

Versuchsprotokoll zum Versuch Nr. 701

## Reichweite von $\alpha$ -Strahlung

Johannes Kollek                      Jean-Marco Alameddine  
johannes.kollek@udo.edu      jean-marco.alameddine@udo.edu

Durchführung: 17.05.2016

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Fehlerrechnung</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau und Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1	Aufbau . . . . .	5
3.2	Durchführung . . . . .	6
3.2.1	Einstellung der Diskriminatorschwelle . . . . .	6
3.2.2	Bestimmung der Reichweite von $\alpha$ -Strahlung. . . . .	6
3.2.3	Bestimmung der Statistik des radioaktiven Zerfalles . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Bestimmung der Reichweite und des Energieverlustes von $\alpha$ -Strahlung. . . . .	7
4.1.1	Auswertung für $s = 2,5$ cm. . . . .	7
4.1.2	Auswertung für $s = 1,5$ cm. . . . .	10
4.2	Statistische Auswertung der Zählraten . . . . .	10
4.2.1	Vergleich mit Gaußverteilung . . . . .	10
4.2.2	Vergleich mit Poissonverteilung . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>13</b>
	<b>Literatur</b>	<b>14</b>

# 1 Theorie

Protonen und Neutronen werden in Atomkernen durch die starke Kraft zusammengehalten. Diese besitzt jedoch nur eine geringe Reichweite. Aufgrund dessen überwiegt die abstoßende Coulombkraft zwischen den Protonen die anziehende starke Kraft, wodurch nun beispielsweise ein Helium-4-Atomkern ausgesendet wird. Dies ist ein  $\alpha$ -Teilchen.

Ein solcher Zerfallsprozess kann auch über Tunneleffekte ablaufen. Die Energie von  $\alpha$ -Teilchen wird über dessen Reichweite bestimmt bzw. abgeleitet. Es verliert über zwei Aspekte seine Energie.

Zunächst über elastische Stöße mit dem Medium, welches es durchläuft. Dieser Prozess, als Rutherford-Streuung bekannt, spielt für den Energieverlust eine nebensächliche Rolle, da die Größe der Atomkerndichte im Material sehr gering ist und somit ein Zusammenstoß relativ unwahrscheinlich ist.

Den zweiten, weitaus wichtigeren, Aspekt stellen Ionisationsprozesse, sowie Anregung und Dissoziation von Molekülen im Material dar. Dabei hängt auch hier der Energieverlust pro Wegstück von der Dichte des Materials und der Energie  $E_\alpha$  der  $\alpha$ -Strahlung ab. Bei einer hohen Geschwindigkeit, und somit großer Energie der Strahlung, ist es jedoch wahrscheinlicher, dass es zu keiner Wechselwirkung kommt, da die Zeit, in der sich der Heliumkern in Wechselwirkungsnähe befindet, geringer ist.

Bei hinreichend großen Energien kann der Energieverlust pro Wegstück über die Bethe-Bloch-Gleichung,

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

bestimmt werden, wobei  $z$  die Ladung,  $v$  die Geschwindigkeit,  $Z$  die Ordnungszahl,  $n$  die Teilchendichte und  $I$  die Ionisationsenergie des Targetgases ist. Sie ignoriert jedoch quantenmechanische Effekte wie zum Beispiel den Kernspin.

Die Reichweite ergibt sich dann über das Integral

$$R = \int_0^{E_\alpha} -\frac{dE_\alpha}{dx} dE_\alpha. \quad (2)$$

Da bei geringen Energien vermehrt Ladungsaustauschprozesse stattfinden, verliert die Bethe-Bloch-Gleichung ihre Gültigkeit und somit wird die mittlere Reichweite über empirisch gewonnene Kurven bestimmt. Für sie gilt für  $\alpha$ -Strahlung in Luft die Gleichung

$$R_m = 3,1 \cdot E_\alpha^{3/2}, \quad (3)$$

wobei die Energie in Megaelektronenvolt angegeben in einem Bereich unter 2,5 MeV liegen sollte und  $R_m$  in Millimeter angegeben wird. Unter konstanter Temperatur und konstantem Volumen ist die Reichweite proportional zum umgebenden Druck  $p$ . Folglich kann eine zur Ermittlung der Reichweite eine Absorptionsmessung gemacht werden, bei der der Druck variiert wird. Dadurch gilt für einen festen Abstand  $x_0$  zwischen Detektor und Strahler die effektive Weglänge

$$x_{\text{eff}} = x_0 \frac{p}{p_0}, \quad (4)$$

welche durch den Normaldruck  $p_0 = 1013 \text{ mbar}$  beschrieben wird. [1]

