Auswertung des Versuches
Bremsung und Diffusion von Neutronen

Andreas Buhr

20. Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Formales **3**

2 Grundlagen **4**
2.1 Wirkungsquerschnitt 4
2.2 Neutronen 4

3 Versuch **5**
3.1 Aufbau und Prinzip 5
3.2 Zählrohrkennlinien 5
3.3 Nulleffekt 8
3.4 Aktivierung der Indium-Folien 9
3.5 Messung der Aktivität der Indium-Folien 9

4 Auswertung **10**
4.1 Zählraten 10
4.2 Fermi Alter 13
4.3 Wirkunsquerschnitt 15
4.4 Fluß thermischer Neutronen 16
4.5 Stärke der Neutronenquelle 17
4.6 mittlerer quadratischer Abstand 18

5 Zusammenstellung der Ergebnisse **19**

6 Würdigung der Ergebnisse **20**

1 Formales

Versuch: Bremsung und Diffusion von Neutronen
Versuchsteilnehmer: Andreas Buhr und Markus Fasel
Datum: 12. 12. 2005
Betreuer: Oleksiy Burda

2 Grundlagen

2.1 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkunsquerschnitt σ ist ein Maß dafür, wie wahrscheinlich Kernreaktionen sind. Die zu Grunde liegende Vorstellung ist die, dass eine Kernreaktion dann stattfindet, wenn eine bestimmte Fläche getroffen wird. Der Wirkunsquerschnitt verbindet somit die Anzahl der Reaktionspartner mit der Anzahl der auftretenden Kernreaktionen. Da der Wirkunsquerschnitt in der Regel sehr klein ist, wurde hier die Einheit Barn (1 Barn = $10^{-24}cm^2$) eingeführt.

2.2 Neutronen

Eigenschaften

Das Neutron ist ein Elementarteilchen mit der Masse $939,566MeV/c^2$. Damit ist es leicht schwerer als ein Proton. Es ist elektrisch nicht geladen und wechselwirkt daher in erster Linie über die starke und die schwache Wechselwirkung. Die starke Wechselwirkung ist für Stöße mit anderen Atomen bzw. Elementarteilchen verantwortlich, die schwache Wechselwirkung ist entscheidend beim β-Zerfall.

Im Atomkern sind Neutronen stabil. Freie Neutronen dagegen zerfallen mit einer Halbwertszeit von 10,2 Minuten in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino.

Erzeugung

Freie Neutronen werden durch Kernreaktionen erzeugt. Es eignen sich (α, n)-Prozesse sowie (γ, n) Prozesse.

In unserem Versuch verwenden wir einen (α, n)-Prozess. Wir beschießen Beryllium-Kerne mit α-Strahlung:

$$ {}^{4}_{2}\alpha + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C}* \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + n + \gamma $$

Die α-Strahlung kommt dabei aus dem Zerfall vom Americium-241:

$$ {}^{241}_{95}\mathrm{Am} \rightarrow {}^{237}_{93}\mathrm{Np} + {}^{4}_{2}\alpha $$

Nachweis

Neutronen lassen sich, da sie nicht über die elektromagnetische Wechselwirkung wechselwirken, nur schwer direkt nachweisen. Man ist auf indirekte Methoden angewiesen. In unserem Versuch beschießen wir Indium-Folien mit den Neutronen. Diese Folien werden durch den Beschuss radioaktiv. Diese Radioaktivität wird dann gemessen.

3 Versuch

3.1 Aufbau und Prinzip

Gemessen werden soll die Bremsung von Neutronen in Wasser. Diese Bremsung geschieht in erster Linie durch Stöße mit den Wasserstoff-Kernen, also den Protonen, im Wasser. Wasser ist ein guter Moderator, da die Protonen fast die gleiche Masse wie die Neutronen haben. Beim Stoß kann damit besonders viel Energie (potentiell alle Energie) übertragen werden.

Zur Characterisierung der Bremsung platzieren wir Indium-Folien in unterschiedlichen Abständen zu einer Neutronenquelle in Wasser. In diesem Aufbau lassen wir die Indium-Folien zwischen ein und zwei Halbwertszeiten bestrahlen. Anschließend messen wir die Aktivität der Indium-Folien. Aus dieser schließen wir zurück auf die Intensität der Bestrahlung mit Neutronen.

Da wir auch die Anzahl der auf die Indium-Folien eintreffenden thermischen Neutronen bestimmen möchten führen wir dies ein zweites Mal mit Cadmium-Ummantelung um die Indium-Folien durch. Das Cadmium schirmt die thermischen Neutronen ab. Aus der Differenz lässt sich die Anzahl der thermischen Neutronen bestimmen.

3.2 Zählrohrkennlinien

Die Detektoren werden mit Hochspannung von einigen kV betrieben. Die Zählrate ist abhängig von der angelegten Spannung. Um den Arbeitspunkt zu bestimmen, bei dem die Detektoren zuverlässige Ergebnisse liefern, haben wir zunächst die Kennlinien der vier zur Verfügung stehenden Detektoren bestimmt. Wir haben jeweils 10 sek gemessen. Als Schritt bei der Spannung haben wir $0,2kV$ gewählt. Für den Fehler haben wir eine Poisson-Verteilung angenommen, also $\Delta N = \sqrt{N}$.

