

Experimente mit Beta- und Gammastrahlung aus Kaliumkarbonat oder Kaliumchlorid

Kurzfassung

Großflächenzählrohre ermöglichen heute eindrucksvolle Experimente mit natürlichen Radionukliden in Materialien aus der Umwelt und in Lebensmitteln. Die Beta- und Gammastrahlung des Isotops Kalium-40 kann damit von Lernenden ausführlich und selbständig an handelsüblichen Kaliumsalzen, wie Kaliumkarbonat (Pottasche, Backpulver) und Kaliumchlorid (Diätsalz, Blutdrucksalz), erkundet und vermessen werden.

Dabei bleiben die Aktivitätsfreigrenzen der neuen Strahlenschutzverordnung stets sehr weit unterschritten. So können die Phänomene und Charakteristika der Kernstrahlung (Reichweite, Absorption) auch durch offene Erkundungsaufträge zugänglich gemacht werden und Physiklernende in der Entwicklung ihrer experimentellen Kompetenz und Forschungslust gefördert werden.

Die Verwendung einer größeren Menge Kaliumsalz ermöglicht eine klare Differenzierung der Beta- und Gammastrahlungsanteile des K-40. Die sehr große Durchdringungsfähigkeit der K-40-Gammastrahlung mit einer Photonenenergie von 1,4 MeV kann dann mit Blei oder Aluminium mit Schichtdicken bis zu mehreren Zentimetern demonstriert und quantitativ untersucht werden. So lässt sich das exponentielle Schwächungsgesetz bestätigen und die Schwächungskoeffizienten und Halbwertsdicken für Blei und Aluminium bestimmen.

Material:



Material: 5 kg Kaliumkarbonat (Pottasche) als Backpulver im Lebensmittelhandel
Bezugsquelle im Onlinehandel (Preis für 5 kg: 25 bis 30 € inkl. Versand [1])

Kalium-40-Aktivität: $A_{K-40} = 85,75 \text{ kBq}$ (Freigrenze in der StrlSchV: $A_{FG} = 1000 \text{ kBq}$)

Betaumwandlungsrate in 5 kg K_2CO_3 : 85750 pro Sekunde
(davon 89 % β^- mit $E_{max} = 1,31 \text{ MeV}$, 11 % K-Elektroneneinfang, 0,001 % β^+)

Gammaemissionsrate in 5kg K_2CO_3 : 9200 pro Sekunde ($E = 1,461 \text{ MeV}$)

Alternativ: 5 kg Kaliumchlorid, auch als Diätsalz oder Blutdrucksalz im Handel
Bezugsquelle Onlinehandel (Preis für 5 kg: 25 bis 30 € inkl. Versand [1])

Kalium-40-Aktivität: $A_{K-40} = 82,75 \text{ kBq}$

Betaumwandlungsrate in 5 kg KCL: 82750 pro Sekunde

Gammaemissionsrate in 5kg KCL: 9100 pro Sekunde

Messgerät: Inspector (oder Nachfolgemodell Ranger) der Fa. S.E. International
(Bezug Fa. Mekruphy [2], Alternativ Großflächenzählrohre Fa. Leybold oder PHYWE)

Einleitung

Die ionisierende Strahlung des natürlichen Kaliumisotops K-40 lässt sich mit heute in vielen Schulen verbreiteten Großflächenzählrohren auf einfache Weise an alltäglichen Nahrungsmitteln mit höherem Kaliumgehalt nachweisen und vergleichen. Schulnah beschrieben wird dies bei LEIFIphysik [3] und bei „Radioaktivität zum Anfassen“ [4].

Eine gut geeignete Strahlenquelle ist der Mineralstoff Kaliumkarbonat (K_2CO_3 , Pottasche), der traditionell als Backpulver benutzt wird. Ein handelsübliches Tütchen enthält 20 g K_2CO_3 (Abb. 1) und erzeugt im aufgelegten Inspector-Messgerät eine Impulsrate von etwa 400 Imp./min über dem Nulleffekt von etwa 35 Imp./min.