## 2 Fehlerrechnung

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Formeln der Fehlerrechnung aufgelistet, welche für die folgende Versuchsauswertung benötigt werden. Der Mittelwert berechnet sich zu

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

Der Fehler des Mittelwertes berechnet sich zu

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (6)$$

Die Schätzung der Standardabweichung berechnet sich zu

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (7)$$

Für die Fehlerrechnung wird bei allen folgenden Rechnungen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (8)$$

für eine Funktion  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , bei der die Größen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  voneinander unabhängig sind, verwendet.

Bei der linearen Regressionsrechnung gilt mit den Parametern  $m$  und  $b$  und der Ausgleichsgerade  $y = mx + b$  der Zusammenhang:

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad b = \bar{y} - m\bar{x} . \quad (9)$$

Dabei sind  $x_i$  und  $y_i$  linear abhängige Messgrößen. Der Fehler dieser Parameter errechnet sich zudem zu

$$\sigma_m^2 = \frac{\sigma^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad \sigma_b^2 = \frac{\sigma^2 \bar{x}^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad (10)$$

### 3 Aufbau und Durchführung

#### 3.1 Aufbau

Im vorliegenden Experiment wird ein  $\alpha$ -Strahler verwendet, welcher sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, auf einer Schiene in einem Glaszylinder befindet. Mithilfe einer Vakuumpumpe kann

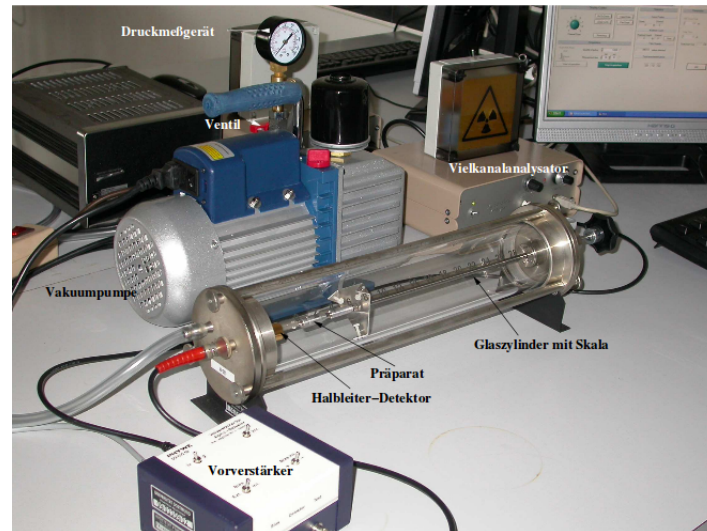


Abbildung 1: Abbildung des verwendeten Versuchsaufbaus. [1]

diese evakuiert werden, der Druckunterschied zum Atmosphärendruck wird an einem Manometer abgelesen. Über die Schiene kann der Abstand der Strahlungsquelle zum Detektor fest gewählt werden. Dieser Halbleiterdetektor ist in der Lage, sowohl die Anzahl der Impulse als auch die relative Energie der  $\alpha$ -Teilchen zu messen. Die grundlegende Funktionsweise ist, dass durch die Strahlung Elektron-Loch-Paare entstehen, so dass freie Ladungen entstehen. Diese werden an Elektroden registriert, und der vom Vorverstärker verstärkte Puls kann verarbeitet werden. Im vorliegenden Versuchsaufbau wird diese Auswertung über das Computerprogramm Multichannel Analyzer realisiert. Dieses bietet unter anderem die Möglichkeit, die Gesamtzählrate über einen festgelegten Zeitraum sowie eine Pulshöhenanalyse durchzuführen.

## **3.2 Durchführung**

### **3.2.1 Einstellung der Diskriminatorschwelle**

Zunächst wird, um die Impulsschwelle richtig einzustellen und somit Hintergrundrauschen zu minimieren, die Diskriminatorschwelle eingestellt. Dazu wird bei Atmosphärendruck die Strahlungsquelle weitestmöglich vom Detektor entfernt und die Schwelle am Vierkanalanalysator so eingestellt, dass keine Impulse mehr in einem hinreichend großen Zeitraum detektiert werden. Daraufhin wird der Abstand solange verringert, bis wieder erste Impulse wahrgenommen werden.