U [kV]	N
3,2	89
3,4	491
3,6	2141
3,8	3826
4,0	4332
4,2	4471
4,4	4259
4,6	4391
4,8	4418
5,0	4632
5,2	4832
5,4	4937
5,6	5160
5,8	5650
6,0	6205

Tabelle 1: Messwerte bei Detektor A

U [kV]	N
4,2	70
4,4	537
4,6	1678
4,8	3073
5,0	3994
5,2	4401
5,4	4320
5,6	4351
5,8	4567
6,0	231385

Tabelle 2: Messwerte bei Detektor B

U [kV]	N
3,4	355
3,6	1691
3,8	3330
4,0	3925
4,2	3787
4,4	3856
4,6	3933
4,8	3954
5,0	4061
5,2	4288
5,4	4600
5,6	4843
5,8	5022
6,0	5340

Tabelle 3: Messwerte bei Detektor C

U [kV]	N
3,3	119
3,5	552
3,7	2396
3,9	3759
4,1	3829
4,3	3921
4,5	3885
4,7	4046
4,9	4111
5,1	4076
5,3	4082
5,5	4544
5,7	5012
5,9	5389
6,0	5647

Tabelle 4: Messwerte bei Detektor D

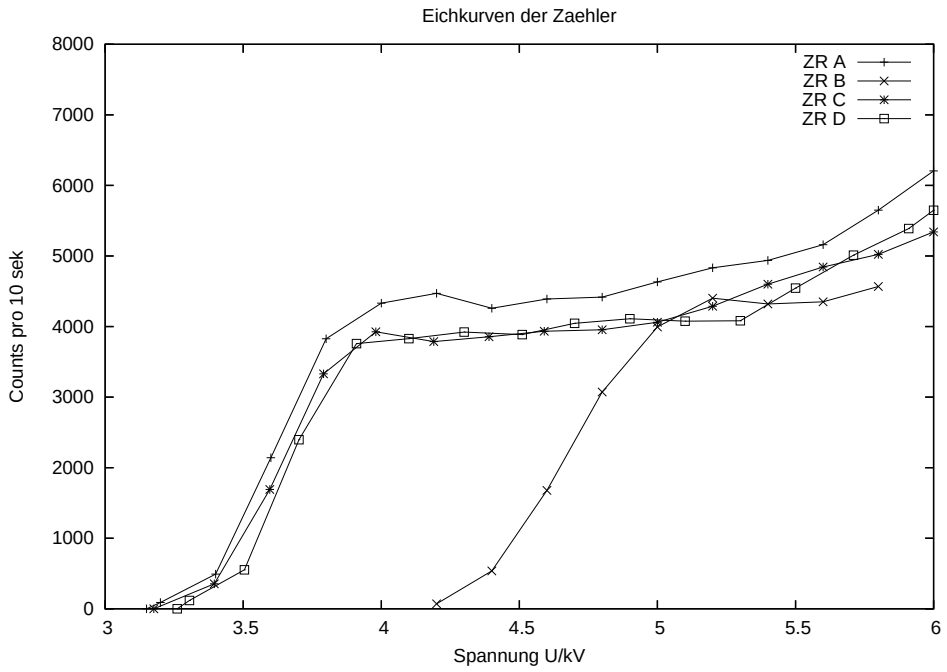


Abbildung 1: Kennlinien der Zählrohre

Eine grafische Auftragung ist in Bild 1
Die gewählten Arbeitspunkte sind in Tabelle 5

Gerät	Spannung /kV
A	4,4
B	5,3
C	4,5
D	4,8

Tabelle 5: gewählte Arbeitspunkte

Auffällig ist das abweichende Verhalten von Detektor B.

3.3 Nulleffekt

Der Nulleffekt wurde über eine Zeit von 80 min = 4800 sek gemessen. Das Ergebniss ist in Tabelle 6.

Zählrohr	N	ΔN
A	3838	62
B	24996	158
C	3615	60
C	4432	67

Tabelle 6: Nulleffekt, 80 min gemessen

Auch hier fällt wieder das abweichende Verhalten von Detektor B auf.
Wegen der Abweichungen von Detektor B benutzen wir ihn in diesem Versuch nicht.

3.4 Aktivierung der Indium-Folien

Die Indium-Folien wurden im Wasser in den Abständen $2.4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ cm Abstand von der Neutronenquelle positioniert. Die erste Aktivierung der Indium-Folien mit Cadmium-Schutzhülle dauerte 1:27:16 (5236 sek). Die zweite Aktivierung der Indium-Folien ohne Cadmium-Schutzhülle dauerte 1:25:40 (5140 sek).

3.5 Messung der Aktivität der Indium-Folien

Die Indiumfolien wurden aus dem Wasserbad geholt und auf die Zählrohre gelegt. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 7 und 8. Dabei ist t_0 die Zeit vom Herausholen aus dem Wasser bis zum Start der Messung. t_{mess} ist die Zeit, die die Zählrohre liefen.

