestimmen.

$$\lambda = \frac{1}{m_1} = 11,20 \text{ cm} \quad (9)$$

$$\sigma_\lambda = \frac{1}{m_1^2} \cdot \sigma_{m_1} = 0,1416 \text{ cm} \quad (10)$$

$$\Rightarrow \lambda = (11,20 \pm 0,14) \text{ cm} \quad (11)$$

6 Bestimmung der Diffusionslänge

Die Messreihe zur Bestimmung der Diffusionslänge haben wir bis einschließlich 18 cm Abstand in 0.5 cm-Schritten durchgeführt. Ab diesem Punkt war eine weitere Messung nicht mehr sinnvoll, da ΔN ähnlich groß war wie $\sigma_{\Delta N}$.

Hier erfolgt die lineare Regression entsprechend Gleichung (7) aus dem Theorieteil. Das Vorgehen ist analog zur Bestimmung der Relaxationslänge. Für die Ordinate müssen wir hier $\ln(r \cdot \Delta Z)$ berechnen. Der Fehler berechnet sich aus

$$\sigma_{Or} = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta Z}\right)^2 \cdot \sigma_{\Delta Z}^2 + \left(\frac{1}{r}\right)^2 \cdot \sigma_r^2} \quad (12)$$

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der linearen Regression. Man erkennt, dass die Werte eine deutlich größere Abweichung zeigen. Dennoch bilden sie eine Gerade. Die Steigung

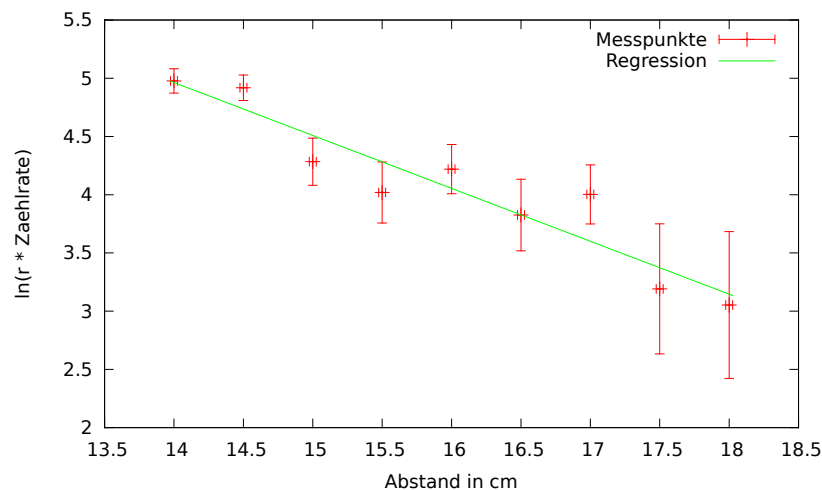


Abbildung 2: lineare Regression zur Bestimmung der Diffusionslänge L

der Geraden beträgt $m_2 = (-0,454346 \pm 0,06047) 1/\text{cm}$. Für den y-Achsenabschnitt

ergibt sich $b_2 = 11,324 \pm 0,9706$.

Nun kann man wiederum aus der Steigung die Diffusionslänge L bestimmen.

$$L = \frac{1}{m_2} = 2,20 \text{ cm} \quad (13)$$

$$\sigma_L = \frac{1}{m_2^2} \cdot \sigma_{m_2} = 0,2929 \text{ cm} \quad (14)$$

$$\Rightarrow L = (2,20 \pm 0,29) \text{ cm} \quad (15)$$

Wie wir im Theorieteil angenommen haben, ist die Relaxationslänge wesentlich größer als die Diffusionslänge. Somit war es gerechtfertigt anzunehmen, dass wir die Relaxationslänge bestimmen können, obwohl wir auch Sekundärneutronen gemessen haben.

7 Literatur

- J.Wolf: Einführung in das Kernphysikalische Praktikum vom F. K. Schmidt; September 2009
- Blüm: Einführung zur Fehlerrechnung im Praktikum; August 2002