### **3.2.2 Bestimmung der Reichweite von $\alpha$ -Strahlung.**

Zunächst wird der Glaszylinder mithilfe der Vakuumpumpe evakuiert. Für eine konstante Messzeit wird die mittlere Teilchenenergie anhand des Channels mit der höchsten Zählrate sowie die Gesamtzählrate bestimmt. Diese Messung wird für verschiedene Drücke bis zum Atmosphärendruck wiederholt. Zudem wird der gesamte Messvorgang für einen weiteren, geringeren Abstand wiederholt.

### **3.2.3 Bestimmung der Statistik des radioaktiven Zerfalles**

Für einen festen Abstand der Strahlungsquelle zum Detektor wird bei evakuiertem Glaszylinder die Zählrate für ein konstantes Zeitintervall bestimmt. Dies wird für eine hinreichend große Anzahl an Messungen wiederholt, um eine aussagekräftige Statistik zu erhalten.

## 4 Auswertung

### 4.1 Bestimmung der Reichweite und des Energieverlustes von $\alpha$ -Strahlung.

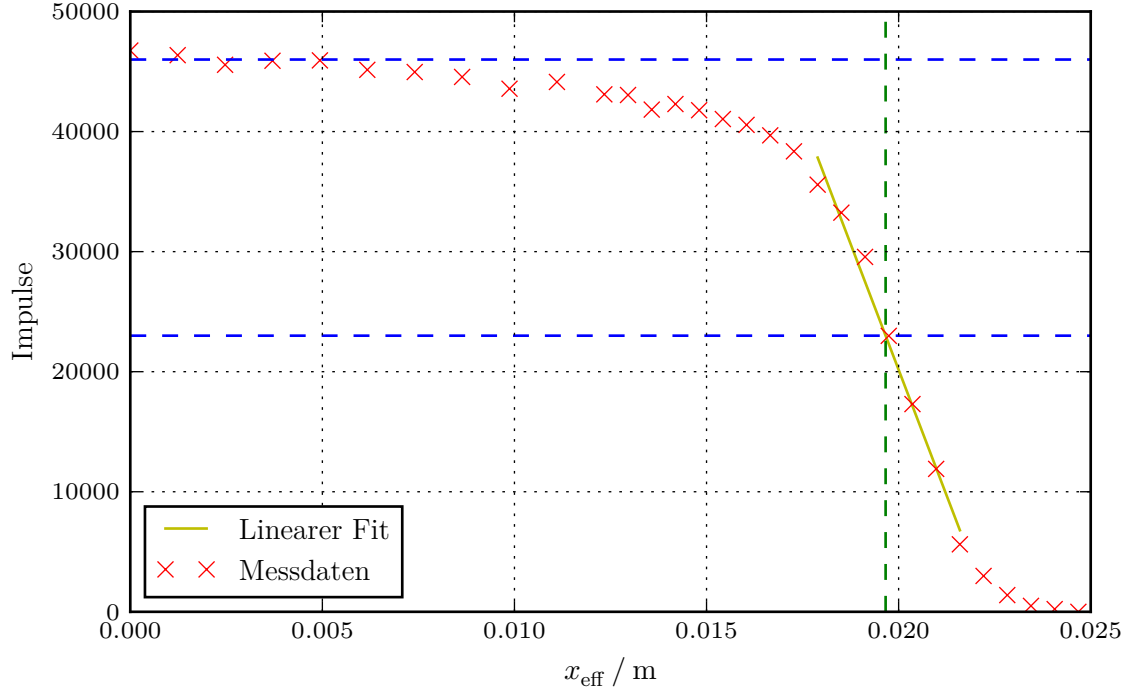
#### 4.1.1 Auswertung für $s = 2,5$ cm.