Nr.	d/cm	Zählrohr	t_0/s	t_{mess}/s	N
8	30	A	386	1800	1773
7	25	C	386	1800	2325
6	20	D	386	800	2200
5	15	A	2443	1800	5860
4	10	C	2443	1800	16078
2	5	D	2443	1800	54680
10	2,4	A	4479	1800	52004
9	35	C	4479	1800	1522

Tabelle 7: Gemessene Werte mit Cadmium

Nr.	d/cm	Zählrohr	t_0/s	t_{mess}/s	N
9	35	A	238	600	1705
8	30	C	238	600	3196
7	25	D	238	600	7458
6	20	A	1208	600	14447
5	15	C	1208	600	38899
4	10	D	1208	600	106923
2	5	A	1925	600	206347
10	2,4	C	1925	600	240671

Tabelle 8: Gemessene Werte ohne Cadmium

4 Auswertung

4.1 Zählraten

Zunächst muss von den gemessenen Zählraten zurückgerechnet werden auf die Zählrate nach unendlich langer Aktivierung und sofortiger Messung nach dem Herausnehmen aus dem Wasser.

Die Aktivität der Indiumfolien nimmt nach dem herausnehmen exponentiell ab, und die Messung ist effektiv eine Integration über die Zeit.

$$N - t_{mess}N_{null} = \int_{t_0}^{t_0+t_{mess}} \dot{z}_\infty^{(0)} \left(1 - e^{-\lambda t_{akt}}\right) e^{-\lambda t} \mathrm{d}t \tag{1}$$

Daraus folgt

$$\dot{z}_\infty^{(0)} = \frac{1}{\left(1 - e^{-\lambda t_{akt}}\right)} \frac{-\lambda(N - t_{mess}N_{null})}{\left(e^{-\lambda(t_0+t_{mess})} - e^{-\lambda t_0}\right)} \tag{2}$$

Fehler: Die Fehler in N bzw. N_{null} fallen linear ins Gewicht. Die Fehler in t_{mess} sind sehr klein, da die Messzeit von der Elektronik der Messgeräte gesteuert wurde. Der Fehler in der Aktivierungszeit kann auch vernachlässigt werden, da wir die Aktivierungszeit mit einem Fehler von wenigen Sekunden gemessen haben. Das ist bei der Aktivierungszeit von knapp 1,5 Stunden ein Fehler im sub-Promille-Bereich.

Der Fehler in $\dot{z}_\infty^{(0)}$ wurde mit der üblichen Fehlerfortpflanzung berechnet.

Die Werte sind in Tabelle 9 und 10.

Nr.	d/cm	Zählrohr	t_0/s	t_{mess}/s	N	$\dot{z}_\infty^{(0)}/sek$	$\Delta\dot{z}_\infty^{(0)}/sek$
8	30	A	386	1800	1773	0,36	0,06
7	25	C	386	1800	2325	1,05	0,07
6	20	D	386	800	2200	3,2	0,12
5	15	A	2443	1800	5860	7,41	0,14
4	10	C	2443	1800	16078	24,61	0,23
2	5	D	2443	1800	54680	88,83	0,45
10	2,4	A	4479	1800	52004	130,9	0,67
9	35	C	4479	1800	1522	0,07	0,14

Tabelle 9: errechnete $\dot{z}_\infty^{(0)}$ mit Cadmium

Nr.	d/cm	Zählrohr	t_0/s	t_{mess}/s	N	$\dot{z}_\infty^{(0)}/sek$	$\Delta\dot{z}_\infty^{(0)}/sek$
9	35	A	238	600	1705	3,43	0,13
8	30	C	238	600	3196	7,69	0,18
7	25	D	238	600	7458	19,34	0,29
6	20	A	1208	600	14447	48,16	0,57
5	15	C	1208	600	38899	139,56	1,24
4	10	D	1208	600	106923	366,7	3,09
2	5	A	1925	600	206347	827,44	6,7
10	2,4	C	1925	600	240671	965,5	7,81

Tabelle 10: errechnete $\dot{z}_\infty^{(0)}$ ohne Cadmium

Die berechneten, vergleichbaren Zählraten sind in den Bildern 2 und 3.

