

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele des Versuchs	2
2	Aufbau und Durchführung	2
3	Auswertung und Fehleranalyse	4
3.1	Bestimmung der Untergrundzählrate	4
3.2	Untersuchung der Abstandsabhängigkeit für einen Gammastrahler	4
3.3	Untersuchung der Abstandsabhängigkeit eines anderen Strahlers	10
4	Diskussion der Ergebnisse	15
4.1	Angabe und Diskussion der Endergebnisse	15
4.2	Diskussion der verwendeten Messmethoden	16
4.3	Verbesserte Messmethoden	17
A	Anhang	19
	Abbildungsverzeichnis	19
	Tabellenverzeichnis	19
	Literaturverzeichnis	20
A.1	Rohdaten und daraus berechnete Größen	21
A.2	Messprotokoll	23

1 Ziele des Versuchs

Ziel dieses Versuches ist es das Abstandsgesetz für Gammastrahlung zu überprüfen. Dafür wird zunächst die Zählrate der Untergrundstrahlung bestimmt. Anschließend wird die Abstandsabhängigkeit eines Gammastrahlers in einer Messreihe untersucht und mit den theoretischen Erwartungen nach dem Abstandsgesetz verglichen. Durch die abschließende Untersuchung der Abstandsabhängigkeit eines anderen, zweiten Strahlers und deren Vergleich mit der Theorie, können eventuelle Unterschiede diskutiert werden.

2 Aufbau und Durchführung

hier Skizze

Zur Strahlungsmessung stand ein Dosisleistungsmessgerät (Typ SEI Radiation Alert Ranger) zur Verfügung, welches die Messung mit Hilfe eines Geiger-Müller-Zählrohrs durchführt. Zudem waren ein Maßband zur Abstandsmessung und zwei radioaktive Präparate gegeben. Bei diesen handelte es sich um eine Cäsium-137 und eine Radium-226 Probe. ✓

Um eine aussagekräftige Messung der Strahlung der beiden Präparate durchführen zu können, musste zunächst die Untergrundstrahlung bestimmt werden. Hierfür wurde das Dosisleistungsmessgerät auf den Tisch, auf dem die Messung stattfand, gelegt und über einen längeren Zeitraum von $600\text{ s} = 10\text{ min}$ die Anzahl n der Counts gemessen. Über den Zusammenhang ✓

$$R = \frac{n}{t}, \quad \sigma(R)? \quad (1)$$

lässt sich daraus die Untergrundzählrate R_U bestimmen.

Für diese und alle nachfolgenden Messungen, wurde die Kappe des Messgeräts nicht abgenommen, also mit verschlossenem Messgerät gemessen. Somit konnte nach [1] nur β - und γ -Strahlung gemessen werden. Inwiefern diese Vorgehensweise Auswirkungen auf die Messergebnisse haben könnte, wird im Verlauf des Protokolls diskutiert. ✓

Im Anschluss wurde die Strahlungsleistung einer Cäsium-137 Probe für verschiedene Abstände untersucht. Dieses zerfällt nach [2] zunächst über einen β^- -Zerfall in einen angeregten Zustand von Barium-137m, welches anschließend über einen γ -Zerfall in das stabile Barium-137 zerfällt. ✓

Für diese Probe sollten also ein β^- -Zerfall und ein γ -Zerfall nachweisbar sein, wobei vor allem der γ -Zerfall am Messgerät nachgewiesen wird, da die emittierten Photonen deutlich höhere Energien haben. *also? | Abstandsabh.* ✓ *f*

Um die Strahlungsleistung für verschiedene Abstände von Probe und Zählrohr qualitativ zu untersuchen, wurde die Probe wie in [Abbildung 1](#) vor das Messgerät gelegt und für verschiedene Abstände x die Anzahl der Ereignisse innerhalb von 60 s gemessen. *Warum 60s?*

Zur Abstandsmessung, wurde das Maßband am vorderen Ende des Messgeräts angelegt und der Abstand zur Probe daran abgelesen. Schon hierbei fiel auf, dass sich die Probe leicht innerhalb der Isolierung befand und auch das Geiger-Müller-Zählrohr des Messgeräts nicht direkt an der Vorderkante des Messgeräts beginnt. Hier wäre somit ein eventuelles Offset, also ein systematischer Fehler zu erwarten.

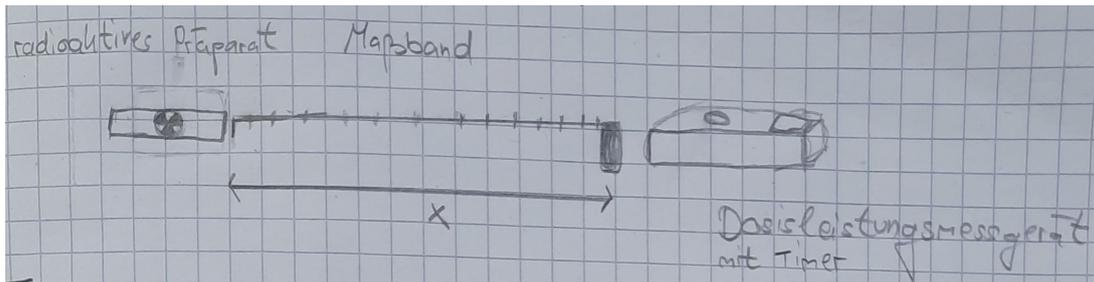


Abbildung 1: Versuchsaufbau für die Messungen mit Präparat. Das Dosisleistungsmessgerät wurde mit geschlossenem Deckel verwendet, der Abstand vom Ende des Messgeräts bis zur Probe wurde mit dem Maßband gemessen.

Indem der Abstand x im Bereich von 1 cm bis 24 cm in 1 cm-Schritten variiert wurde, konnte die gemessene Anzahl der Ereignisse n für verschiedene Abstände untersucht werden. Hierbei wird aus dem Abstandsgesetz nach [3] ein Zusammenhang

$$R = \frac{\text{const.}}{r^2} \quad (2)$$

erwartet, wobei R die berechnete Zählrate ist und r der Radius einer gedachten Kugel um die Quelle, auf deren Oberfläche sich das Messgerät befindet. Dieser entspricht hier in guter Näherung dem Abstand x .

bis auf das Offset s.o.

Im Anschluss, wurde die selbe Messung noch für einen weiteren Strahler durchgeführt. In diesem Fall handelte es sich um Radium-226. Dieses zerfällt nach [4] über einen α -Zerfall in Radon-222, welches im Anschluss γ -Strahlung aussendet. Die Probe befand sich in einem Glas. Da α -Strahlung sehr leicht abgeschirmt werden kann, ist hier nicht auszuschließen, dass auch schon das Glas eine abschirmende Wirkung hatte. Auf diese wird in der Diskussion genauer eingegangen.

Ihr hättet ohne Glas messen sollen...

Im Gegensatz zur ersten Messung mit Präparat, wurde die Messung hierbei so durchgeführt, dass nicht über einen gleichbleibenden Zeitraum gemessen wurde, sondern immer die Zeit notiert wurde bis das Messgerät 100 Ereignisse anzeigte. Dies hat den Vorteil, dass die statistischen Unsicherheiten $\Delta x_{\text{stat.}}$ für alle Messungen gleich bleiben und nicht für große Werte zunehmen.

Abermals wurden die Messungen für verschiedene Abstände von 2,5 cm bis 18,5 cm durchgeführt, die dabei für jede Messung in 1 cm-Schritten variiert wurden. Der neue minimale Abstand resultiert daraus, dass sich das Präparat in einem Glas befand, und damit einen gewissen Abstand zum Glasboden aufwies, der somit nicht unterschritten werden konnte. Der Abstand x wurde dennoch direkt von der Probe bis zum Messgerät abgeschätzt.

✓

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Bestimmung der Untergrundzählrate

Vor der Untersuchung der Zählraten verschiedener Strahler wird im ersten Versuchsteil zunächst die Untergrundzählrate bestimmt, um später die Strahlungsaktivität der Präparate entsprechend korrigieren zu können. Hierfür wurde eine lange Messung in einem Zeitraum von $t = 600 \text{ s} = 10 \text{ min}$ ohne Präparat zur Zählung der von der Untergrundstrahlung stammenden Ereignisse n_u durchgeführt. Die Zeit, die am Dosisleistungsmessgerät eingestellt und gemessen wird, wird hierbei als exakt angenommen.

