

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DORTMUND

ANFÄNGERPRAKTIKUM PHYSIK
SOMMERSEMESTER
2014

V701
Reichweite von Alphastrahlung

15.04.2014

1. ABGABE

Johannes Schlüter
Joshua Luckey

johannes.schlueter@udo.edu
joshua.luckey@udo.edu

1 Einleitung

Im Versuch V701 "Reichweite von α -Strahlung" wird die Reichweite von α -Strahlung in Luft bei verschiedenen Drücken bestimmt werden. Zum Schluss wird noch die Statistik des radioaktiven Zerfalls überprüft.

2 Theorie

2.1 Entstehung der α -Strahlung

Im Versuch wird ein Americium-Präparat als α -Strahlungsquelle verwendet, es gehört zu den Actanoiden und die Halbwertszeit beträgt $T_{1/2} = 458$ a.

Ein Americium-Atom zerfällt in ein Neptunium-Atom und in ein zweifach positiv geladenes Helium-Atom (Heliumkern). Diese emittierten Heliumkerne sind die verwendeten α -Teilchen.

Die Strahlung, die durch den Zerfall von Neptunium und deren Zerfallsprodukten entsteht, kann vernachlässigt werden, da diese immer höhere Halbwertszeiten haben und daraus folgt, dass noch weniger α -Teilchen emittiert werden.

2.2 Reichweite der Strahlung bei hohen Energien

Beim Durchlaufen eines α -Teilchen in einem Medium, kann es zu elastischen Stößen mit den dort befindlichen Teilchen kommen, wobei das α -Teilchen vernachlässigbar wenig Energie verliert. Die meiste Energie verliert das α -Teilchen durch die Anregung oder Dissoziation von Molekülen. Bei hoher Energie der α -Strahlung kann man den Energieverlust mithilfe der Bethe-Bloch-Gleichung (1) beschreiben.

$$-\frac{dE_\alpha}{dx} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0 m_e} \cdot \frac{nZ}{v^2} \cdot \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \quad (1)$$

z : Ladung der Strahlung

n : Teilchendichte des Mediums

Z : Ordnungszahl

v : Geschwindigkeit der Strahlung

I : Ionisierungsenergie des Mediums

2.3 Reichweite der Strahlung bei geringen Energien

Da die Energie bei der in diesem Versuch untersuchten α -Strahlung zu gering ist, um den Energieverlust mithilfe der Bethe-Bloch-Gleichung zu bestimmen, wird die mittlere

Reichweite in Luft empirisch bestimmt. (Im niedrigen Energiebereich kommt es vermehrt zu Ladungsaustauschprozessen):

$$R_m = 3.1 \cdot E_\alpha^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Gilt für $E_\alpha \leq 2,5 \text{ MeV}$.

2.4 Funktionsweise eines Halbleiter-Sperrschichtzählers

Zur Messung wird ein Halbleiter-Sperrschichtzähler verwendet, um die Anzahl der α -Teilchen und deren Energie zu messen. Trifft ein α -Teilchen auf den Detektor, so entstehen Elektronen-Loch Paare, da die α -Teilchen zweifach positiv geladen sind. Es kommt kurzzeitig zu einem Stromfluss, welcher als Impuls an den Multichannel Analyzer zur Verarbeitung der Information weitergegeben wird. Die Stärke des Impulses ist dabei proportional zur Energie des α -Teilchen, welches auf den Sperrschichtzähler trifft.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Wie in Abb. 1 dargestellt ist das Americium-Präparat in einem evakuierten Glaszylinder befestigt, um den Druck zu verändern bzw. den Glaszylinder zu evakuieren, wird eine Vakuumpumpe benutzt. Der Halbleiter-Sperrschichtzähler dient, wie in der Theorie beschrieben als Detektor, danach wird der Impuls im Vorverstärker noch verstärkt, um dann mit dem Multichannel Analyzer (MCA) am Computer mithilfe einer Software die Daten auszuwerten. Das Präparat ist im Glaszylinder entlang einer Achse verschiebbar.

3.2 Messung zur Reichweite der α -Strahlung

Zur Bestimmung der Reichweite der α -Strahlung, wird bei festgelegtem Abstand zwischen Strahlenquelle und Detektor die Anzahl der Stromimpulse bei verschiedenen Drücken gemessen. Es wird pro Druck 120s lang gemessen. Dabei wird mit einem Druck von annähernd 0 mbar begonnen, anschließend wird der Druck bis 400 mbar um 100 mbar pro Messung erhöht, danach in 50 mbar Schritten bis Normaldruck erreicht ist. Die Messung wird für einen leicht veränderten Abstand noch einmal wiederholt.