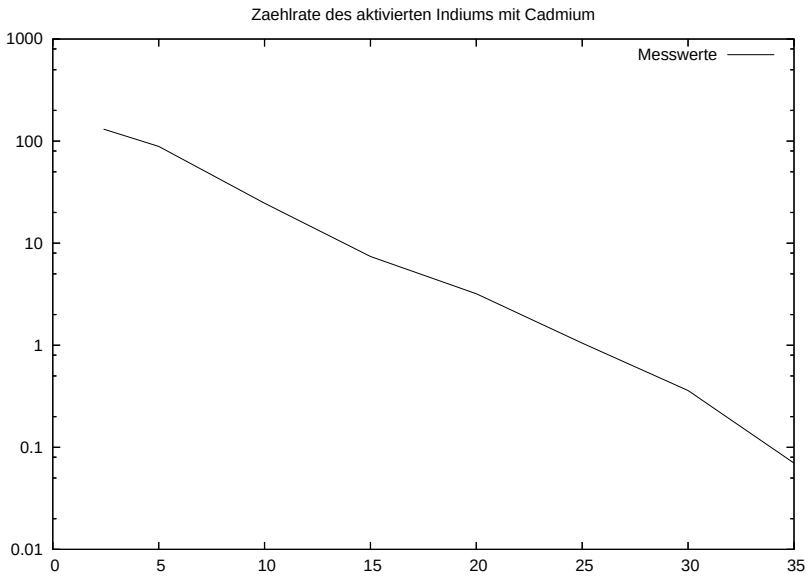


Abbildung 2: Berechnete Zählraten mit Cadmium

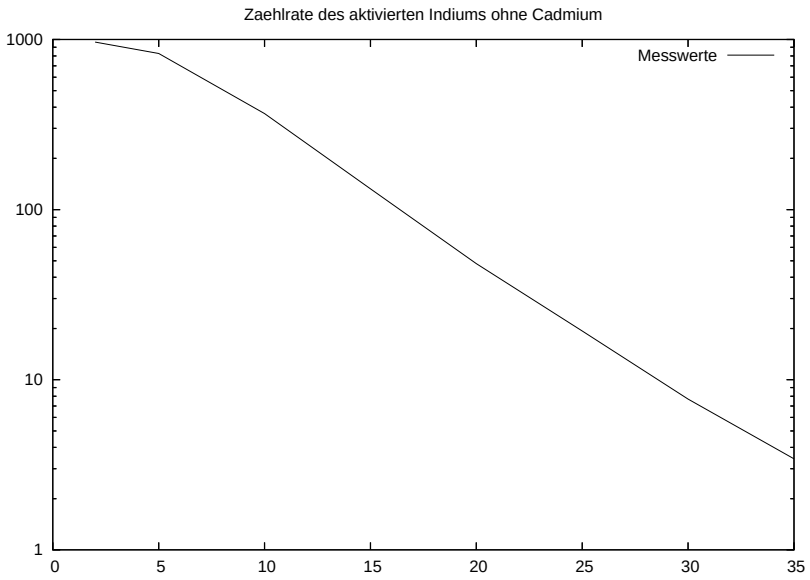


Abbildung 3: Berechnete Zählraten ohne Cadmium

Durch Differenzbildung bestimmt man den Fluss thermischer Neutronen (siehe Tabelle 11 und Bild 4).

d/cm	$\dot{z}_\infty^{(0)}/sek$	$\Delta\dot{z}_\infty^{(0)}/sek$
2,4	834,55	7,84
5	738,61	6,75
10	342,07	3,09
15	125,15	1,25
20	44,95	0,58
25	18,3	0,3
30	7,33	0,19
35	3,36	0,19

Tabelle 11: Zählraten für thermische Neutronen

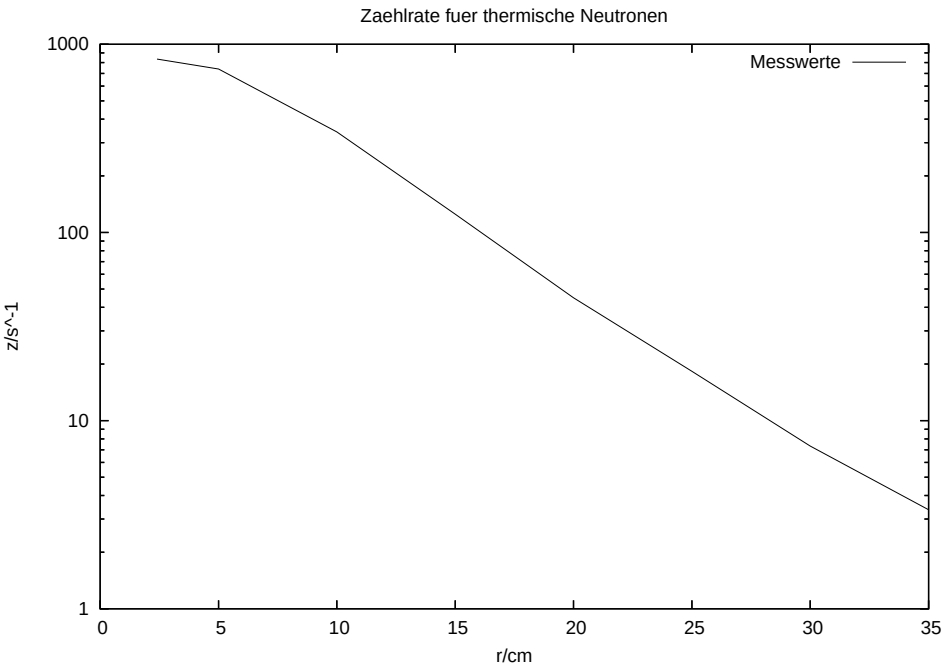


Abbildung 4: Berechnete Zählraten für thermische Neutronen

4.2 Fermi Alter

Zur Bestimmung des Alters von thermischen und epithermischen Neutronen plottet man die zurückgerechneten Zählraten halblogarithmisch über r^2 und fittet daran eine Gerade an. Es gilt:

$$n \propto e^{-\frac{r^2}{4\tau}} \tag{3}$$

Daher ist die Steigung der Geraden dann $-\frac{1}{4\tau}$.