Die statistische Unsicherheit der gezählten Ereignisse wird durch $\Delta n_{\text{stat}} = \sqrt{n}$ abgeschätzt. Zudem liegt nach der Gebrauchsanweisung des Messgeräts (siehe [1]) für diese und alle folgenden Messungen eine systematische Unsicherheit von $\Delta n_{\text{syst.}} = 15\%$ vor. ✓

Die Anzahl der gemessenen Ereignisse im Zeitraum t ergibt sich damit zu

$$n_u = (570 \pm (90 \text{ syst.} + 20 \text{ stat.})) .$$

Die Untergrundzählrate R_u ergibt sich aus den gemessenen Ereignissen dann mit [Gleichung \(1\)](#). Sowohl die statistische als auch die systematische Unsicherheit berechnet sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung bei einer als exakt angenommenen Zeit t über

$$\Delta R_u = \frac{1}{t} \Delta n_u . \quad \checkmark \quad (3)$$

Damit lässt sich die Untergrundzählrate bestimmen zu

$$R_u = (0,95 \pm (0,14 \text{ syst.} + 0,04 \text{ stat.})) \text{ cps} . \quad \checkmark$$

3.2 Untersuchung der Abstandsabhängigkeit für einen Gammastrahler

Im zweiten Versuchsteil stand als Gammastrahler ein Präparat von Cäsium-137 zur Verfügung. Zur Untersuchung der Abstandsabhängigkeit der Zählrate wurde in einer Messreihe von 24 Messungen der Abstand des Präparats vom Messgerät jeweils in 1 cm-Schritten variiert. Der Abstand wurde mit einem Maßband gemessen. Die Unsicherheit der Abstände wird aufgrund von Anlege- und Ableseunsicherheiten auf $\Delta x = 3 \text{ mm}$ geschätzt. Es wurden dabei die Ereignisse n_{Cs} in einem Abstandsbereich von $x = 1 \text{ cm}$ bis 24 cm für einen Zeitraum von jeweils $t = 60 \text{ s}$ gemessen, welcher wiederholt als exakt angenommen wird. Die Messwerte sind [Abbildung 10](#) zu entnehmen. offset?

Analog zu [Gleichung \(1\)](#) und [Gleichung \(3\)](#) lassen sich aus den Messwerten die Zählraten R_p mitsamt den statistischen und systematischen Unsicherheiten berechnen. Diese sind [Tabelle 1](#) zu entnehmen.

Die durch die Untergrundstrahlung verursachten Ereignisse werden bei der Messung ebenfalls vom Zähler registriert und führen daher zu höheren Zählraten R_p . Mit Hilfe der im ersten Versuchsteil bestimmten Untergrundzählrate kann dies in der Messung berücksichtigt werden. Die korrigierten Zählraten R_{Cs} für das Cäsium-Präparat ergeben sich dann über ✓

$$R_{\text{Cs}} = R_p - R_u . \quad (4)$$

Mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung lassen sich statistische und systematische Unsicherheiten dabei berechnen durch

$$\Delta R_{Cs} = \sqrt{(\Delta R_p)^2 + (-\Delta R_u)^2} , \quad \checkmark \quad (5)$$

wobei für die Berechnung des statistischen bzw. systematischen Fehlers jeweils die einzelnen statistischen oder systematischen Beiträge der verschiedenen Unsicherheiten verwendet werden müssen. Die Zählraten R_{Cs} sind ebenfalls [Tabelle 1](#) zu entnehmen. Trägt man die so erhaltenen Zählraten R_{Cs} gegen die Abstände x auf, so ergibt sich bei linearer Skala der in [Abbildung 2](#) sichtbare Verlauf.

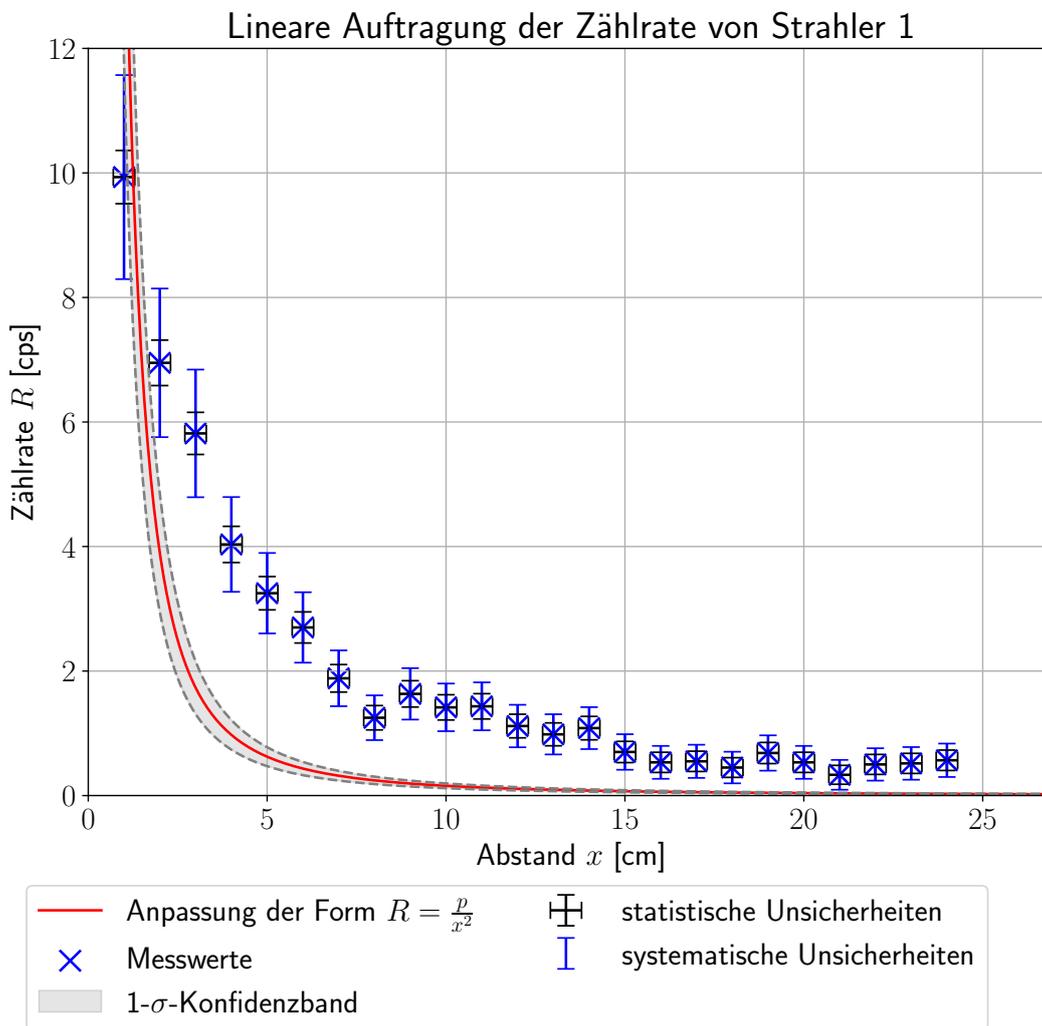


Abbildung 2: Sichtbar sind die berechneten Zählraten R_{Cs} des Cäsium-137 Präparats aufgetragen gegen die Abstände x des Präparats vom Dosimeter bei linearer Skalierung. Es sind außerdem die statistischen und systematischen Fehler eingetragen. Des Weiteren ist die durch gewichtete lineare Regression erhaltene Anpassung der Form $R(x) = p/x^2$ aus [Gleichung \(6\)](#) mitsamt des 1- σ -Konfidenzbandes dargestellt.

untergrund bereinigt?

! es ist nicht klar, welche Unsicherheit für die Parameteroptimierung verwendet wird!

Um die Messergebnisse mit dem theoretisch erwarteten Abstandsgesetz nach Gleichung (2) vergleichen zu können, wird eine Anpassung der Form $R(x) = p_{Cs}/x^2$ mit dem Parameter p_{Cs} anhand der in [5] auf Seite 13 gegebenen Formeln für die gewichtete lineare Regression durchgeführt. Es ergibt sich dadurch als Bestwert des Parameters p_{Cs} die Anpassung

$$R(x) = \frac{\hat{p}_{Cs}}{x^2} \quad \text{mit} \quad \hat{p}_{Cs} = (1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad \checkmark \quad (6)$$