Abb. 1: Typisches Tütchen mit 20 g Kaliumkarbonat
Abmessungen innen etwa 10 cm x 7 cm

Ein Gramm Kaliumkarbonat besitzt eine Betaaktivität von etwa 16 Bq und eine Gammaemission von etwa 2 pro Sekunde. Man kann sich vorstellen: Das in dem Tütchen flach ausgebreitete Backpulver emittiert nach vorn und hinten pro Sekunde jeweils etwa 160 Elektronen und etwa 20 Gammaquanten.

Die Impulsausbeute lässt sich durch das Stapeln mehrerer flacher Tüten nur wenig steigern, weil die Elektronen zwar mehrere Papierschichten durchdringen aber bereits von einer wenige mm dicken Schicht K_2CO_3 vollständig absorbiert werden. Der Beitrag der Gamma-Photonen zur Impulsrate ist dabei auch wegen der sehr viel geringeren Gamm sensitivität des Zählrohrs deutlich geringer als die stochastische Streuung, spielt also keine Rolle. Verwendet man aber deutlich größere Mengen an Kaliumkarbonat im Bereich mehrerer Kilogramm, so wird auch der hochenergetische und durchdringende Gamma-Anteil der K-40-Strahlung mit einfachen Zählrohren nachweisbar. Dies entspricht einer historischen Pioniermethode der Kalium-Strahlungsforschung. [4]

Damit ergibt sich eine Reihe von interessanten Möglichkeiten zur experimentellen Strahlungsphysik mit einfachen Messgeräten und leicht beschaffbaren Materialien:

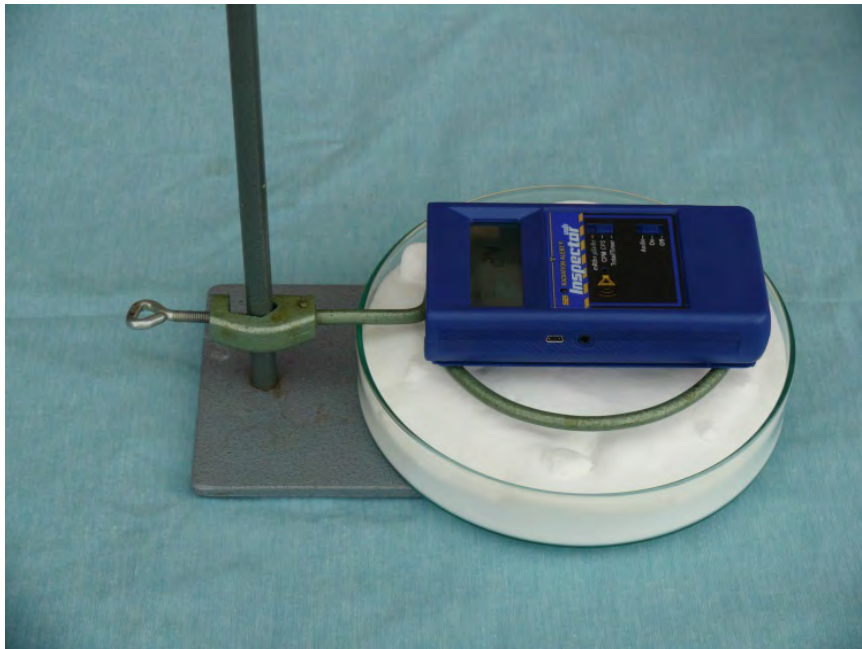
- Reichweite der β -Strahlung in Luft (mit Kaliumchlorid KCl)
- Absorption der β -Strahlung in verschiedenen Materialien (mit KCl)
- Differenzierung der Impulse aus dem β - und γ -Strahlungsanteil
- Exponentielles Abschwächungsgesetz für γ -Strahlung in Blei und Aluminium
- Abstandsgesetz für γ -Strahlung