Die effektive Länge x lässt sich bei festem Abstand x_0 zwischen Strahlenquelle und Detektor in Abhängigkeit vom Druck p im Glaszylinder angeben.

$$x = x_0 \cdot \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

Die effektive Länge gibt an, wie groß der Abstand zwischen Strahlenquelle und Detektor sein müsste, wenn die Messung bei festem Atmosphärendruck p_0 durchgeführt würde, um ein äquivalentes Verhalten der Anzahl der ankommenden α -Teilchen zu erhalten in Relation zum eingestellten Druck p . Dadurch kann man die Reichweite der Teilchen durch Variation des Druckes bestimmen.

3.3 Messung zur Statistik des radioaktiven Zerfalls

Im letzten Versuchsteil werden für einen festen Abstand (Präparat/Detektor) im evakuierten Glaszylinder alle 10 s die Zerfälle gemessen. Dies wird 100 mal wiederholt, damit eine statistische Aussage getroffen werden kann.

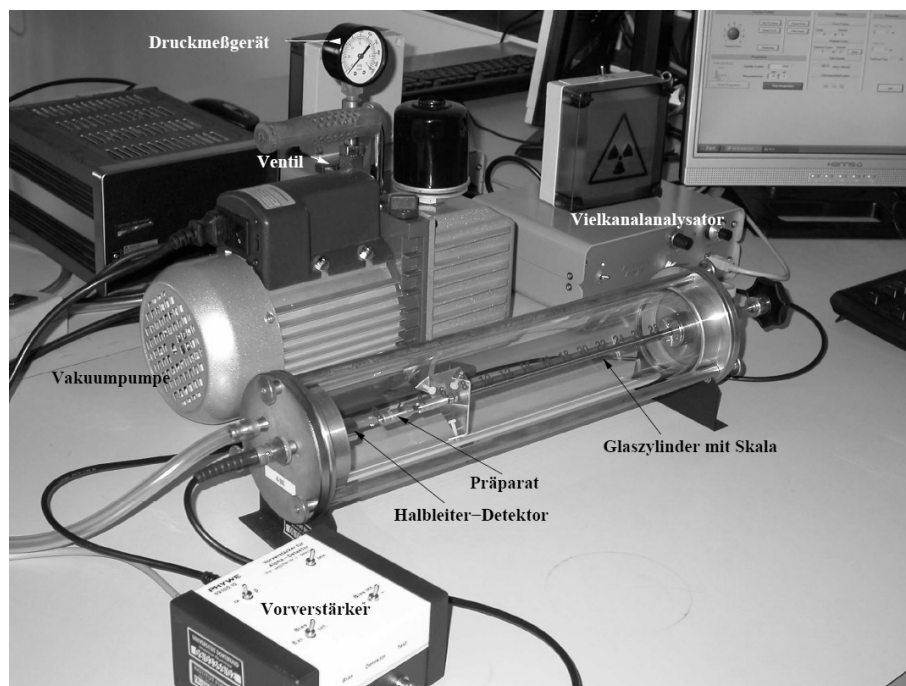


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung der Reichweite von α -Strahlung

4 Auswertung

In folgendem Abschnitt sind die während des Versuche aufgenommenen Daten, so wie die aus diesen gewonnenen Ergebnisse tabellarisch und mit Hilfe von Grafiken dargestellt. An entsprechender Stelle werden Erklärungen zu den Messdaten, Rechnungen und Ergebnissen gegeben.

4.1 Messung der mittleren Reichweite im Abstand 20mm

Die Messergebnisse der ersten Messung zu Bestimmung der mittleren Reichweite R_m sind in Tabelle 1 aufgeführt. Wobei die hervorgehobene Zeile wegen der großen Abweichung nicht für die folgende Auswertung genutzt wurde. Für die Berechnung der effektiven Länge wurde $x_0 = (20 \pm 1)$ mm verwendet.

Druck p [mbar]	Channel Maximum Ch_{max}	Energie Maximum E_{max} [MeV]	Anzahl Pulse N	effektive Länge x [mm] (II)
0 ± 10	630	3,807	34 527	$0,0 \pm 0,2$
100 ± 10	628	3,795	27 953	$2,0 \pm 0,2$
200 ± 10	628	3,795	24 588	$3,9 \pm 0,3$
300 ± 10	631	3,813	38 289	$5,9 \pm 0,4$
400 ± 10	630	3,807	14 007	$7,9 \pm 0,4$
450 ± 10	632	3,819	7717	$8,9 \pm 0,5$
500 ± 10	623	3,764	9970	$9,9 \pm 0,5$
550 ± 10	631	3,813	6084	$10,9 \pm 0,6$
600 ± 10	632	3,819	5376	$11,8 \pm 0,6$
650 ± 10	624	3,770	2688	$12,8 \pm 0,7$
700 ± 10	622	3,758	2933	$13,8 \pm 0,7$
750 ± 10	662	4,000	2051	$14,8 \pm 0,8$
800 ± 10	631	3,813	1773	$15,8 \pm 0,8$
850 ± 10	634	3,831	1997	$16,8 \pm 0,9$
900 ± 10	636	3,843	918	$17,8 \pm 0,9$
950 ± 10	640	3,867	1031	19 ± 1
1000 ± 10	630	3,807	852	20 ± 1