χ^2 -Minimierung für den Parameter p

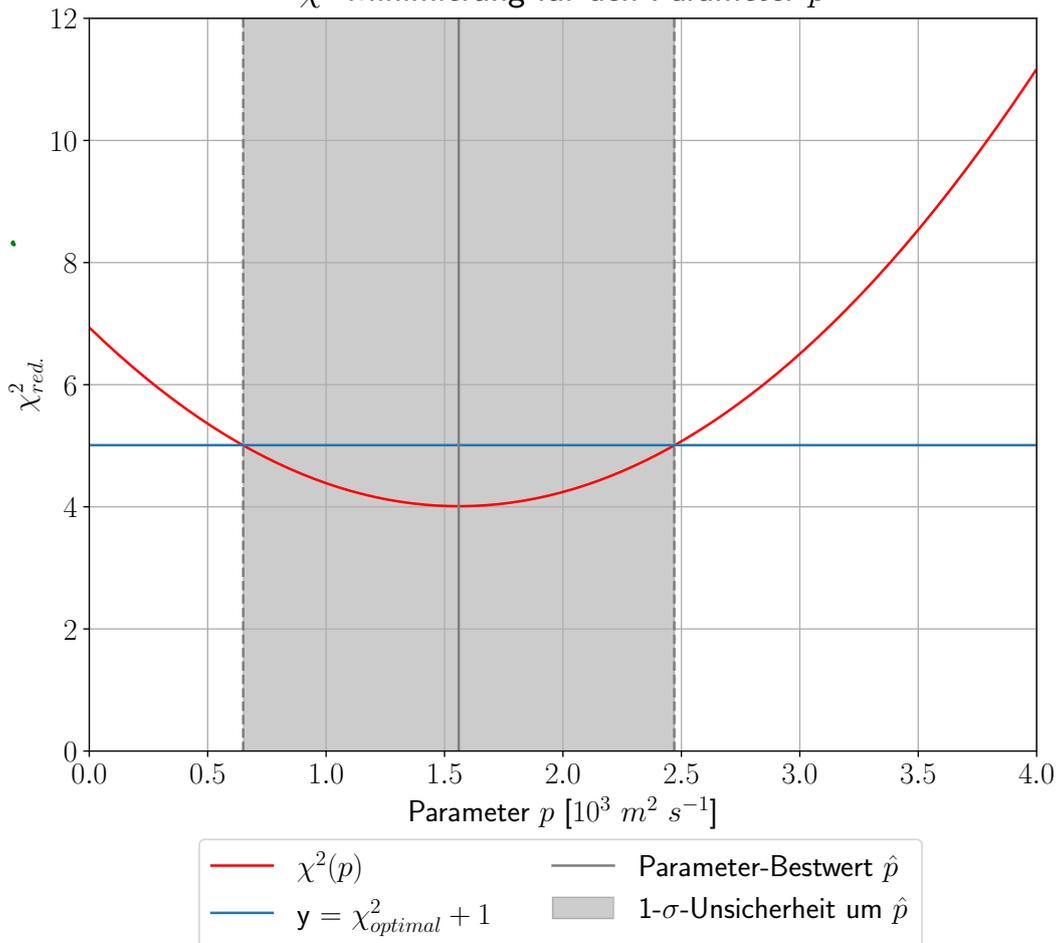


Abbildung 3: Dargestellt sind die Werte $\chi^2_{\nu, Cs}$, die sich für einen reduzierten χ^2 -Test zwischen den Messwerten der Zählraten R_{Cs} und der Anpassung nach Gleichung (6) für verschiedene Parameter p_{Cs} ergeben. Es ist ein Minimum bei dem ebenfalls analytisch erhaltenen Bestwert $\hat{p}_{Cs} = 1,560 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ zu erkennen. Außerdem sichtbar ist der grafisch bestimmte 1- σ -Bereich der Unsicherheit von \hat{p}_{Cs} , welcher sich nach [5] aus den Schnittpunkten von χ^2_{ν} mit der Horizontalen bei $y = \chi^2_{optimal} + 1$ ergibt.

$\chi^2_{optimal} \neq \chi^2_{red}$!

Um die Anpassungsgüte der oben berechneten Anpassung $R(x)$ in Abhängigkeit des Parameterwerts p_{Cs} genauer zu untersuchen und den Parameter \hat{p}_{Cs} graphisch zu bestimmen, wurde in Abbildung 3 das reduzierte χ^2_{ν} gegen p_{Cs} aufgetragen. Es ist ein Minimum bei dem ebenfalls oben analytisch erhaltenen Bestwert von ungefähr $\hat{p}_{Cs} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ zu erkennen, es handelt sich also hierbei um die bestmögliche erreichbare Anpassung der Form $R(x) = p_{Cs}/x^2$.

Ein reduzierter χ^2 -Test ergibt für diesen Parameter die Anpassungsgüte

$$\chi_{\nu, Cs}^2 = 4 .$$

Außerdem wurde in [Abbildung 3](#) grafisch der Bereich der $1\text{-}\sigma$ -Unsicherheit des Parameterbestwerts \hat{p} durch die Schnittpunkte von $y = \chi_{\text{optimal}}^2 + 1$ mit dem Verlauf der Anpassungsgüte bestimmt. Hierbei ergibt sich die etwas größere Unsicherheit $\Delta\hat{p} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Die graphische Anpassung nach [Gleichung \(6\)](#) ist ebenfalls in [Abbildung 2](#) sichtbar. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte aufgrund der steilen Steigung der Anpassung nur bedingt durch diese beschrieben werden. Dies wird ebenfalls durch den reduzierten χ^2 -Test bestätigt, da hier ein Wert von $\chi_{\nu, Cs}^2 \leq 1$ auf eine gute Verträglichkeit hinweist. Da in diesem Fall jedoch $\chi_{\nu, Cs}^2 = 4$ ist, sind die Messwerte nicht gut mit dem nach dem Abstandsgesetz erwarteten theoretischen Verlauf verträglich.

Betrachtet man [Abbildung 2](#), so ist aufgrund der Messergebnisse eine Verschiebung des Verlaufs in positive x -Richtung zu vermuten. Ein systematischer Fehler in der Abstandsmessung könnte hierfür die Ursache sein. Dieser könnte aufgrund der Messung des Abstands vom unteren Teil des Messgeräts und nicht direkt von der Zählrohroberfläche, sowie davon, dass das Präparat nicht direkt an der Oberfläche der Probe platziert waren, stammen.

Um dies zu untersuchen, wurde eine zweite gewichtete Anpassung durchgeführt, die dieses mögliche Offset mitberücksichtigt. Es ergibt sich

$$R(x) = \frac{p}{(x + a)^2} \quad (7)$$

mit

$$p = (27 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (7a)$$

$$a = (4,2 \pm 0,3) \text{ cm} \quad (7b)$$

Diese Anpassung ist mitsamt den Messwerten für R_{Cs} in [Abbildung 4](#) sichtbar.

Ein reduzierter χ^2 -Test ergibt für diese Anpassung als Anpassungsgüte

$$\chi_{\nu, Cs2}^2 = 0,13 .$$

Es ist daher zu erkennen, dass diese Anpassung deutlich verträglicher mit den Messwerten ist, was stark für das vermutete Offset in der Abstandsmessung spricht. Nur unter Berücksichtigung dieser Verschiebung der Messwerte bestätigen diese den erwarteten Verlauf des Abstandsgesetzes. Somit ist also von einem zusätzlichen, unberücksichtigten Offset von $1 = (4,2 \pm 0,3) \text{ cm}$ zwischen den tatsächlichen Positionen von Probe und Messgerät auszugehen.

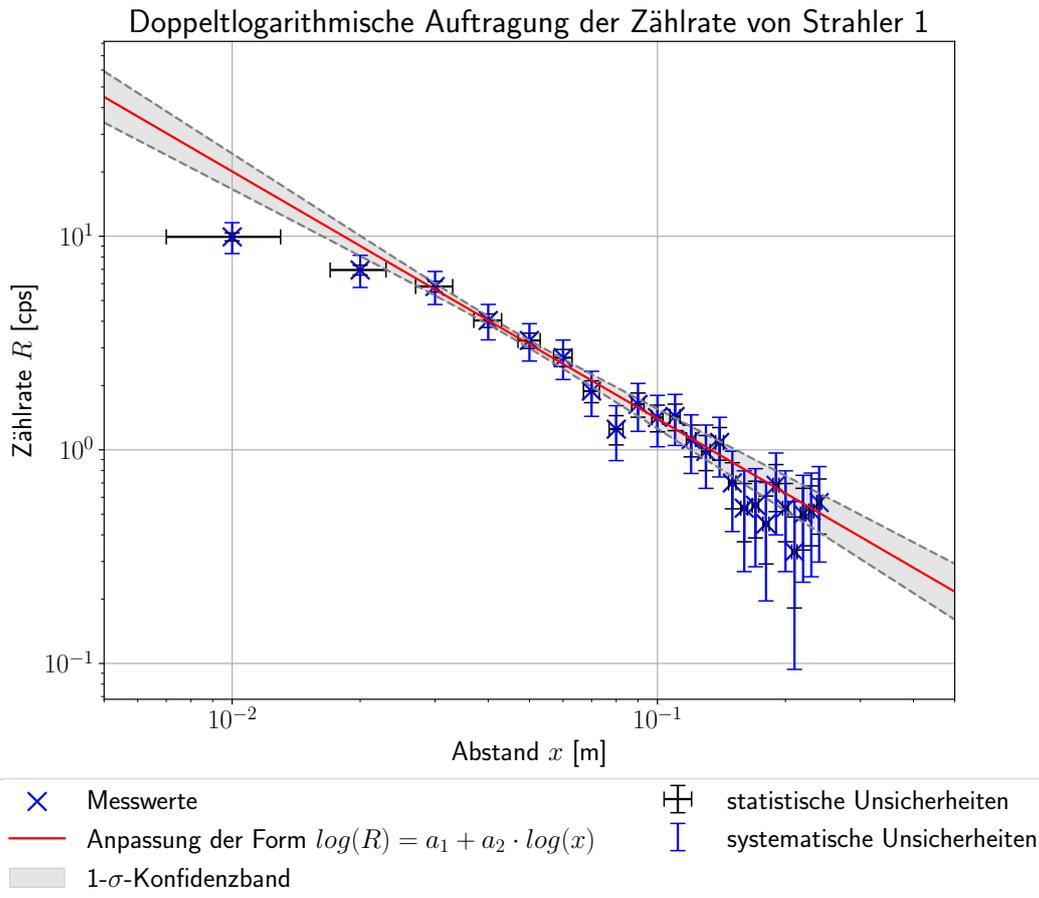


Abbildung 5: Sichtbar sind die berechneten Zählraten R_{Cs} des Cäsium 137 Präparats aufgetragen gegen die Abstände x des Präparats vom Dosimeter bei doppel-logarithmischer Skalierung. Es sind außerdem die aufgrund der Skalierung asymmetrischen statistischen und systematischen Fehler sichtbar. Des Weiteren ist die durch gewichtete lineare Regression erhaltene Anpassung der Form $\log_{10}(R(x)) = P + M \cdot \log_{10}(x)$ aus Gleichung (9) mitsamt Konfidenzband dargestellt. ✓