Messreihe zur Reichweite der Beta-Strahlung aus Kaliumchlorid

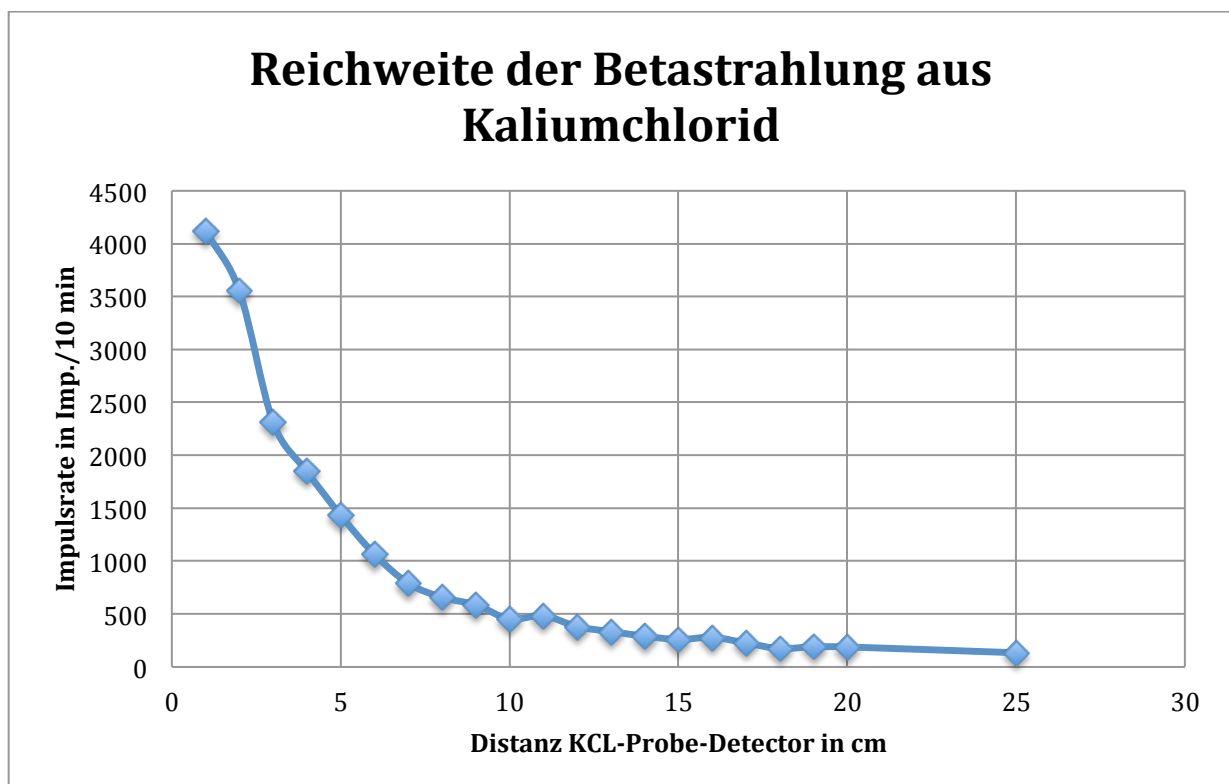
Material:

- 1 kg Kaliumchlorid
- Petrischale, 20 cm Durchmesser
- Inspector-Messgerät
- Stativmaterial

Versuchsanordnung (Abb. 2):



Messergebnisse (Messzeit jeweils 10 Minuten):