Nach der in der Durchführung beschriebenen Vorbereitung wird die erste Messung bei einem Abstand von  $s = 2,5$  cm durchgeführt, die Messintervalle betragen  $\Delta t = 120$  s. Die Drücke werden im Abstand  $\Delta p = 50$  mbar bzw. für Bereiche mit starken Änderungen der Zählrate im Abstand von  $\Delta p = 25$  mbar variiert und nach Formel (4) in effektive Längen umgerechnet. Diese Messwerte sind in Tabelle 1 einzusehen.

**Tabelle 1:** Messdaten, erster Teil.

$p$ / mbar	$x_{\text{eff}}$ / cm	Impulse	Channel
0	0,00	46750	1023
50	0,12	46364	1023
100	0,25	45563	943
150	0,37	45899	911
200	0,49	45929	864
250	0,62	45145	832
300	0,74	44961	819
350	0,86	44552	775
400	0,99	43570	775
450	1,11	44134	743
500	1,23	43101	719
525	1,30	43046	711
550	1,36	41831	687
575	1,42	42294	660
600	1,48	41779	652
625	1,54	41044	639
650	1,60	40559	591
675	1,67	39685	574
700	1,73	38353	527
725	1,79	35579	511
750	1,85	33246	511
775	1,91	29562	511
800	1,97	22986	406
825	2,04	17301	411
850	2,10	11904	408
875	2,16	5620	404
900	2,22	2988	410
925	2,28	1391	398
950	2,34	495	408
975	2,41	225	401
1000	2,47	0	0

Das Ergebnis der Zählrate in Abhängigkeit der effektiven Länge ist in Abbildung 2, das der mittleren Energie in Abhängigkeit der effektiven Länge in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 2:** Ergebnisse der Zählrate in Abhängigkeit der mittleren Reichweite für  $s = 2,5$  cm.

Zur graphischen Bestimmung der mittleren Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen wird die maximale Zählrate zu 46 500 Impulsen abgelesen, die Hälfte der Zählrate zu 23 000 Impulsen. Beide Werte sind als blaue horizontale Linien in der Abbildung angegeben. Werden die Werte um die Kante nun linear gefittet, ergibt sich, dass sich die Zählrate bei einer effektiven Länge von

$$x_{\text{mit}} = 1,97 \text{ cm}$$

halbiert hat. Wird die Energieskala als linear angenommen mit einer maximalen Energie von 4 MeV bei dem höchsten Channel von 1023, so entspricht  $x_{\text{mit}}$  einem Channel von 406 und somit einer Energie von

$$E_{\text{mit}} = 1,587 \text{ MeV.}$$

Die empirische Berechnung liefert nach Formel (3) eine mittlere Energie von

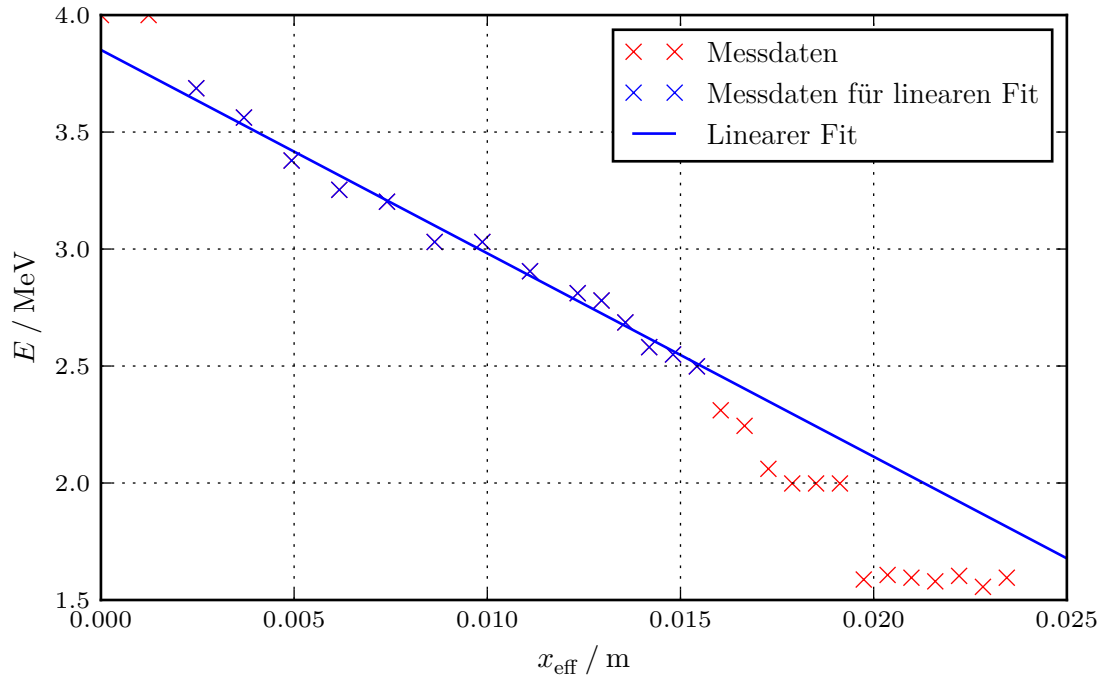
$$E_{\text{mit,emp}} = 3,43 \text{ MeV.}$$