Tabelle 1: Messwerte der Messung im Abstand von 20mm

In Abbildung 2 sind diese Messwerte grafisch dargestellt, wobei die Gesamtzahl der gemessenen Pulse durch Division mit der Messdauer $\Delta t = 120$ s in die Zerfallsrate umgerechnet wurde. Die effektive Länge, die Strecke die die Alphastrahlung relativ zu Atmosphärendruck, zurück gelegt hat berechnet sich nach (3).

Die mittlere Reichweite R_m der Alphastrahlung erhält man nun, indem zunächst eine lineare Regression der Messwerte durchgeführt wird. Die in Abbildung 2 grau eingezeichneten Messwerte wurden bei dieser Regression nicht verwendet. Mit Hilfe der Python-Bibliothek *SciPy* [1] erhält man aus den Messdaten mit dem Ansatz

$$A(x) = a \cdot x + b, \quad (4)$$

die Regressionsparameter

$$a = (-20 \pm 1) \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-1} \quad (4a)$$

$$b = (280 \pm 10) \text{ s}^{-1}. \quad (4b)$$

Im folgenden Schritt wird eine zur x-Achse parallele Gerade auf halber Höhe des Maxi-

malwerts, der gemessenen Zerfallsraten, hier gestrichelt, eingezeichnet.

Die zu bestimmende Reichweite R_m lässt sich damit als x-Koordinate des Schnittpunktes dieser beiden Geraden ablesen. Die auf diese Weise ermittelte, mittlere Reichweite beträgt für diese Messdaten