Messreihen zur Abschwächung der Betastrahlung in verschiedenen Materialien

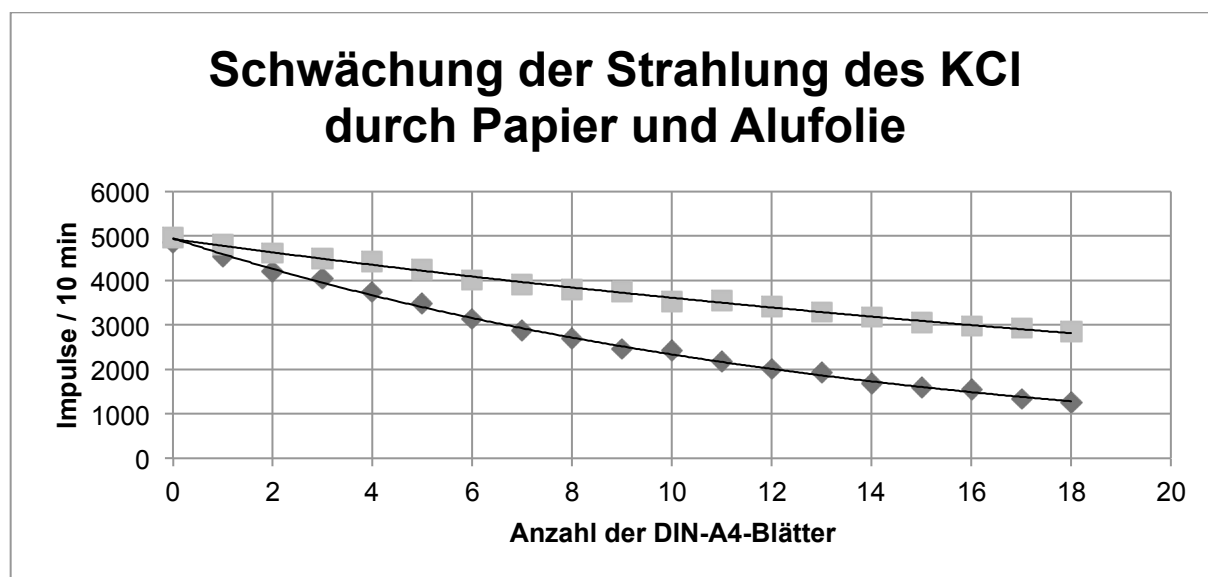
Material:

- Kaliumchlorid (etwa 1 kg)
- Großflächenzählrohr
- Druckerpapier
- Haushaltsaluminiumfolie

Durchführung: Zwischen dem flächig ausgebreiteten Kaliumchlorid und dem in konstanter Entfernung fixierten Messgerät werden Papierblätter oder Blätter von Aluminium-Haushaltsfolie in jeweils zunehmender Zahl aufgeschichtet.



Abb. 3:



Auswertung: Die Strahlung wird von Druckerpapier (80 g/m^2) stärker abgeschwächt als durch eine gleiche Anzahl von Blättern aus Aluminium-Haushaltsfolie.

Erklärung: Die Flächenmassendichte der Folie liegt mit $2,1 \text{ g/Blatt}$ ($3,4 \text{ mg/cm}^2$) deutlich unter derjenigen von Papier, die sich für 80 g/m^2 zu etwa 5 g/Blatt (gemessen $4,95 \text{ g}$) also $7,9 \text{ mg/cm}^2$ ergibt.