Es ergibt sich der durch gewichtete lineare Regression berechnete Zusammenhang

$$\log_{10}(R(x)) = P + M \cdot \log_{10}(x) \tag{9}$$

mit

*auch hier Methode unklar! **

$$P = (-1,01 \pm 0,17) \text{ cps} \tag{9a}$$

$$M = (-1,16 \pm 0,12) \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1} . \tag{9b}$$

Dieser Verlauf der Anpassung ist ebenfalls in [Abbildung 5](#) sichtbar. Ein reduzierter χ^2 -Test ergibt für die Anpassungsgüte

$$\chi^2_{\nu} = 0,15 . \tag{10}$$

plot?

Diese Anpassung scheint also sehr gut innerhalb der berechneten Unsicherheiten mit den Messwerten übereinzustimmen.

** das ist insbesondere bei der Fehlerfortpflanzung wichtig*

Nach [Gleichung \(8\)](#) wäre bei einer Übereinstimmung des Abstandsgesetzes mit den Messwerten $P = \log_{10}(\hat{p}_{Cs}) = -2,81$ und $M = -2$ zu erwarten gewesen. Es fällt auf, dass diese Werte von den aus der Anpassung bei logarithmischer Auftragung erhaltenen Werten abweichen. Dies weist darauf hin, dass die oben berechnete Ausgleichsgerade im Rahmen des χ^2 -Tests zwar mit den Messwerten verträglich ist, jedoch die theoretischen Erwartungen des Abstandsgesetzes mit dem zuvor berechneten Parameterbestwert \hat{p}_{Cs} wiederholt von den Messwerten abweichen. Dies zeigt nochmals, dass das Abstandsgesetz ohne Berücksichtigung des systematischen Fehlers der Abstandsmessung nicht durch die Messwerte bestätigt werden kann. ✓

3.3 Untersuchung der Abstandsabhängigkeit eines anderen Strahlers

Im dritten Versuchsteil stand ein weiterer Strahler, Radium-226, zur Untersuchung der Abstandsabhängigkeit zur Verfügung. Wiederum wurde hier eine Messreihe mit 17 Messungen der Ereignisse n für verschiedene Abstände x , dieses Mal im Bereich von 2,5 cm bis 18,5 cm, durchgeführt. Um bei jeder Messung die statistische Unsicherheit der Ereignisse n , die sich, wie im ersten Teil beschrieben, berechnet, konstant zu halten, wurde hier jedoch stets die Zeit t gemessen, bei der $n = 100$ counts gezählt wurden. Die statistische Unsicherheit ergibt sich damit zu konstanten $\Delta n_{stat.} = 10$. 10% rel. Unsicherheit ...

Die jeweiligen Messwerte sind [Abbildung 10](#) zu entnehmen. Da hier die Zeit abgelesen und nicht fest eingestellt werden konnte, wird nun eine Unsicherheit von $\Delta t = 1$ s geschätzt. Die entsprechend gemessenen Zählraten R_{p2} und deren Unsicherheiten lassen sich wieder analog zu [Gleichung \(1\)](#) und [Gleichung \(3\)](#) berechnen. Wiederholt ist die Untergrundstrahlung zu berücksichtigen, deren Ereignisse bei der Messung ebenfalls mitgezählt werden. Die Zählraten R_{Ra} des Radium-Präparats müssen daher analog zu [Gleichung \(4\)](#) berechnet werden, wobei sich die Unsicherheiten durch [Gleichung \(5\)](#) ergeben. Die direkt aus den Messwerten erhaltenen Zählraten R_{p2} mitsamt ihrer Unsicherheiten sowie die korrigierten Zählraten des Radium R_{Ra} mitsamt den statistischen und systematischen Unsicherheiten sind [Tabelle 2](#) zu entnehmen. In [Abbildung 6](#) sind die entsprechenden Zählraten R_{Ra} gegen die verschiedenen Abstände x aufgetragen.

Erneut wird zur Überprüfung des Abstandsgesetzes eine Anpassung der Form $R(x) = p_{Ra}/x^2$ durch gewichtete lineare Regression durchgeführt. Es ergibt sich als Anpassung mit dem Bestwert \hat{p}_{Ra} des Parameters

$$R(x) = \frac{\hat{p}_{Ra}}{x^2} \quad \text{mit} \quad \hat{p}_{Ra} = (1,20 \pm 0,14) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} . \quad (11)$$

Diese ist ebenfalls in [Abbildung 6](#) sichtbar. 1.o.

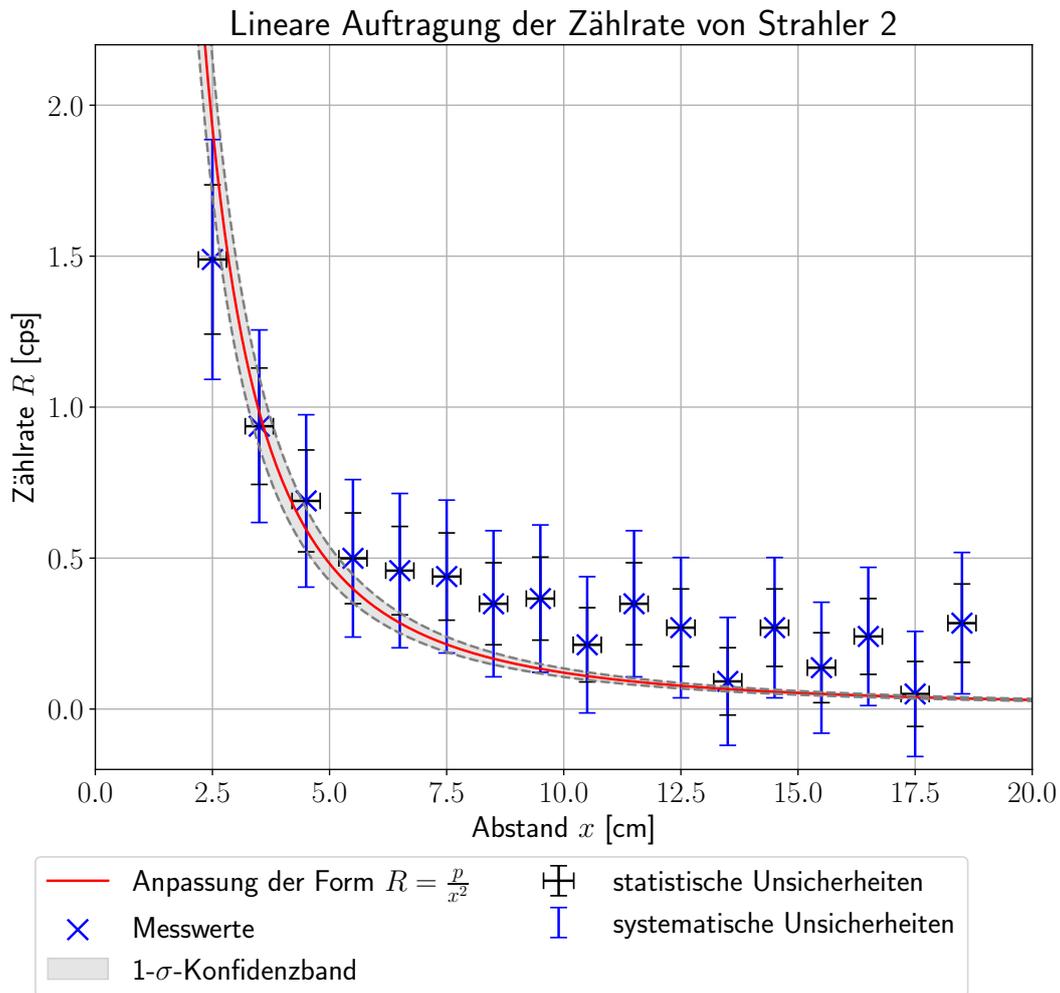


Abbildung 6: Sichtbar sind die berechneten Zählraten R_{Ra} des Radium-226 Präparats aufgetragen gegen die Abstände x des Präparats vom Dosimeter bei linearer Skalierung. Es sind außerdem die statistischen und systematischen Fehler sichtbar. Des Weiteren ist die durch gewichtete lineare Regression erhaltene Anpassung der Form $R(x) = p_{\text{Ra}}/x^2$ aus Gleichung (11) mitsamt Konfidenzband dargestellt.