$$R_m = (6,6 \pm 0,5) \text{ mm.} \quad (5a)$$

Durch Umstellen von (2) kann aus diesem Wert die Energie der Alphastrahlung zu

$$E_\alpha = (1,65 \pm 0,08) \text{ MeV} \quad (5b)$$

berechnet werden.^①

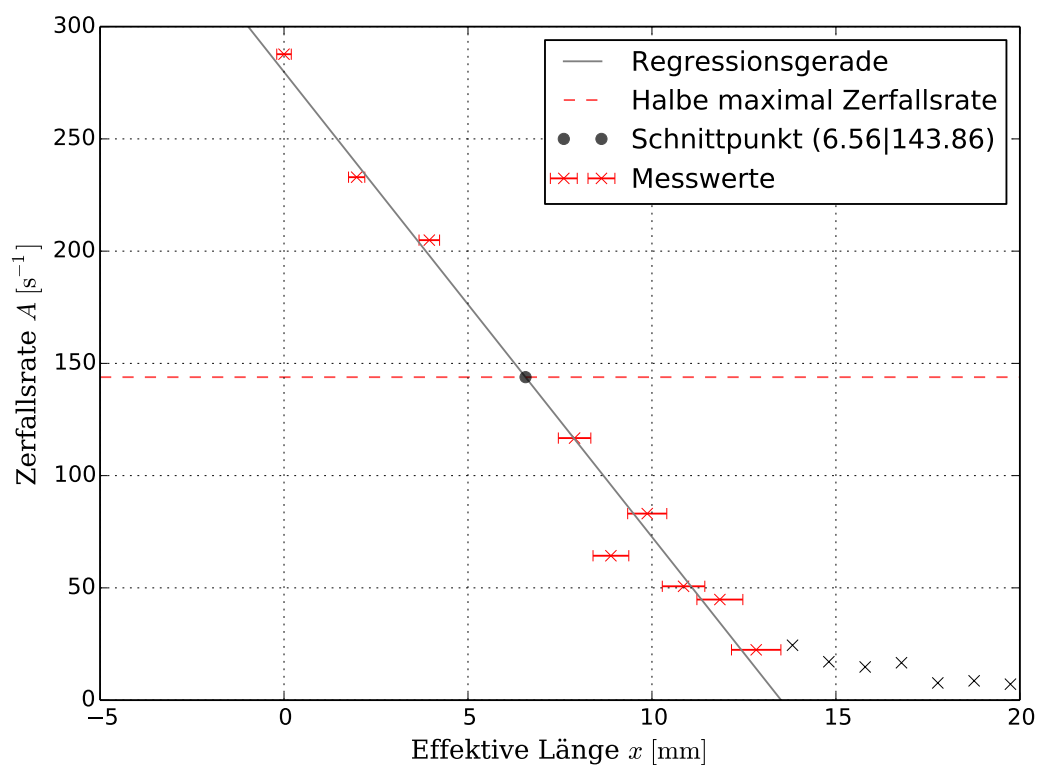


Abbildung 2: Darstellung der Messdaten aus Tabelle 1 und Bestimmung von R_m

Der aus diesen Versuchsdaten zu berechnende Energieverlust $-\frac{dE}{dx}$ wird wegen der besseren Messergebnisse im folgenden Unterabschnitt vorgenommen.

^①Der Fehler wurde hierbei durch (I) bestimmt.

4.2 Messung der mittleren Reichweite im Abstand 25mm

Die bei der Messung im Abstand von $x_0 = (25 \pm 1)$ mm aufgenommenen Daten sind in Tabelle 2 dargestellt.

Druck p [mbar]	Channel Maximum Ch_{max}	Energie Maximum E_{max} [MeV]	Anzahl Pulse N	effektive Länge x [mm] (II)
0 ± 10	559	4,000	77 188	$0,0 \pm 0,2$
200 ± 10	512	3,664	69 282	$4,9 \pm 0,3$
400 ± 10	446	3,191	58 770	$9,9 \pm 0,5$
450 ± 10	468	3,349	53 517	$11,1 \pm 0,5$
500 ± 10	431	3,084	50 024	$12,3 \pm 0,6$
550 ± 10	422	3,020	46 370	$13,6 \pm 0,6$
600 ± 10	419	2,998	38 034	$14,8 \pm 0,6$
650 ± 10	419	2,998	35 348	$16,0 \pm 0,7$
700 ± 10	419	2,998	26 457	$17,3 \pm 0,7$
750 ± 10	419	2,998	18 744	$18,5 \pm 0,8$
800 ± 10	416	2,977	10 536	$19,7 \pm 0,8$
850 ± 10	418	2,991	5429	$21,0 \pm 0,9$
900 ± 10	412	2,948	4797	$22,2 \pm 0,9$
950 ± 10	415	2,970	5281	23 ± 1
1000 ± 10	421	3,013	3660	25 ± 1

Tabelle 2: Messwerte der Messung im Abstand von 25mm

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sind auch die aus diesen Daten berechneten Zerfallsraten (Messzeit $\Delta t = 120$ s) in Abbildung 3 gegen die effektive Länge aufgetragen, um die mittlere Reichweite R_m der Alphastrahlung zu bestimmen.

Die dafür notwendige lineare Regression mit dem Ansatz

$$A(x) = c \cdot x + d, \quad (6)$$

ergibt die Regressionsparameter

$$c = (-29,4 \pm 0,2) \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-1} \quad (6a)$$

$$d = (730 \pm 31) \text{ s}^{-1}. \quad (6b)$$

Aus diesen Daten ergibt sich die mittlere Reichweite von

$$R_m = (13,9 \pm 0,5) \text{ mm}. \quad (7a)$$

Auch aus diesem Wert lässt sich durch Umstellen der (2) die Energie der Alphastrahlung zu