Zur Bestimmung des Energieverlustes  $-\frac{dE}{dx}$  wird eine lineare Regression für die mittlere Energie in Abhängigkeit der effektiven Weglänge durchgeführt. Dabei werden die blau markierten Messwerte verwendet, welche sich für einen linearen Zusammenhang eignen. Der Fit wird mit SciPy in Python durchgeführt und ergibt die Parameter

$$\begin{aligned} m_1 &= (-87 \pm 3) \text{ MeV m}^{-1}, \\ b_1 &= (3,851 \pm 0,029) \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Hieraus lässt sich  $m_1$  als Energieverlust indentifizieren.





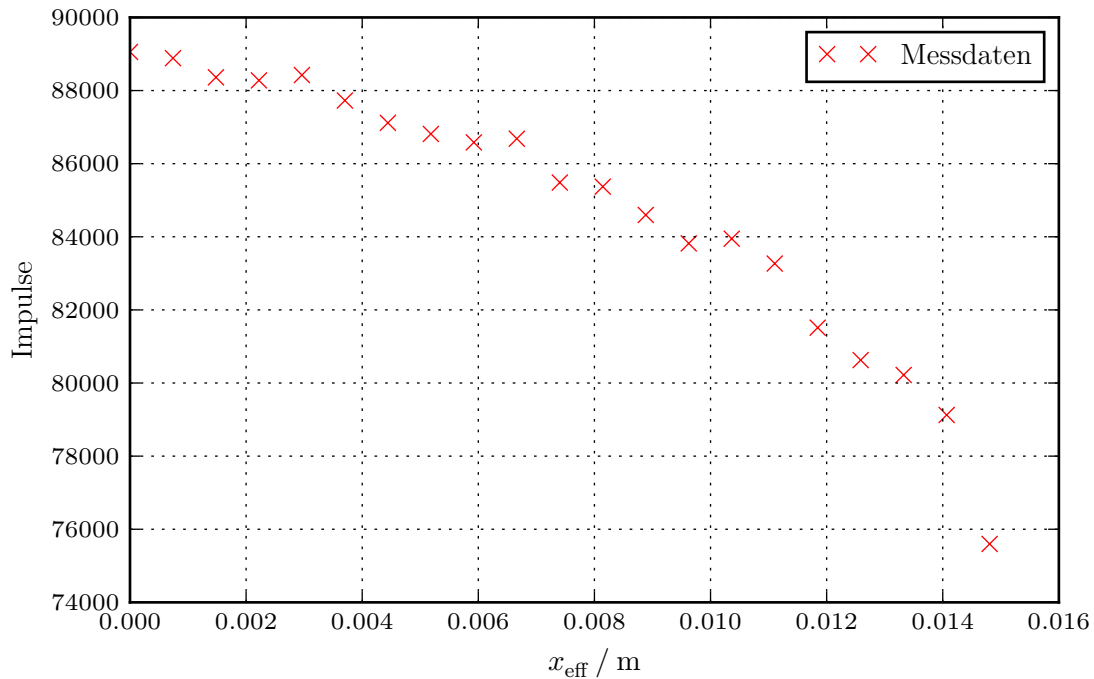
**Abbildung 3:** Ergebnisse der mittleren Energie in Abhängigkeit der mittleren Reichweite für  $s = 2,5$  cm.