Um die Anpassungsgüte dieses Zusammenhangs genauer zu untersuchen, ist in [Abbildung 7](#) wieder χ^2_ν eines reduzierten χ^2 -Tests gegen den Parameter p aufgetragen. 1.0.

Auch hier ist ein Minimum beim Bestwert $\hat{p}_{\text{Ra}} = 1,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ zu erkennen. Eine grafische Bestimmung des Bereichs der $1\text{-}\sigma$ -Unsicherheit des Parameters \hat{p}_{Ra} ergibt hier die größere Unsicherheit $\Delta\hat{p}_{\text{Ra}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Der Bestwert für $\chi^2_{\nu, \text{Ra}}$ ergibt sich durch den reduzierten χ^2 -Test zu

$$\chi^2_{\nu, \text{Ra}} = 0,2 .$$

Erneut ist anhand dieses Wertes sowie des Verlaufs in [Abbildung 6](#) zu erkennen, dass die Messwerte verträglich mit der Anpassung sind, anders als im Falle des Cäsium-Präparats. ✓

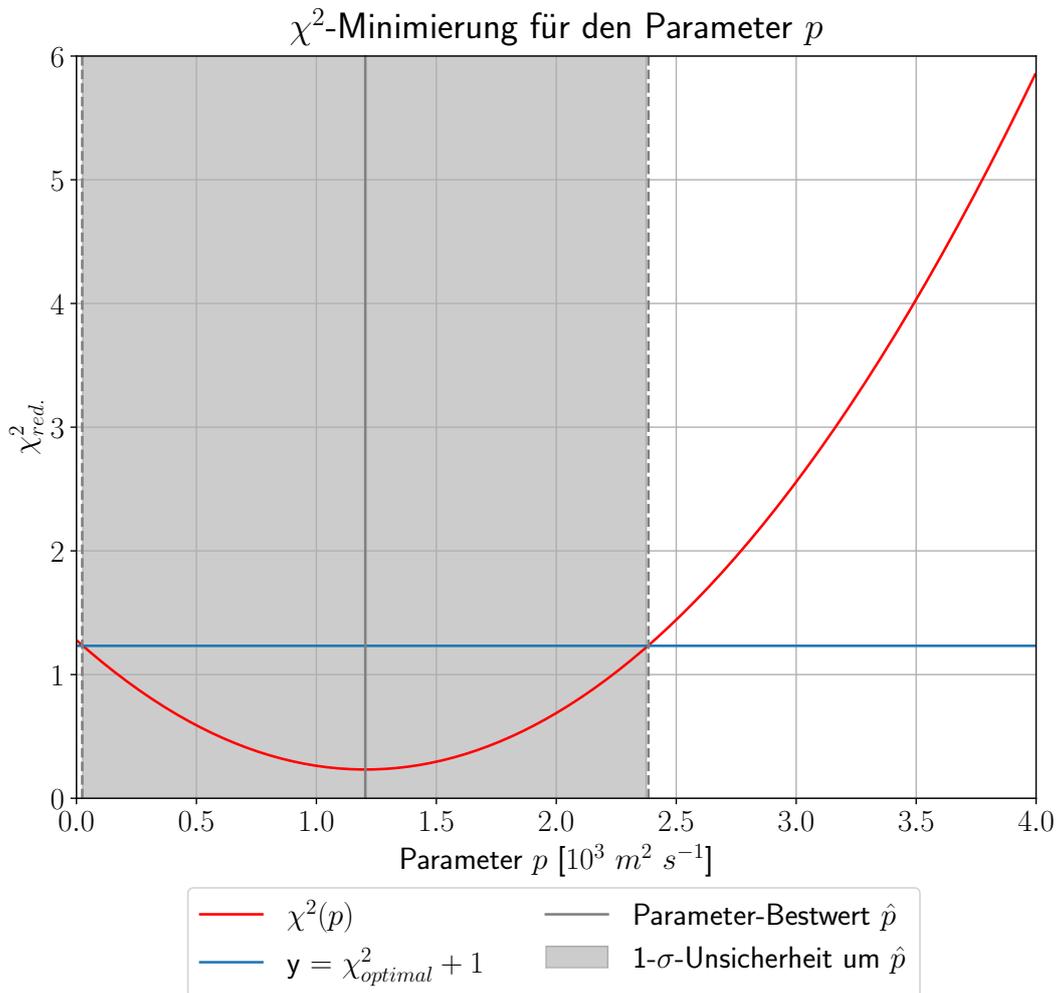


Abbildung 7: Dargestellt sind die Werte $\chi^2_{\nu, Ra}$, die sich für einen reduzierten χ^2 -Test zwischen den Messwerten der Zählraten R_{Ra} und der Anpassung nach Gleichung (6) für verschiedene Parameter p_{Ra} ergeben. Es ist ein Minimum bei dem ebenfalls analytisch erhaltenen Bestwert $\hat{p}_{Ra} = 1,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ zu erkennen. Außerdem sichtbar ist der grafisch bestimmte 1- σ -Bereich der Unsicherheit von \hat{p}_{Ra} .

Um dennoch zu überprüfen, ob auch hier eine Verschiebung der Messwerte in x -Richtung vorliegt, was wiederholt auf den vermuteten systematischen Fehler in der Abstandsmessung hinweisen sollte, wird daher wieder eine Anpassung der Form $R(x) = p/(x - a)^2$ durchgeführt und überprüft, ob diese den Verlauf der Messwerte besser beschreibt. Es ergibt sich

$$R(x) = \frac{p_2}{(x + a_2)^2} \tag{12}$$

mit

N.O.

$$p_2 = (5,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \tag{12a}$$

$$a_2 = (4,1 \pm 0,9) \text{ cm} \tag{12b}$$

In [Abbildung 8](#) ist diese Anpassung mitsamt den Messwerten für R_{Ra} sichtbar.

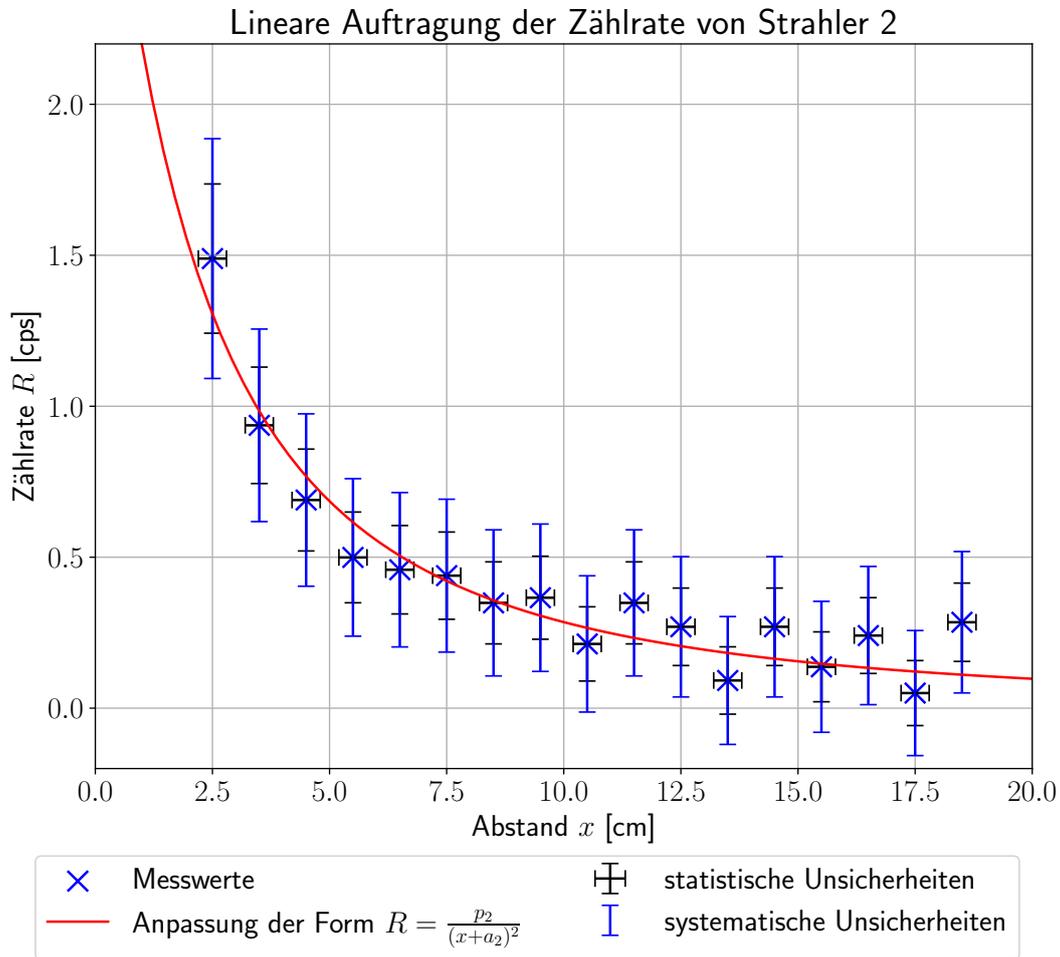


Abbildung 8: Sichtbar sind die berechneten Zählraten R_{Ra} des Radium-226 Präparats aufgetragen gegen die Abstände x des Präparats vom Dosimeter mitsamt statistischer und systematischer Unsicherheiten bei linearer Skalierung. Des Weiteren ist die Anpassung der Form $R(x) = p/(x - a)^2$ aus [Gleichung \(12\)](#) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese Anpassung, welche eine systematische Verschiebung der Abstandsmessung x berücksichtigt, den Verlauf der Messwerte ebenfalls beim Radium-Präparat deutlich besser beschreibt, als die Anpassung in [Gleichung \(11\)](#). ✓

Ein reduzierter χ^2 -Test liefert hier

$$\chi^2_{\nu, \text{Ra}} = 0,06 .$$

plot?