$$E_\alpha = (2,72 \pm 0,07) \text{ MeV} \quad (7b)$$

bestimmen.^②

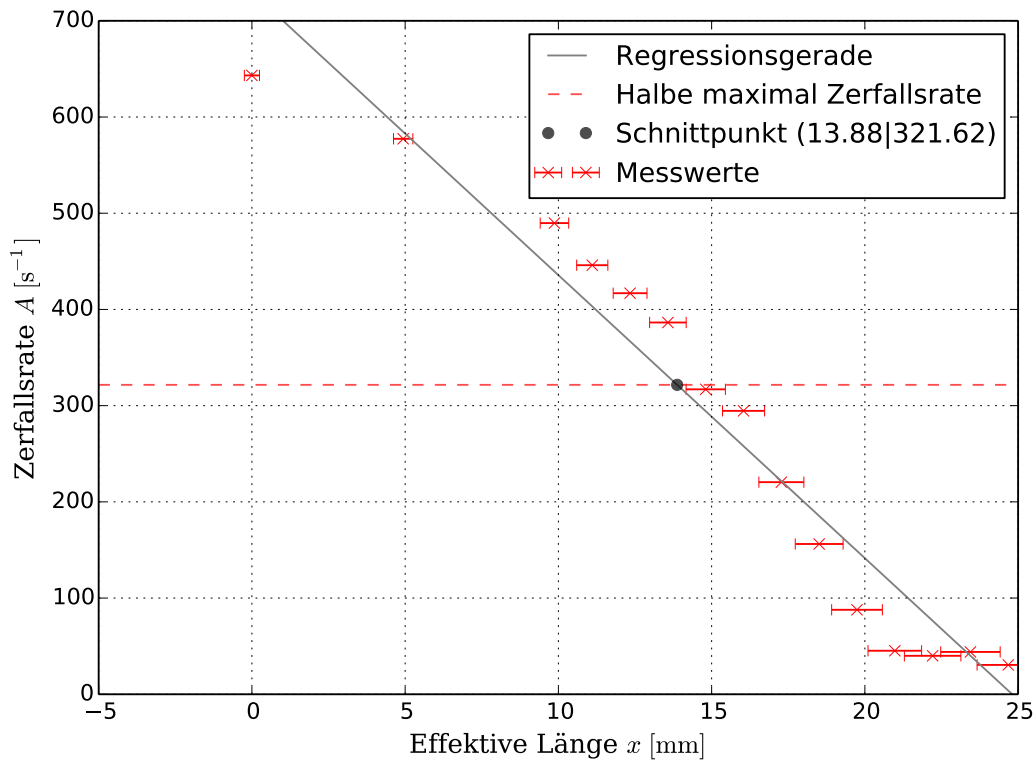


Abbildung 3: Darstellung der Messdaten aus Tabelle 2 und Bestimmung von R_m

Durch das Auftragen der maximalen Energien E_{max} aus Tabelle 2 gegen die effektive Länge x , in Abbildung 4, ist es möglich mit dem Regressionsansatz

$$E(x) = e \cdot x + f, \quad (8)$$

die Funktion des Energieverlaufs mit den Regressionsparametern

$$e = (-0,066 \pm 0,006) \text{ MeV mm}^{-1} \quad (8a)$$

$$f = (3,97 \pm 0,07) \text{ MeV} \quad (8b)$$

zu bestimmen.

Durch Differentiation der auf diese Weise bestimmten Funktion $E(x)$ erhält man den gesuchten Energieverlust

$$-\frac{dE}{dx} = 0,066 \pm 0,006 \text{ MeV mm}^{-1}. \quad (9)$$

^②Der Fehler wurde hierbei durch (I) bestimmt.

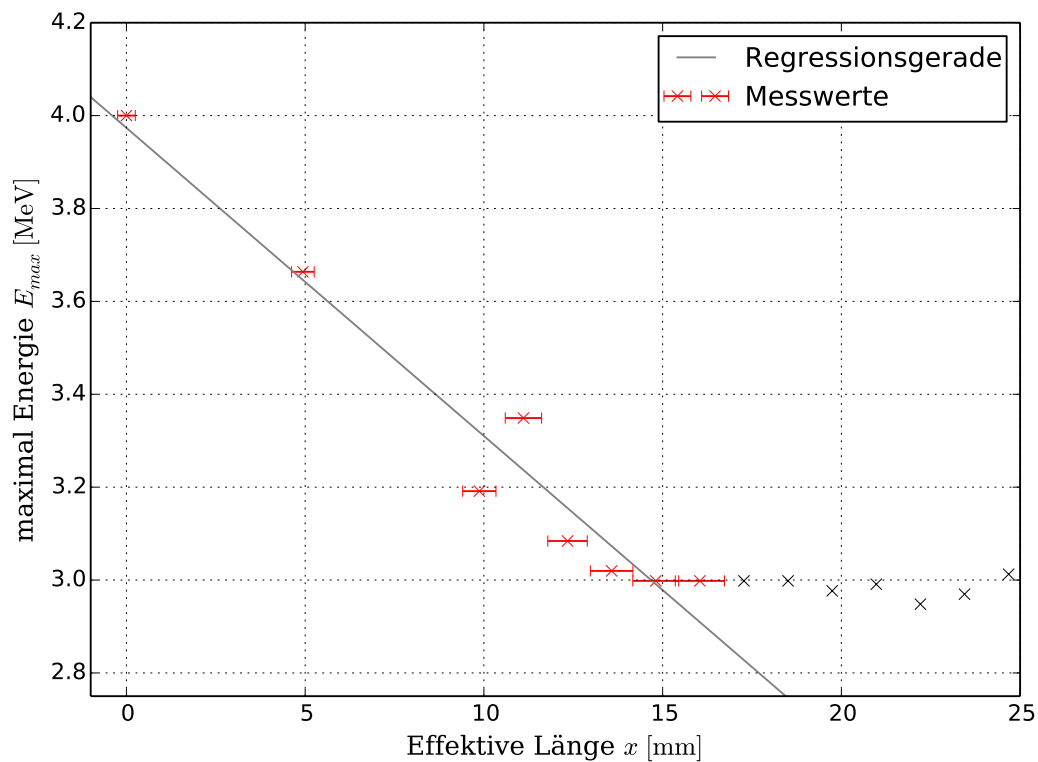


Abbildung 4: Darstellung der maximal Energie in Abhängigkeit der effektiven Länge

4.3 Statistik des radioaktiven Zerfalls

In Tabelle 3 sind die während der Messzeit $\Delta t = 10$ s aufgenommenen Zerfallsraten aufgelistet.