**Tabelle 2:** Messdaten, zweiter Teil.

$p$ / mbar	$x_{\text{eff}}$ / cm	Impulse	Channel
0	0,00	89057	1023
50	0,07	88886	1023
100	0,15	88362	1023
150	0,22	88278	948
200	0,30	88424	972
250	0,37	87728	943
300	0,44	87117	896
350	0,52	86813	911
400	0,59	86582	859
450	0,67	86683	847
500	0,74	85484	839
550	0,81	85372	815
600	0,89	84597	792
650	0,96	83819	768
700	1,04	83948	736
750	1,11	83268	704
800	1,18	81514	687
850	1,26	80627	664
900	1,33	80220	652
950	1,41	79126	591
1000	1,48	75598	511

### 4.1.2 Auswertung für $s = 1,5$ cm.

Die zuvor beschriebene Messreihe wird analog für den Abstand  $s = 1,5$  cm durchgeführt. Die Messdaten sind in Tabelle 2 einzusehen. Es ergeben sich für die Zählrate in Abhängigkeit der effektiven Länge die in Abbildung 4 dargestellten Messwerte, für die mittlere Energie in Abhängigkeit der effektiven Länge die in Abbildung 5 dargestellten Messwerte.



**Abbildung 4:** Ergebnisse der Zählrate in Abhängigkeit der mittleren Reichweite für  $s = 1,5$  cm.

Aufgrund des zu geringen Abstandes vom Detektor zur Quelle halbiert sich im Bereich der Messreihe die Anzahl der Impulse nicht, so dass die mittlere Reichweite aus dieser Messreihe nicht bestimmt werden kann. Es kann lediglich die Aussage getroffen werden, dass die mittlere Reichweite größer als  $x_{\text{mit}} = 1,5$  cm ist.

Zur Berechnung des Energieverlustes werden die blau markierten Werte verwendet, welche auf einer Gerade liegen. Der lineare Fit mit SciPy ergibt die Parameter

$$m_2 = (-118 \pm 4) \text{ MeV m}^{-1},$$

$$b_2 = (4,105 \pm 0,031) \text{ MeV},$$

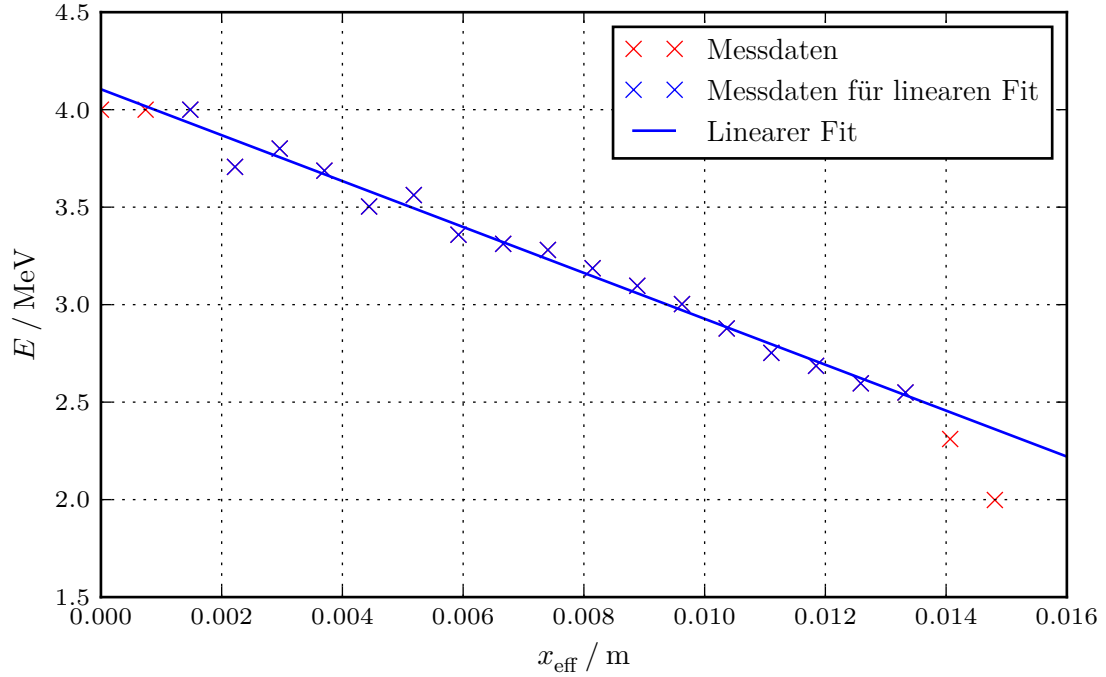
hier bezeichnet  $m_2$  ebenfalls den Energieverlust.