Auch hier sind die Messwerte also besser verträglich mit dieser Anpassung, was wiederholt auf die systematische Abweichung der Abstandsmessung hinweist.

Eine doppel-logarithmische Skalierung liefert in diesem Fall den in [Abbildung 9](#) sichtbaren Verlauf. Hier sind wiederum die durch Auftragung der absoluten Fehler der Messgrößen erhaltenen asymmetrischen Fehlerbalken sichtbar. ✓

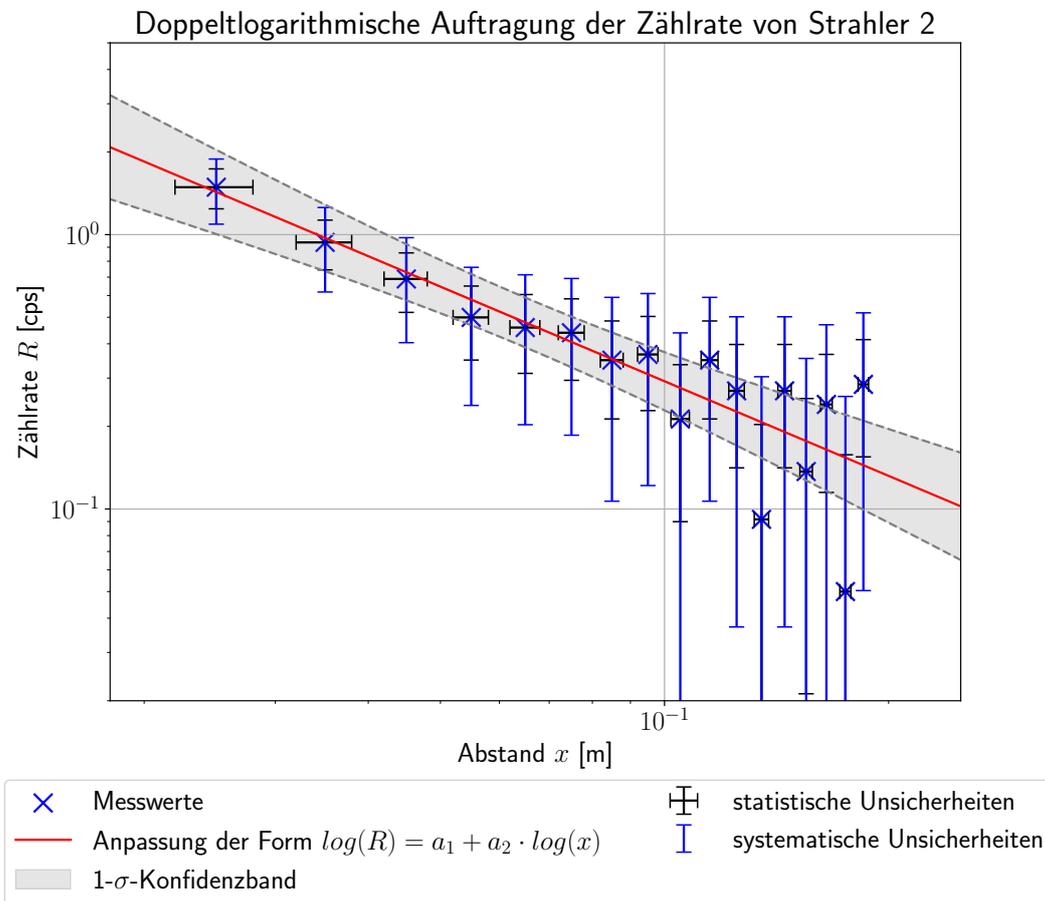


Abbildung 9: Sichtbar sind die berechneten Zählraten R_{Ra} des Radium-226 Präparats aufgetragen gegen die Abstände x des Präparats vom Dosimeter bei doppel-logarithmischer Skalierung. Es sind außerdem die aufgrund der Skalierung asymmetrischen statistischen und systematischen Fehler sichtbar. Des Weiteren ist die durch gewichtete lineare Regression erhaltene Anpassung der Form $\log_{10}(R(x)) = P_2 + M_2 \cdot \log_{10}(x)$ aus [Gleichung \(13\)](#) mitsamt Konfidenzband dargestellt.

Eine Anpassung wie in [Gleichung \(9\)](#) durch gewichtete lineare Regression ergibt hier den Zusammenhang

$$\log_{10}(R(x)) = P_2 + M_2 \cdot \log_{10}(x) \tag{13}$$

mit

$$P_2 = (-1,70 \pm 0,13) \text{ cps} \tag{13a}$$

$$M_2 = (-1,10 \pm 0,09) \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1} , \tag{13b}$$

der ebenfalls in [Abbildung 9](#) sichtbar ist. Ein reduzierter χ^2 -Test ergibt für die Anpassungsgüte

$$\chi_{\nu, Ra2}^2 = 0,17 . \tag{14}$$

Die Messwerte sind also sehr gut mit der Anpassung verträglich, was ebenfalls daran zu erkennen ist, dass viele der Werte mitsamt ihrer Unsicherheiten innerhalb des Konfidenzbands liegen. Dennoch wären hier analog zu [Gleichung \(8\)](#) bei einer Übereinstimmung des Abstandsgesetzes mit den Messwerten eigentlich die Werte $P_2 = \log_{10}(\hat{p}_{\text{Ra}}) = -2,9$ und $M_2 = -2$ für den weiter oben bestimmten Bestwert \hat{p}_{Ra} zu erwarten gewesen. Diese weichen von den in der Anpassung erhaltenen Werten ab. Auch hier stimmen die Messwerte also nicht mit der theoretischen Erwartung überein und bestätigen damit nicht das Abstandsgesetz. ✓

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Angabe und Diskussion der Endergebnisse

Zunächst wurde die Untergrundzählrate mit Hilfe einer langen Messung bestimmt. Es ergibt sich:

$$R_{\text{u}} = (0,95 \pm (0,14 \text{ syst.} + 0,04 \text{ stat.})) \text{ cps} \quad \frac{\Delta R_{\text{u}}}{R_{\text{u}}} = 19\% .$$

nicht kombinieren

Die große relative Unsicherheit ist dabei auf die systematische Unsicherheit des Messgeräts zurückzuführen. Die statistische Unsicherheit hat einen vergleichsweise kleinen Beitrag. Die Messdauer von 10 min war hier also ausreichend lang um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. ✓

Für die beiden radioaktiven Präparate aus Cäsium-137 und Radium-226 sollte das Abstandsgesetz $R(x) = \hat{p}/x^2$ überprüft werden. Hierfür wurden zunächst die Zählraten berechnet und um die Untergrundzählrate bereinigt. Die so erhaltenen Werte sind für die einzelnen Messreihen in [Tabellen 1](#) und [2](#) zu finden. ✓

Es ist deutlich sichtbar, dass die bereinigten Zählraten von Cäsium R_{Cs} für alle Abstände deutlich über denen von Radium R_{Ra} liegen. Das Cäsium-Präparat hat also offensichtlich deutlich mehr messbare Strahlung ausgesendet als das Radium-Präparat. ✓

Anhand von [Abbildungen 2](#) und [6](#) fällt auf, dass die Anpassungen nach dem Abstandsgesetz nur bedingt zu den Daten passt. Dies war auch an den χ^2 -Tests zu sehen, die vor allem im Fall von Cäsium auf eine deutliche Abweichung der Messdaten vom Modell hinwiesen. Da sowohl der analytische, als auch der durch χ^2 -Minimierung erhaltene Verlauf übereinstimmten wurde nicht von einer falschen Berechnung der Regressionen ausgegangen. ✓

Die Abweichung wurde in beiden Fällen durch eine Anpassung unter Berücksichtigung eines möglichen x -Offsets behoben. Die beiden erhaltenen Offsets ergaben sich zu

$$a_1 = (4,2 \pm 0,3) \text{ cm} \\ a_2 = (4,1 \pm 0,9) \text{ cm} .$$

Man sieht, dass diese beiden innerhalb ihrer Unsicherheiten sehr gut übereinstimmen. Auch ein t-Test ergibt $t = 0,11$. Es kann also bei beiden Messungen ungefähr vom gleichen Offset ausgegangen werden. ✓