Der Mittelwert und die Standardabweichung dieser Messwerte berechnen sich zu

$$\langle A \rangle = (681 \pm 14) \text{ s}^{-1} \quad (10a)$$

$$\sigma_A = 136 \text{ s}^{-1}. \quad (10b)$$

Diese Messwert sind in Abbildung 5 in einem Histogramm aufgetragen, in dem die Balkenbreite $\Delta N = 20 \text{ s}^{-1}$ gewählt wurde.

In den Abbildungen 6 und 7 ist das Histogramm aus Abbildung 5 noch einmal im Vergleich zu einer diskreten Poisson- bzw. kontinuierlichen Gauß-Verteilung mit dem Mittelwert und der Standardabweichung der Messdaten dargestellt.

Messung Nr.	Zerfallsrate $A \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Messung Nr.	Zerfallsrate $A \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Messung Nr.	Zerfallsrate $A \text{ [s}^{-1}\text{]}$
1	569	35	1223	69	658
2	616	36	1308	70	638
3	590	37	841	71	649
4	566	38	647	72	688
5	599	39	598	73	707
6	627	40	633	74	896
7	612	41	645	75	844
8	604	42	593	76	593
9	596	43	573	77	746
10	618	44	603	78	1089
11	617	45	561	79	674
12	621	46	645	80	754
13	634	47	611	81	750
14	603	48	575	82	834
15	588	49	590	83	795
16	669	50	591	84	703
17	633	51	692	85	858
18	630	52	601	86	702
19	618	53	655	87	636
20	590	54	776	88	599
21	593	55	783	89	1206
22	595	56	997	90	664
23	575	57	838	91	609
24	600	58	683	92	660
25	682	59	681	93	662
26	636	60	815	94	663
27	639	61	628	95	689
28	670	62	670	96	644
29	601	63	652	97	648
30	628	64	623	98	604
31	652	65	620	99	613
32	599	66	719	100	581
33	663	67	858		
34	617	68	597		