## 4.2 Statistische Auswertung der Zählraten

### 4.2.1 Vergleich mit Gaußverteilung

Für die statistische Auswertung werden für 100 Messeinheiten die Zählraten im Zeitintervall  $\Delta t = 10$  s gemessen. Der Abstand vom Detektor zur Quelle beträgt  $s = 1,5$  cm. Aus den Messwerten ergibt sich nach Formel (6) ein Mittelwert der Zählraten von

$$\mu = 10\,635,71$$



**Abbildung 5:** Ergebnisse der mittleren Energie in Abhängigkeit der mittleren Reichweite für  $s = 1,5 \text{ cm}$ .

sowie eine Standardabweichung von

$$\sigma = 411,86.$$

Zunächst wird mit diesen Werten eine Gaußverteilung um die Messwerte gelegt. Dazu wird die allgemeine Formel der Gaußverteilung

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (11)$$

verwendet. Zudem wird ein Histogramm mit 10 Bereichen erstellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt.

#### 4.2.2 Vergleich mit Poissonverteilung

Für die Poissonverteilung wird ebenfalls ein Histogramm mit 10 Bereichen erstellt. Die Poissonverteilung wird mithilfe von SciPy in Python erstellt. Sie lautet

$$p(x) = \exp(-\lambda) \sum_{k=0}^x \frac{\lambda^k}{k!}. \quad (12)$$

Es ergibt sich die in Abbildung 7 dargestellte Darstellung.

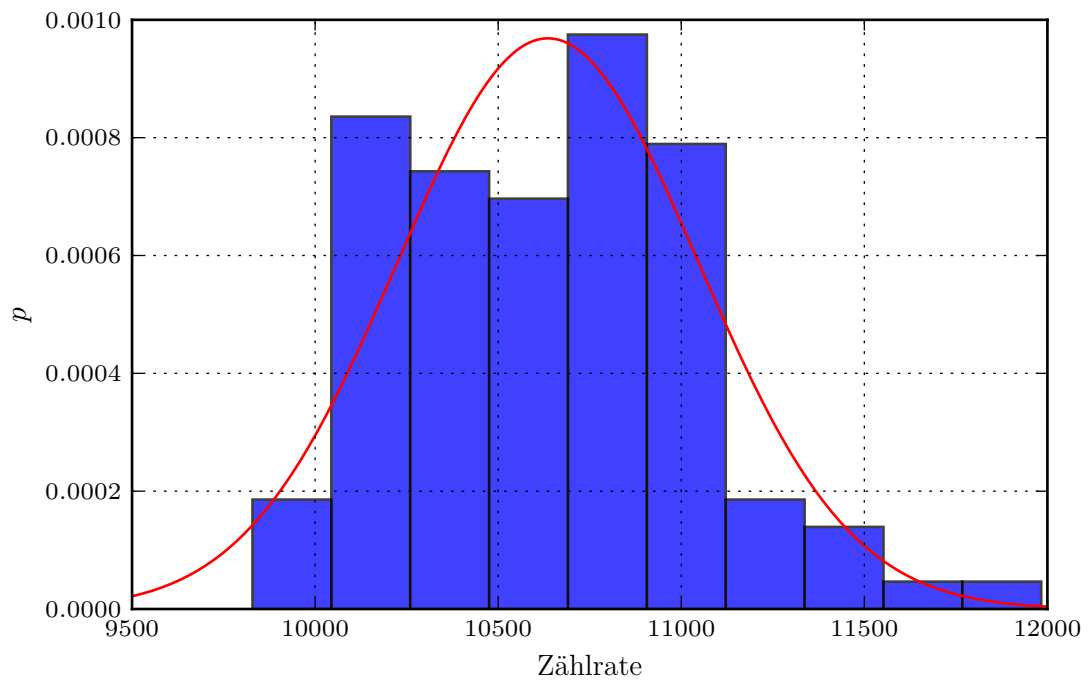


Abbildung 6: Gaußverteilung zu den Zählraten.