Die entsprechenden Plots sind in den Bildern 6 bzw. 5.

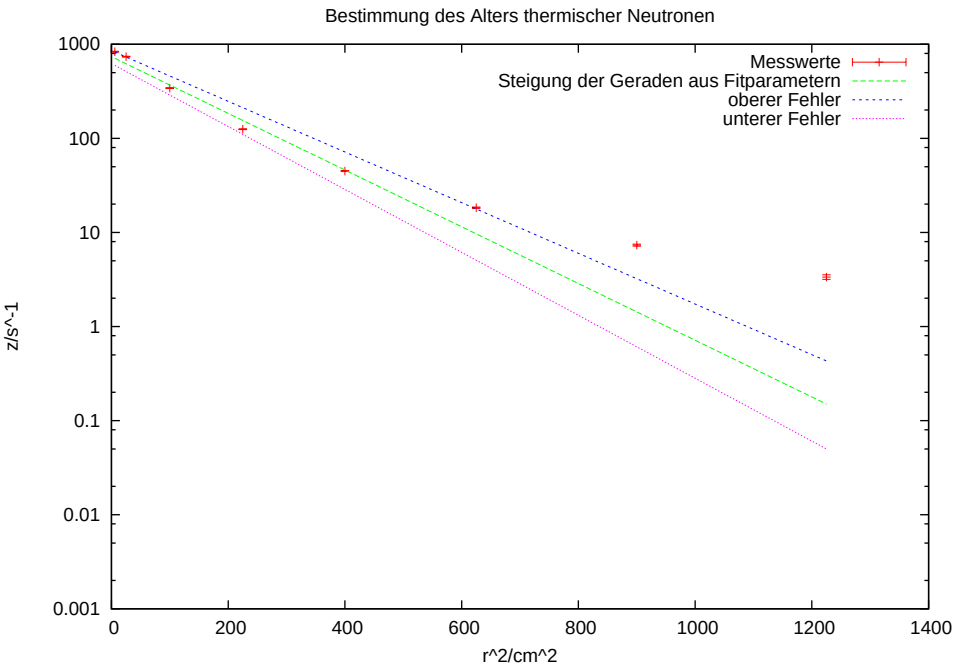


Abbildung 5: Bestimmung des Fermialters für thermische Neutronen

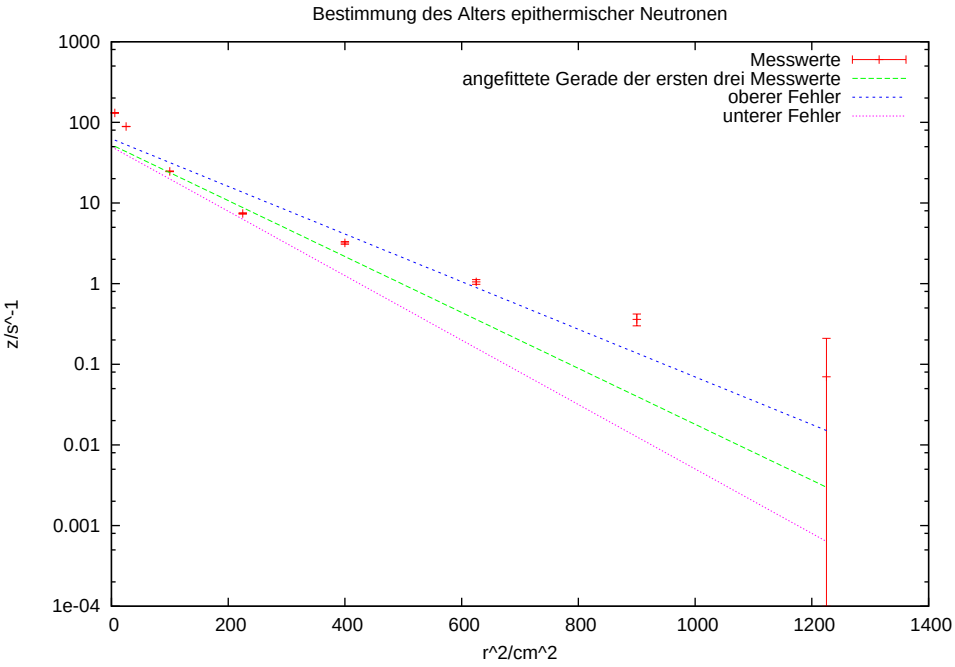


Abbildung 6: Bestimmung des Fermialters für epithermische Neutronen

Daraus ergibt sich für das Fermialter der Neutronen:

$$\tau_{therm} = 36(+4,33/-3,49)cm^2 \quad (4)$$
$$\tau_{epitherm} = 31,3(+5,44/-4,03)cm^2 \quad (5)$$

Die Neutronen verhalten sich in Wasser nicht, wie von Fermis Alters-Theorie vorrausgesagt. Sie werden nicht gleichmäßig abgebremst. Das äußert sich auch darin, dass die gemessenen Werte weit weg von den in den Plot gelegten Geraden liegt. Um so mehr erstaunt es, dass das Fermialter nicht stark von entsprechenden Literaturwerten abweicht.