Tabelle 3: Anzahl der gemessenen Impulse

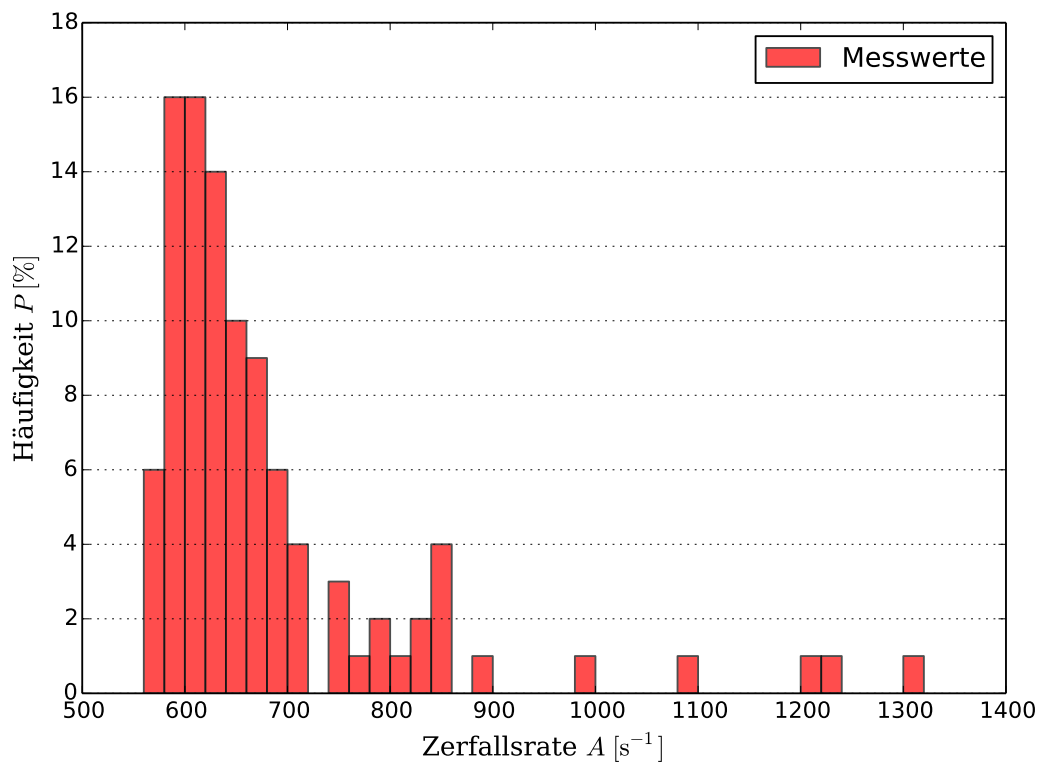


Abbildung 5: Darstellung der Messdaten aus Tabelle 2 und Bestimmung von R_m

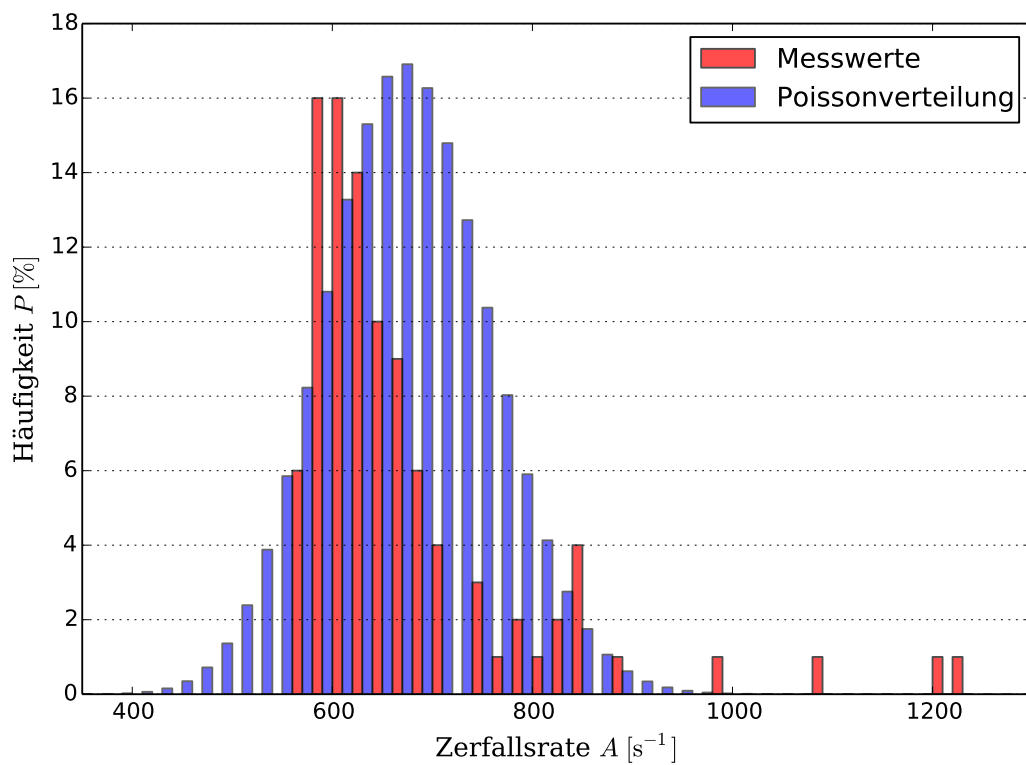


Abbildung 6: Vergleiche der Messdaten mit der diskreten Poissonverteilung

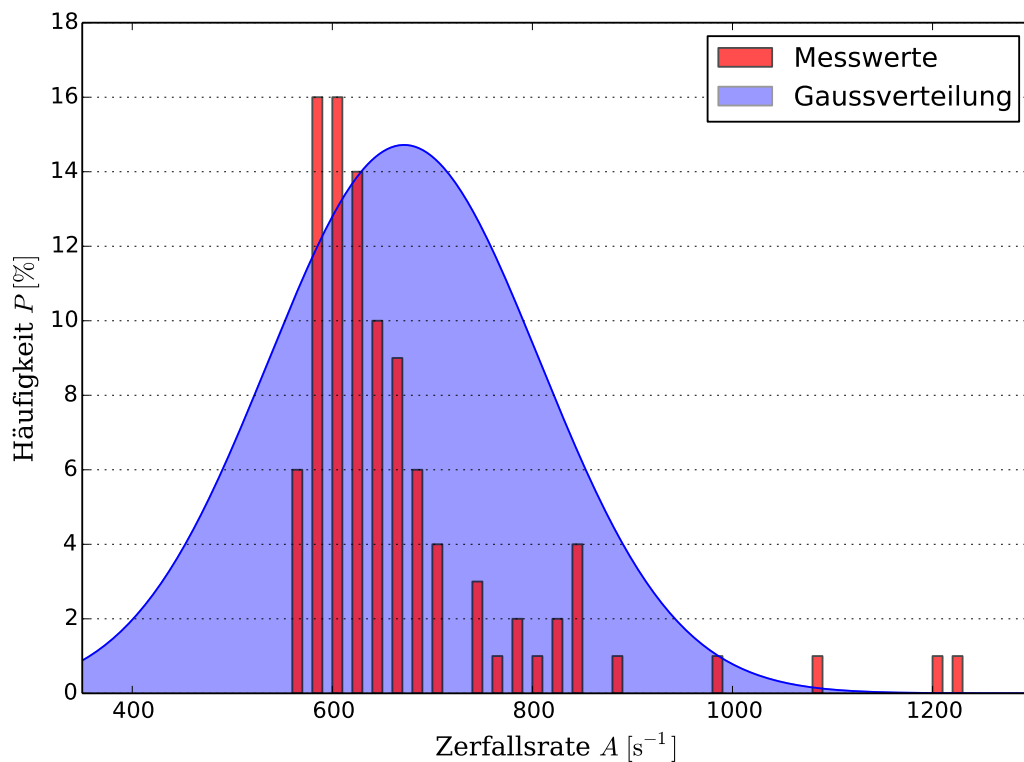


Abbildung 7: Vergleich der Messdaten mit der kontinuierlichen Gaussverteilung

4.4 Fehlerrechnung

In diesem Abschnitt sind die für die in der Berechnung der Fehler genutzten Gleichungen gelistet, für die Berechnung jeweils die gaußsche Fehlerfortpflanzung genutzt wurde.

Der Fehler der Energie E_α , die aus der mittleren Reichweite R_m berechnet wird erhält man durch die Gleichung.

$$\sigma_{E_\alpha} = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{3,1} \right)^{2/3} \frac{\sigma_{R_m}}{R_m^{1/3}} \quad (\text{I})$$

Der Fehler der effektiven Länge x der sich aus dem Fehler des Abstandes x_0 und dem des Druckes p zusammensetzt, berechnet sich nach:

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{x_0}{p_0} \sigma_p \right)^2 + \left(\frac{p}{p_0} \sigma_{x_0} \right)^2} \quad (\text{II})$$

5 Diskussion

Im Folgenden werden die erhaltenen Versuchsergebnisse noch einmal abschließend diskutiert und dabei auf ihre Plausibilität hin untersucht.