Da die Abstandsmessung immer bis zur geschätzten Position des Strahlers durchgeführt wurde, ist davon auszugehen, dass das Geiger-Müller-Zählrohr im Messgerät eine interne Verschiebung hatte, wodurch alle Abstände bis zum Messgerät zu gering gemessen wurden. Dieses Phänomen konnte auch bei den beiden logarithmischen Regressionen in [Abbildungen 5](#) und [9](#) beobachtet werden, da die berechneten Werte für Steigung und y-Achsen-Abschnitt nach [Gleichungen \(9\)](#) und [\(13\)](#) nicht mit den theoretisch vorhergesagten Werten nach [Gleichung \(8\)](#) übereinstimmten. Diese Abweichungen können wahrscheinlich auch unter Berücksichtigung des internen Offsets erklärt werden. Dies müsste genauer untersucht werden. ✓

Insgesamt lässt sich hier also die Aussage des Abstandsgesetzes annehmen, da die Anpassungen mit dem berücksichtigten Offset, von dem nach dieser Auswertung ausgegangen wird, sehr gut zu den gemessenen Werten passt. Die beiden χ^2 -Tests, die sich in diesem Fall zu $\chi^2_{\nu, Cs} = 0,13$ und $\chi^2_{\nu, Ra} = 0,06$ ergeben, sprechen innerhalb der Messunsicherheiten sehr stark für das verwendete Modell. ✓

4.2 Diskussion der verwendeten Messmethoden

teilweise
Widerspruch zu oben

Die Untergrundzählrate, die mit einer Einzelmessung bestimmt wurde, hatte aufgrund der großen systematischen Unsicherheit des Messgeräts eine hohe Unsicherheit. Diese führte unweigerlich auch zu höheren Unsicherheiten der bereinigten Zählraten mit Präparat. Eine genauer bestimmte Untergrundzählrate hätte also die Aussagekraft aller nachfolgenden Messungen deutlich verbessert. (✓)

Zudem ist die statistische Unsicherheit von der Anzahl der gemessenen Ereignisse abhängig. Eine kurze Messzeit, bei der wenige Ereignisse registriert werden, sorgt hier immer für eine hohe Unsicherheit. ✓

Da sich außerdem an vielen Stellen im Gebäude radioaktive Proben befanden und ein nicht gesondert abgeschirmter Versuchsaufbau ohnehin einer gewissen Strahlung ausgesetzt ist, war die Untergrundstrahlung im Praktikumsgebäude hoch. Auch dies beeinflusste die Messbarkeit. Besonders für die schwache Probe war die Strahlung ab gewissen Abständen nur noch schwer von der Untergrundstrahlung zu unterscheiden. ✓

Auch Abstandsmessung unterlag einigen Ungenauigkeiten. Zum einen kam es beim Messen des Abstandes mit dem Maßband zu großen Parallaxenfehlern, da dieses nicht direkt angelegt werden konnte. Die Position der Radiumprobe im Glas musste beispielsweise angepeilt werden. Außerdem misst auch das Messgerät nicht an einem klar definierten Punkt, vielmehr hat das sich darin befindliche Zählrohr eine räumliche Ausdehnung innerhalb derer gemessen werden kann. Die Messposition unterlag daher eventuell auch statistischen Schwankungen. Des weiteren ergibt sich auch eine nicht zu unterschätzende systematische Fehlerquelle, da weder die genaue Position der radioaktiven Proben in ihren Halterungen, noch die genaue Position des Geiger-Müller-Zählrohrs im Messgerät bekannt waren. Die genannten Fehlerquellen führten zu entsprechenden Unsicherheiten und auch direkt zu dem berechneten Offset des Abstandsgesetzes. f ✓

Die radioaktiven Proben waren so präpariert und abgeschirmt, dass sie nicht in alle Raumrichtungen gleich intensiv strahlten, sondern eine gewisse Richtwirkung in eine Richtung hatten. Dadurch, dass die Proben für jeden Messpunkt von Hand verschoben und ausgerichtet wurden, unterlag deren Orientierung statistischen Schwankungen. Dies vergrößerte auch die statistischen Unsicherheiten und damit die Schwankung der Messwerte. (✓)

Eine wichtige Fehlerquelle ist auch, dass sich die Abdeckkappe während des ganzen Experiments auf dem Zählrohr befand. Dadurch wurde weniger Strahlung pro Zeit gemessen. Insbesondere konnte dadurch keine α -Strahlung nachgewiesen werden. Messungen ohne Abdeckkappe hätten für mehr gemessene Ereignisse und damit auch für geringere Unsicherheiten gesorgt. Allerdings wäre damit unweigerlich auch die Untergrundzählrate gestiegen. Die Vor- und Nachteile dieser Methode könnten in weiteren Messreihen untersucht werden. Allerdings ist γ -Strahlung von dieser Abschirmung kaum betroffen. Da bei allen Zerfallsprozessen der verwendeten Cäsium- und Radium-Atome nach [2, 4] auch γ -Strahlung freigesetzt wird, gibt es daher keine Anhaltspunkte für einen groben Messfehler. ✓

Weitere Beiträge zu abgeschwächten Zählraten sind beispielsweise, dass sich das Radium noch in einem Glasgefäß befand, welches Alphastrahlung zu großen Teilen abgeschirmt haben könnte. Der Vergleich der beiden Strahler wurde dadurch also weniger aussagekräftig. Außerdem wurde es für das Radiumpräparat schon bei kleinen Abständen zunehmend schwieriger, überhaupt eine Strahlungsintensität von der Untergrundzählrate unterscheiden zu können. ✓ sehr gut

Es gibt also einige wichtige Faktoren, die zu den Ungenauigkeiten der Messung beitragen. Wie diese verbessert werden können und weitere Störfaktoren verringert werden können, soll nun im Folgenden diskutiert werden.

4.3 Verbesserte Messmethoden

Um die Unsicherheit der Untergrundzählrate zu verringern, könnte man eine längere Messung durchführen. Dies würde die statistischen Unsicherheiten weiter minimieren. Auch eine Messreihe würde diese durch Mittelwertbildung noch weiter verringern. Allerdings ist dies bei gleichbleibendem Versuchsaufbau nur bedingt sinnvoll, da die systematische Unsicherheit des Messgeräts nach wie vor sehr groß ist. Es würde sich daher lohnen hierfür mehr Geld in ein besseres Messgerät zu investieren, da alle nachfolgenden Ergebnisse stark von der Genauigkeit dieser Messung abhängen. ✓ € :-)

Alternativ könnte der gesamte Messaufbau weitestgehend von Untergrundstrahlung isoliert werden. Mögliche Maßnahmen wäre das Entfernen von naheliegenden Strahlungsquellen, beispielsweise in den Nebenräumen, oder auch eine Abschirmung mit Bleiplatten um das Messgerät herum. Dadurch, dass der Aufbau und die gemessenen Abstände nicht groß sind, wäre eine solche Isolierung durchaus möglich. Dadurch ließe sich auch der Alphastrahler deutlich besser untersuchen. Alternativ wäre auch eine Messung im Freien durchaus denkbar, da dort die Untergrundzählrate aufgrund von fehlenden Strahlungsquellen in Beton und Stahl wahrscheinlich deutlich geringer ist. ✓

die Ranger kosten schon um die 1000 € wie? cosmetics? R₀?? die Erdkruste ist sehr aktiv

Eine andere Möglichkeit, den Einfluss der Untergrundstrahlung auf die Messergebnisse zu verringern wäre es, mehr Messpunkte der beiden Strahler bei kleineren Abständen aufzunehmen. Bei diesen Abständen ist die Strahlungsintensität noch deutlich größer als die Untergrundstrahlung. Die Anpassung an die Messwerte wäre dadurch genauer.

Allerdings müsste dafür die Abstandsmessung deutlich verbessert werden. Messgerät und Präparat könnten hierfür auf einer Schiene platziert werden. Sie würden zu Beginn der Messung so justiert werden, dass die Richtwirkung der Probe genau auf das Messgerät zeigt. Außerdem ließen sich so statistische Schwankungen beim Anlegen und Ablesen des Metermaßes minimieren. Möglicherweise könnte man so auch das ermittelte Offset korrigieren und eine erneute Messreihe ohne Offset aufnehmen.

✓
α?

Schön

✓

Die Abdeckkappe des Messgeräts sollte abgenommen werden. Durch diese simple Verbesserung würden sich die statistischen Unsicherheiten verringern. Die Vergleichbarkeit des Gammastrahlers mit dem Alphastrahler wäre deutlich besser und der Alphastrahler könnte auch für größere Abstände noch sinnvolle Messergebnisse liefern. Vielleicht wäre es sogar möglich, einen Alphastrahler ohne Glas zu verwenden. Dadurch würde die Strahlungsintensität voraussichtlich deutlich steigen. Man kann den Gedanken weiterspinnen und sich überlegen, dass auch größere Mengen radioaktiven Materials klarere Ergebnisse liefern würden, da deutlich mehr Ereignisse in kurzer Zeit gemessen werden könnten. Ab einem gewissen Punkt gilt es allerdings abzuwägen, ob die Strahlungsbelastung für die Experimentatoren noch vertretbar wäre.

A.O.