4.3 Wirkunsquerschnitt

Für große Abstände von der Neutronenquelle gilt

$$n \propto \frac{1}{r^2} e^{-\Sigma r} \quad (6)$$

Daraus lässt sich der makroskopische Wirkunsquerschnitt Σ berechnen. Wir plotten $r^2 \dot{z}_{\infty}^{(0)}$ über r (siehe Bild 7 und 8 und fitten eine gerade an die Werte für große Abstände:

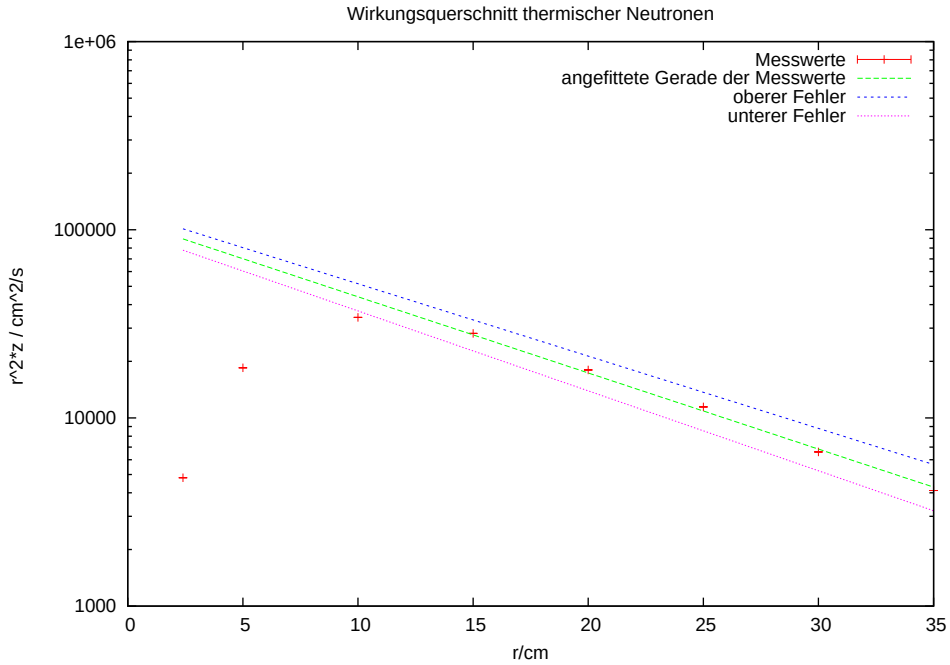


Abbildung 7: Bestimmung des Fermialters für thermische Neutronen

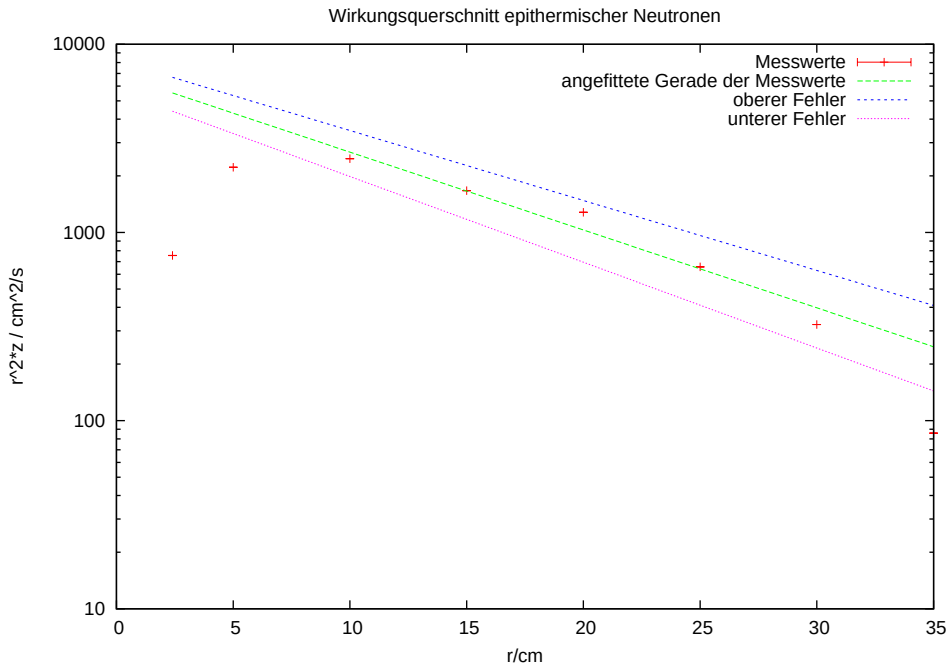


Abbildung 8: Bestimmung des Fermialters für epithermische Neutronen

Aus den Graphen erhalten wir die makroskopischen Wirkungsquerschnitte:

$$\Sigma_{therm} = (0.0932 \pm 0.00465)cm^{-1} \tag{7}$$
$$\Sigma_{epitherm} = (0.0955 \pm 0.0097)cm^{-1} \tag{8}$$