Die in den ersten beiden Messreihen erhaltenen Ergebnisse für die Energie der Alphastrahlung ((5b) und (7b)) weisen zwar eine Abweichung von $\Delta E_\alpha = 1,07 \text{ MeV}$ auf. Hinzu kommt jedoch, dass das Ergebnis der zweiten Messung nicht unterhalb der in der Anleitung [2] gegebenen Grenze $E_\alpha = 2,5 \text{ MeV}$ liegt. Ein Vergleich der Messdaten zeigt jedoch, dass die im Abstand $x_0 = 25 \text{ mm}$ gemessenen Daten wesentlich weniger Abweichungen enthalten als die des kürzeren Abstandes, wodurch die in Abschnitt 4.2 berechnete Energie (7b) der Alphastrahlung plausibler zu sein scheint.

Der Vergleich zwischen dem in Abbildung 5 dargestellten Histogramm und den Poissonverteilung in Abbildung 6 und der Gaußverteilung in Abbildung 7 zeigen, dass die Statistik des radioaktiven Zerfalls keiner der beiden Verteilungen entspricht. Da es sich bei der Gaußverteilung um eine kontinuierliche Verteilung handelt, ist diese für die Darstellung von diskreten Messwerte ohnehin schon ungeeignet.

Aber auch zu der Poissonverteilung zeigen die Messwerte einige Unterschiede auf, wie zum Beispiel die unsymmetrische Verteilung und die daraus resultierende, vom Mittelwert abweichende Stelle des Peaks. Jedoch ist der Verlauf der Messdaten für Zerfallsraten $A > A_{max}$ dem der Poissonverteilung für $A > \langle A \rangle$ sehr ähnlich, sodass diese zur Näherungsweise Beschreibung des Verlaufs verwendet werden kann.

Literatur

- [1] *SciPy*. URL: <http://docs.scipy.org/doc/> (besucht am 21.04.2014).
- [2] *Versuchsanleitung. V701 Reichweite von Alphastrahlung*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V701.pdf> (besucht am 21.04.2014).