Messreihe zur Differenzierung der Beta- und Gammastrahlung von Kaliumkarbonat

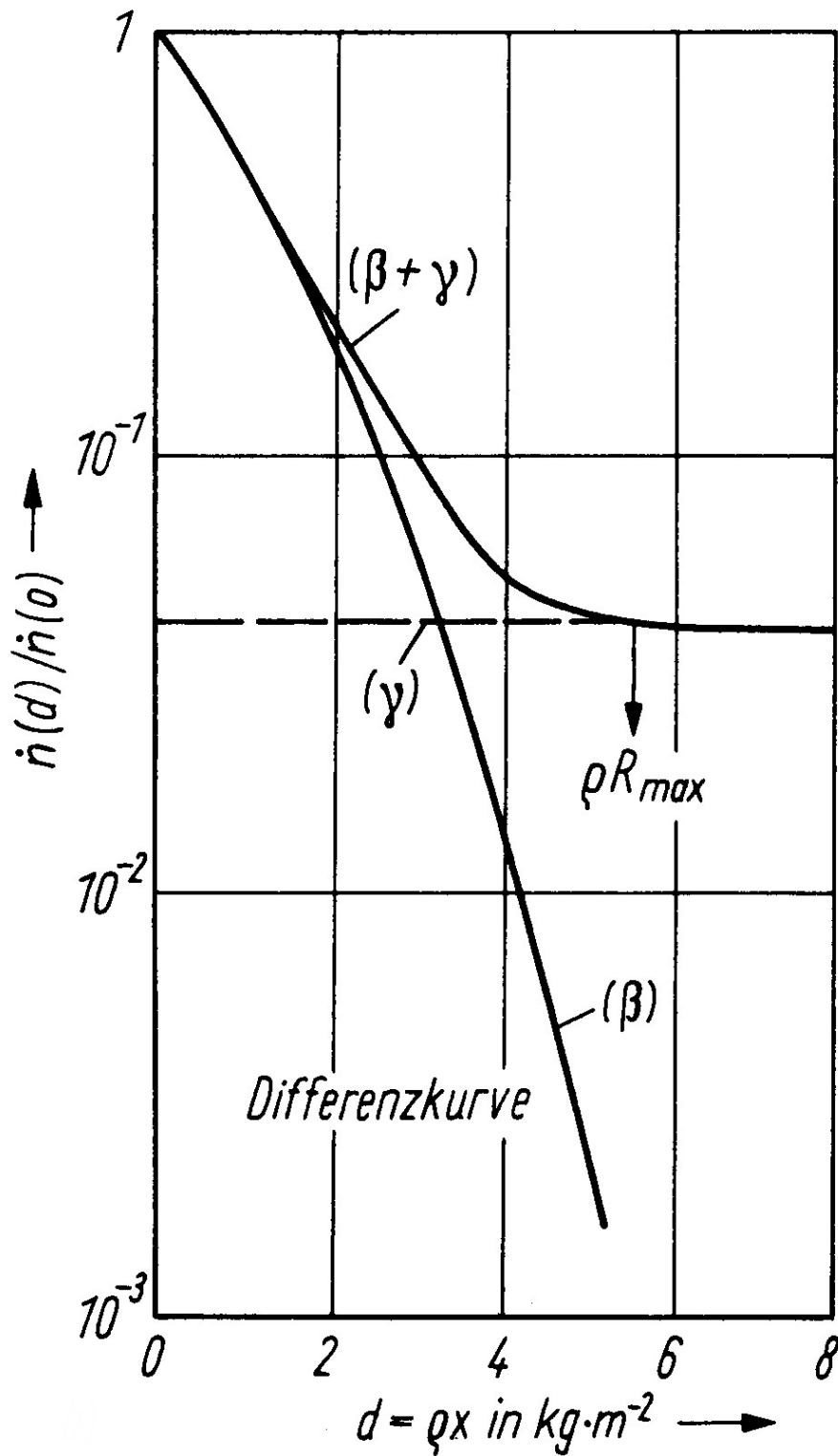
Material:

- 5 kg Kaliumkarbonat im Kunststoffeimer (Fa. Chemdiscount)
- Großflächenzählrohr (Inspector oder Ranger, Fa. S.E. International)
- Aluminium-Bleche 10 cm x 10 cm x 0,5 mm
- Aluminium-Bleche 10 cm x 10 cm x 1,0 mm

Durchführung:

1. Bestimmen Sie den Nulleffekt des Zählgerätes in 5 Minuten. (160 Imp./min)
2. Glätten Sie das Pulver im Eimer und decken Sie die Oberfläche zum Schutz des Zählgeräts vor Kontaminationen mit einem Blatt Papier ab.
3. Legen Sie das Zählgerät auf das Papier und bestimmen Sie die Impulsrate für 5 Minuten.
4. Wiederholen Sie die Messung mit jeweils 5 Minuten Messzeit mit Aluminiumblechen zunehmender Dicke zwischen Papier und Zählrohr.
5. Berechnen Sie jeweils die Impulsraten, die auf Strahlung aus K_2CO_3 zurückgehen.
6. Zeichnen Sie ein Diagramm der absoluten Messwerte auf Millimeterpapier (x-Achse: Al-Schichtdicke in mm; y-Achse: Impulsrate in Imp/5 Minuten)
7. Normieren Sie die Einzelwerte der Impulsraten, indem Sie jeden Einzelwert I durch den höchsten Wert I_0 (nur mit Papier) dividieren.
8. Zeichnen Sie ein Diagramm der normierten Impulsraten (I/I_0) auf halb-logarithmischem Millimeterpapier. Oder bestimmen Sie die Logarithmen der normierten Impulsraten und zeichnen Sie ein entsprechendes Diagramm auf linearem Millimeterpapier.)
9. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der typischen Absorptionskurve für β -Strahlung mit einem γ -Anteil in Aluminium (Abb. 4)
10. Schätzen Sie die γ -Impulsausbeute des Messgerätes in dieser Versuchsanordnung aus der spezifischen Aktivität von Kalium 40 ab.

Abb. 4: Absorptionskurve für β -Strahlung mit einfachem Energiespektrum und γ -Anteil in Aluminium, aus [6]



Als Maß für die Mächtigkeit der Absorptionsschicht wird die Flächenmasse d angegeben; d ist das Produkt aus Dichte und Schichtdicke.

Beispiel: $6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}/2699\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}=2,2\text{mm}$

Messwerte:

Anordnung	Roh-Impulsrate in Impulse pro 5 Minuten	Impulsrate I in Impulse pro 5 Minuten	Normierte Impulsrate I/I_0	Logarithmus der normierten Impulsrate $\text{Log}(I/I_0)$
K ₂ CO ₃ plus Papier	2403	2223	1,00	0,00
0,5 mm Al	968	788	0,35	-0,45
1,0 mm Al	600	420	0,19	-0,72
1,5 mm Al	492	312	0,14	-0,85
2,0 mm Al	540	360	0,16	-0,79
2,5 mm Al	506	326	0,15	-0,83
3,0 mm Al	502	322	0,15	-0,84
4,0 mm Al	501	321	0,14	-0,84
5,0 mm Al	477	297	0,14	-0,84

Auswertung:

Die Messkurve enthält zwei deutlich unterscheidbare Bereiche. Zunächst fällt die Impulsrate von etwa 2000 Impulsen in 5 Minuten ohne Aluminium stark auf etwa 400 Impulse/5 Min. bei einer Aluminiumschicht von 1 mm Stärke. Bei weiter wachsender Aluminium-Schicht fällt die Impulsrate deutlich weniger auf etwa 300 Imp./5 Min. bei 6 mm Aluminium-Schichtdicke.

Das Zählrohr registriert also zwei Strahlungskomponenten mit sehr unterschiedlichen Reichweiten in Aluminium. Die anfangs deutlich häufiger registrierte Komponente liefert ohne Absorber etwa 1800 Impulse in 5 Minuten. Ihre maximale Reichweite beträgt in Aluminium etwa 2 mm. Dies deckt sich mit den Literaturangaben für β -Strahlung.

Ab einer Aluminiummächtigkeit von etwa 6 kg m^{-2} , entsprechend einer Schichtdicke von etwa 2,2 mm, werden nur noch Impulse einer zweiten Strahlungskomponente registriert (etwa 300 Imp./5 Min.), die durch zusätzliche Aluminiumschichte nur schwach verringert wird. Dies ist die γ -Strahlung des Kalium-40.