Um die statistischen Unsicherheiten der Ereignismessungen konstant zu halten wäre es außerdem sinnvoll, bei jeder Messung gleich viele Counts zu zählen und dazu jeweils die Zeit zu stoppen, wie es im letzten Versuchsteil gemacht wurde. Es gilt allerdings zu beachten, dass das verwendete Messgerät nicht über einen Modus verfügte, bei dem nach einer gewissen Ereigniszahl die Zeit gestoppt wird. Die Zeit musste im zweiten Versuchsteil, bei dem diese Verbesserung implementiert wurde, auf eine Sekunde genau geschätzt werden, was wiederum die Unsicherheit der Zeit erhöhte. Es wäre also sinnvoll, hier ein Messgerät zu verwenden welches über eine entsprechende Funktion verfügt.

oder + hinreichend gut
schätzen \bar{R}_0 kann direkt
genommen werden mit $\sigma(\bar{R}_0) \gg$

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau für die Messungen mit Präparat	3
2	Abstandsabhängigkeit der Zählraten R_{Cs} von Cäsium	5
3	Minimierung von χ^2 durch Auftragung von $\chi^2_{\nu, \text{Cs}}$ gegen den Parameter p_{Cs} .	6
4	Anpassung $R(x) = p/(x - a)^2$ der Abstandsabhängigkeit der Zählraten R_{Cs}	8
5	Abstandsabhängigkeit der Zählraten R_{Cs} von Cäsium - doppel-logarithmisch	9
6	Abstandsabhängigkeit der Zählraten R_{Ra} von Radium	11
7	Minimierung von χ^2 durch Auftragung von $\chi^2_{\nu, \text{Ra}}$ gegen den Parameter p_{Ra}	12
8	Anpassung $R(x) = p/(x - a)^2$ der Abstandsabhängigkeit der Zählraten R_{Ra}	13
9	Abstandsabhängigkeit der Zählraten R_{Ra} von Radium - doppel-logarithmisch	14
10	Messprotokoll Seite 1	23

Tabellenverzeichnis

1	Zählraten mit Cäsium	21
2	Zählraten mit Radium	22

Literaturverzeichnis

- [1] *Ranger Operation Manual* (S.E. International, Inc. P.O. Box 39, 436 Farm Rd. Summertown, TN 38483 USA, 25. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/86/Ranger%20Operation%20Manual.pdf>.
- [2] Paul Ferdinand Kaiser, *Gammaskopie zum Nachweis von Cs-137 Aktivitäten und deren vertikale Verteilung in Bodenprofilen* (Wikipedia, 28. März 2022), <https://www.znf.uni-hamburg.de/media/documents/archiv-qualifikationsarbeiten/bachelorarbeit-pkaiser.pdf>.
- [3] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Anleitung Versuch 86, Abstandsgesetz* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 25. März 2022).
- [4] R.R.Kinsey et al., *Radium* (NUDAT Datenbank, The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data, The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data, 26. März 2022).
- [5] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse B* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 25. März 2022).
- [6] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Aufbau Versuch 86* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 25. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/86/>.
- [7] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse A* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 25. März 2022).
- [8] *Caesium* (Wikipedia, 26. März 2022), <https://de.wikipedia.org/wiki/Caesium#Isotope>.
- [9] *Radium* (Wikipedia, 26. März 2022), <https://de.wikipedia.org/wiki/Radium>.

A.1 Rohdaten und daraus berechnete Größen

Zählraten mit Cäsium

	$R_{p,Cs}$ [cps]	$\Delta R_{p,Cs}^{syst.}$ [cps]	$\Delta R_{p,Cs}^{stat.}$ [cps]	R_{Cs} [cps]	$\Delta R_{Cs}^{syst.}$ [cps]	$\Delta R_{Cs}^{stat.}$ [cps]
1	10,9	1,6	0,4	9,9	1,6	0,4
2	7,9	1,2	0,4	7,0	1,2	0,4
3	6,8	1,0	0,3	5,8	1,0	0,3
4	5,0	0,8	0,3	4,0	0,8	0,3
5	4,2	0,6	0,3	3,3	0,7	0,3
6	3,7	0,6	0,3	2,7	0,6	0,3
7	2,8	0,4	0,2	1,9	0,5	0,2
8	2,20	0,33	0,19	1,3	0,4	0,2
9	2,6	0,4	0,2	1,6	0,4	0,2
10	2,4	0,4	0,2	1,4	0,4	0,2
11	2,4	0,4	0,2	1,4	0,4	0,2
12	2,06	0,31	0,19	1,12	0,34	0,19
13	1,93	0,29	0,18	0,98	0,32	0,18
14	2,03	0,31	0,18	1,08	0,34	0,19
15	1,65	0,25	0,17	0,70	0,29	0,17
16	1,48	0,22	0,16	0,50	0,26	0,16
17	1,50	0,23	0,16	0,55	0,27	0,16
18	1,40	0,21	0,15	0,45	0,25	0,16
19	1,63	0,25	0,17	0,68	0,28	0,17
20	1,48	0,22	0,16	0,53	0,26	0,16
21	1,28	0,19	0,15	0,33	0,24	0,15
22	1,45	0,22	0,16	0,50	0,26	0,16
23	1,47	0,22	0,16	0,52	0,26	0,16
24	1,52	0,23	0,16	0,57	0,27	0,16

Tabelle 1: Auflistung der berechneten Zählraten mit Cäsium. R_p gibt dabei immer die direkte Zählrate an, R die um die Untergrundzählrate bereinigte Zählrate des Präparats nach [Gleichung \(4\)](#). Die Unsicherheiten teilen sich in systematische und statistische Unsicherheiten auf und werden wie in [Abschnitte 3.1](#) und [3.2](#) berechnet.

Zählraten mit Radium

	$R_{p,Ra}$ [cps]	$\Delta R_{p,Ra}^{\text{syst.}}$ [cps]	$\Delta R_{p,Ra}^{\text{stat.}}$ [cps]	R_{Ra} [cps]	$\Delta R_{Ra}^{\text{syst.}}$ [cps]	$\Delta R_{Ra}^{\text{stat.}}$ [cps]
1	2,4	0,4	0,2	1,5	0,4	0,3
2	1,89	0,29	0,19	0,94	0,32	0,19
3	1,64	0,25	0,16	0,69	0,29	0,17
4	1,45	0,22	0,15	0,50	0,26	0,15
5	1,41	0,21	0,14	0,46	0,26	0,15
6	1,39	0,21	0,14	0,44	0,25	0,15
7	1,30	0,20	0,13	0,35	0,24	0,14
8	1,32	0,20	0,13	0,37	0,24	0,14
9	1,16	0,18	0,12	0,21	0,23	0,12
10	1,30	0,20	0,13	0,35	0,24	0,14
11	1,22	0,18	0,12	0,27	0,23	0,13
12	1,04	0,16	0,10	0,09	0,21	0,11
13	1,22	0,18	0,12	0,27	0,23	0,13
14	1,09	0,16	0,11	0,14	0,22	0,12
15	1,19	0,18	0,12	0,24	0,23	0,13
16	1,00	0,15	0,10	0,05	0,21	0,11
17	1,23	0,19	0,12	0,28	0,23	0,13

Tabelle 2: Aufzistung der berechneten Zählraten mit Radium. R_p gibt dabei immer die direkte Zählrate an, R die um die Untergrundzählrate bereinigte Zählrate des Präparats nach [Gleichung \(4\)](#). Die Unsicherheiten teilen sich in systematische und statistische Unsicherheiten auf und werden wie in [Abschnitte 3.1](#) und [3.2](#) berechnet.

A.2 Messprotokoll

V86 - Abstandsgesetz

radioaktives Präparat Maßband Dosiseistungsmessgerät mit Timer

1 Messung der Untergrundzählrate

Zeit: $t = 600 \text{ s}$ $\Delta t =$

Anzahl der Ereignisse: $n = 570$ $\Delta n = \sqrt{n}$

Unsicherheiten
dem Handbuch
entnehmen

2 Abstandsabhängigkeit für einen Gammastrahler: Cäsium 137

Abstand x/cm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ereignisse counts n	653	474	406	299	252	219	170	132	155	142	143	124
x/cm	13	14	15	16	17 17	18	19	20	21	22	23	24
counts n	116	122	99	89	90	84	98	89	77	87	98	91

- $\Delta x = \pm 0,3 \text{ cm}$ • Zeit: $t = 60 \text{ s}$
- $\Delta n = \sqrt{n}$
- geschätzte Position des Präparats: mind. 2 mm im Stab

3 Abstandsabhängigkeit für einen anderen Strahler: ~~Strahler~~ Radium 226

x/cm	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5
counts n	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
t/s	41	53	61	69	71	72	74	76	86	77	82	96
x/cm	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5							
counts n	100	100	100	100	100							
t/s	82	92	84	100	81							

- Präparat befindet sich ca. 2,0 cm über dem Ende vom Glasboden (wurde bereits in x berücksichtigt)
- $\Delta t = \pm 1 \text{ s}$, da Zeit dieses Mal abgelesen wird

25.03
d

Abbildung 10: Messprotokoll Seite 1