Daraus lassen sich wiederum über

$$\Sigma = \frac{\varrho N_A}{A}\sigma \tag{9}$$

die mikroskopischen Wirkunsquerschnitte ausrechnen, wobei N_A die Avogadro-Zahl, ϱ die Dichte und A die Molmasse ist:

$$\sigma_{therm} = (1,397 \pm 0.068)barn \tag{10}$$
$$\sigma_{epitherm} = (1,43 \pm 0.145)barn \tag{11}$$

Über das Diagramm folgt für die mittlere Energie der Neutronen:

$$E_0 = 5 \pm 1,5MeV \tag{12}$$

4.4 Fluß thermischer Neutronen

Über den Anschlussfaktor A lässt sich auf einfache Weise der Fluss thermischer Neutronen bestimmen über:

$$\Phi_{therm} = A\dot{z}_{\infty}^{(0)} \tag{13}$$

Der Anschlussfaktor A wird beeinflusst von der Fläche der Indiumfolien, dem Wirkunsquerschnitt, Korrekturfaktoren für die Dicke der Indiumfolie, dem vom Detektor abgedeckten Raumwinkel sowie weiteren Korrekturfaktoren für Selbstabsorbtion in der Folie.

Zur Berechnung der Anschlussfaktors liest man den Wert für die Korrekturfaktoren aus der Grafik im Anleitungsblatt ab und multiplizieren mit der Fläche der Indium-Folien.

Es ergibt sich:

$$A = 15.4 \pm 0.871 cm^{-2} \tag{14}$$

Daraus ergeben sich wiederum die Flüsse bei verschiedenen Abständen (siehe Tabelle 12).

d/cm	$\dot{z}_{\infty}^{(0)}/sek$	Φ_{therm}	$\Delta\Phi_{therm}$
2,4	834,55	12852,05	1706,76
5	738,61	11374,61	1510,34
10	342,07	5267,81	699,44
15	125,15	1927,29	256,03
20	44,95	692,26	92,13
25	18,3	281,77	37,61
30	7,33	112,85	15,23
35	3,36	51,76	7,47

Tabelle 12: Fluss der Neutronen bei verschiedenen Abständen

4.5 Stärke der Neutronenquelle

Natürlich interessiert nicht nur der Neutronenfluss in Abhängigkeit vom Abstand, sondern auch die Gesamtstärke der Neutronenquelle. Diese ergibt sich durch Integration des Flusses der thermischen Neutronen über den Radius:

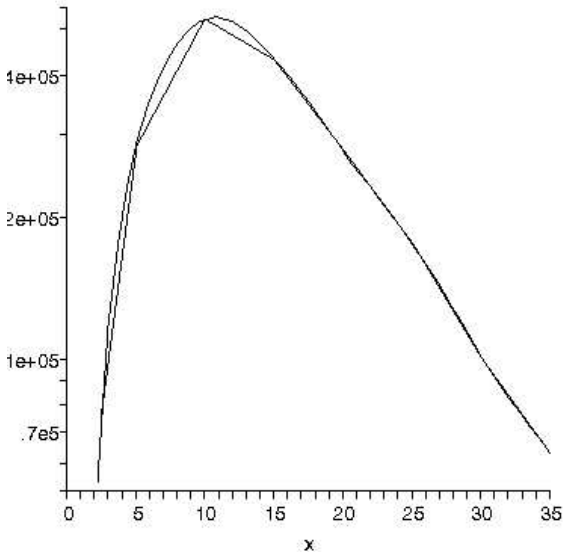
$$\dot{Q} = \int \Sigma_a \Phi(r) 4\pi r^2 \mathrm{d}r \tag{15}$$

Vom Radius $r = 0$ bis $r = 35cm$ wurden die Messwerte kubisch interpoliert und anschließend numerisch integriert. Die Integration wurde mit Hilfe von Maple ausgeführt. Der Fehler der numerischen Integration selbst ist vernachlässigbar klein. Die Unsicherheit kommt von der Interpolation. Diese könnte auch anders ausgeführt werden, so dass es zu einem anderen Ergebnis kommt. Ein Fehler von 5% allein für diesen Rechenschritt scheint angemessen. Vom Radius $r = 35cm$ bis $r = \infty$ wurde der Fluss der Neutronen durch

$$z \propto \frac{1}{r^2} e^{-\Sigma r} \tag{16}$$

fortgesetzt und dies integriert.

Die Messwerte sowie die Interpolation sind hier gezeigt:



Für die Stärke der Neutronenquelle ergibt sich:

$$\dot{Q} = \left(2,7910^6 \pm 2,5610^5\right) \frac{1}{cm^2 s} \tag{17}$$

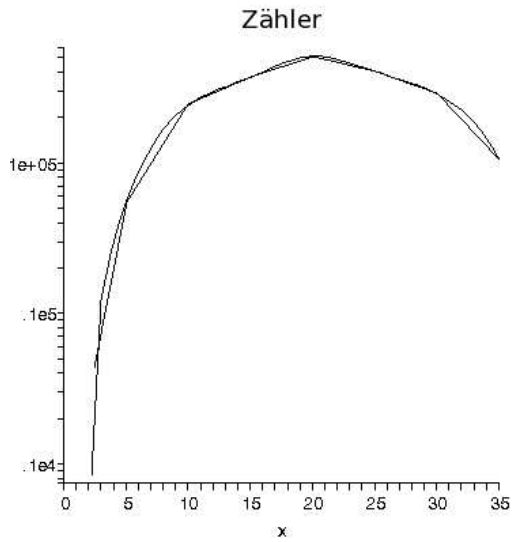
wobei der Fehler in den Literaturwerten vernachlässigt wurde.