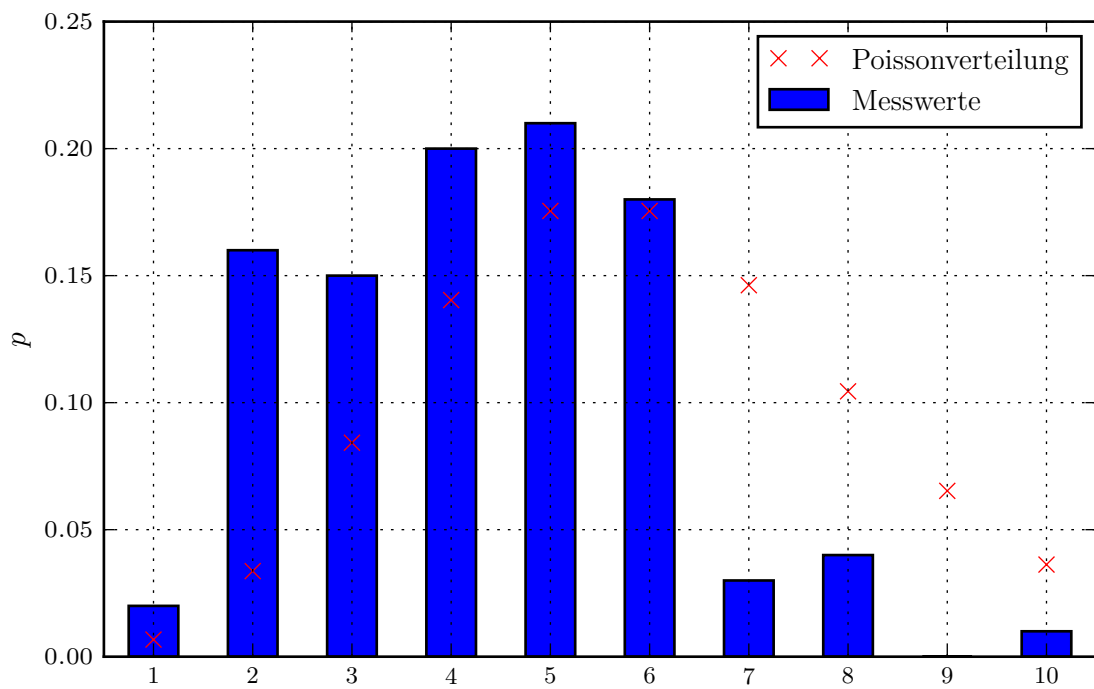


Abbildung 7: Poissonverteilung zu den Zählraten.

## 5 Diskussion

Die Messung der mittleren Reichweite von Alpha-Strahlung über die Impulse ergibt

$$x_{\text{mit}} = 1,97 \text{ cm.}$$

Daraus resultiert eine Energie von

$$E_{\text{mit}} = 1,587 \text{ MeV,}$$

welche die empirische Berechnung,

$$E_{\text{mit,emp}} = 3,43 \text{ MeV,}$$

nicht bestätigt. Auffällig ist, dass die mittlere Reichweite relativ gering ist, da nach Literaturwerten Alpha-Strahlung eine Reichweite von etwa 4 cm bis 7 cm besitzt. Die mittlere Reichweite sollte demnach im Bereich von 4 cm liegen. Der Energieverlust von

$$-\frac{dE}{dx} = (-87 \pm 3) \text{ MeV m}^{-1}.$$

bestätigt die gemessenen Reichweiten, da kein Teilchen über 2 cm hinaus geht.

Bei der zweiten Messung kann wegen des geringen Abstandes keine mittlere Reichweite bestimmt werden. Der Energieverlust beträgt hier aber

$$-\frac{dE}{dx} = (-118 \pm 4) \text{ MeV m}^{-1}.$$

Dies ist eine Abweichung von 35 % zur ersten Messung.

Die Zerfallsmessung übergibt eine Standardabweichung von

$$\sigma = 411,86.$$

Die Messung scheint sich weder gut einer Gauß- noch einer Poissonverteilung anzupassen. Da es sich hierbei um einen statistischen Prozess handeln sollte, kann es sein, dass über einen längeren Zeitraum hätte gemessen werden sollen.

## Literatur

- [1] *TU Dortmund - Fachbereich Physik : Anfängerpraktikum Anleitung zu Versuch Nr. 701.*  
<http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/Alpha.pdf>. Mai 2016.