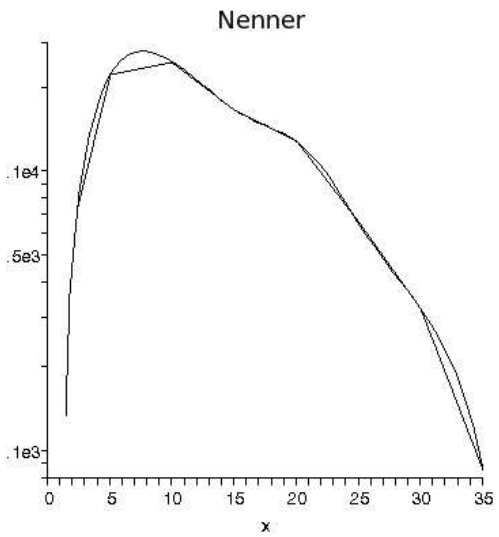
4.6 mittlerer quadratischer Abstand

Der mittlere quadratische Abstand der Neutronen, $\langle r^2 \rangle$, lässt sich leicht aus der Zählrate in Abhängigkeit vom Abstand bestimmen:

$$\langle r^2 \rangle = \frac{r^4 \dot{z}_\infty^{(0)} \mathrm{d}r}{r^2 \dot{z}_\infty^{(0)} \mathrm{d}r} \tag{18}$$

Die Integration wird wieder wie bei der vorhergehenden Aufgabe durch Interpolation und anschließende numerische Integration mit Maple gelöst. Die Integranten im Zähler bzw. im Nenner sind hier aufgetragen:





Die Integration liefert

$$\langle r^2 \rangle = (265 \pm 17,72)cm \tag{19}$$

und mit

$$\langle r^2 \rangle = 6\tau$$

folgt

$$\tau = (44,3 \pm 2,95)cm \tag{20}$$

Hier ergibt sich ein um ca. 30% höheres Fermi-Alter als bei der Annäherung der Messwerte durch eine Gerade (s.o.).

5 Zusammenstellung der Ergebnisse

Wir positionierten Indium-Plättchen mit und ohne Cadmium Ummantelung in unterschiedlichen Abständen zu einer Neutronenquelle in Wasser und aktivierten das Indium so. Wir haben anschließend die Aktivität der Indium-Plättchen gemessen. Daraus wurde zurückgerechnet auf die Aktivität bei unendlich langer Aktivierungsdauer.

Aus der Abstandsabhängigkeit dieser Aktivität bei mittleren Abständen haben wir das Fermialter für thermische für epithermische Neutronen bestimmt:

$$\tau_{therm} = 36(+4,33/-3,49)cm^2 \tag{21}$$

$$\tau_{epitherm} = 31,3(+5,44/-4,03)cm^2 \tag{22}$$

Aus der Abstandsabhängigkeit bei großen Abständen haben wir die makroskopischen Wirkungsquerschnitt bestimmt:

$$\Sigma_{therm} = (0.0932 \pm 0.00465)cm^{-1} \tag{23}$$

$$\Sigma_{epitherm} = (0.0955 \pm 0.0097)cm^{-1} \tag{24}$$

Und daraus den mikroskopischen:

$$\sigma_{therm} = (1,397 \pm 0.068)barn \tag{25}$$

$$\sigma_{epitherm} = (1,43 \pm 0.145)barn \tag{26}$$

Durch Integration über den Radius ergab sich die Stärke der Neutronenquelle zu

$$\dot{Q} = \left(2,7910^6 \pm 2,5610^5\right) \frac{1}{cm^2 s} \tag{27}$$

und der mittlere quadratische Abstand der Neutronen zu

$$\langle r^2 \rangle = (265 \pm 17,72)cm \tag{28}$$

6 Würdigung der Ergebnisse

Die Anwendung von Fermis Alterstheorie auf die Bremsung von Neutronen durch Wasser scheint sehr gewagt, da Wasser die Grundannahme von Fermis Theorie, die kontinuierliche Bremsung, nicht erfüllt. Das sieht man auch daran, dass der halblogarithmische Plot der Zählraten über den quadratischen Abstand nicht annähernd eine Gerade ist.

Um so mehr erstaunt es, dass die erhaltenen Ergebnisse nicht weit von den Literaturwerten abweichen.

Mit einem einfachen Aufbau kann man hier das Verhalten von Neutronen in Wasser relativ genau beobachten.

Impressum	
Autor:	Andreas Buhr, Karlstraße 18, D-63225 Langen
Satz:	LaTeX
E-Mail	andreas at andreasbuhr.de
Web	www.andreasbuhr.de