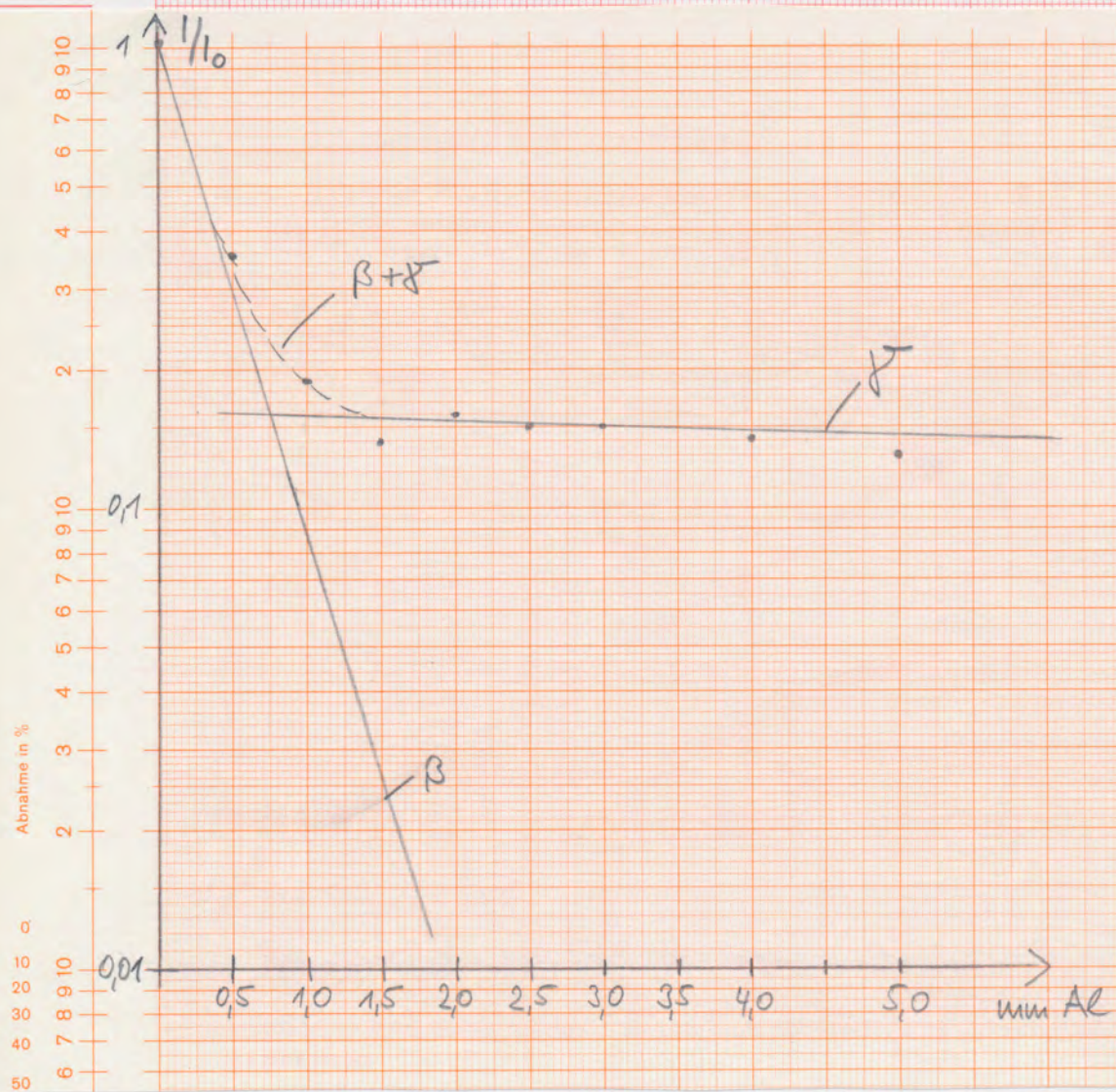
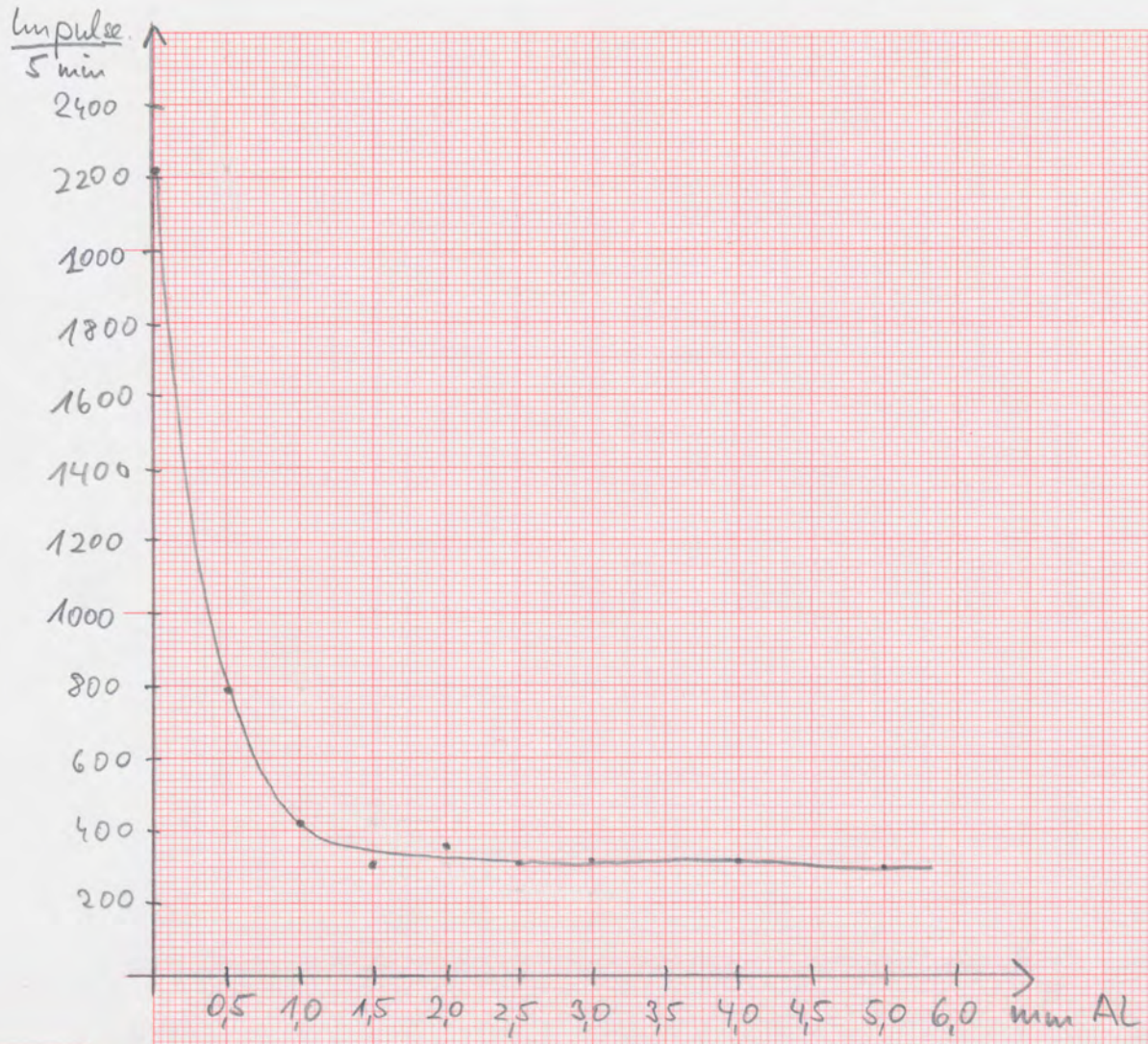
Die Messkurve in halblogarithmischer Darstellung entspricht idealtypisch der Lehrbuchdarstellung einer Absorptionskurve für β -Strahlung mit einfachem Energiespektrum und γ -Anteil in Aluminium. (Abb. 4) [6]

Abschätzung der γ -Strahlungsausbeute:

Die Probemenge von 5 kg K_2CO_3 nimmt bei einer Dichte von $2,428 \text{ g cm}^{-3}$ ein Volumen von 2060 cm^3 ein. Diese Masse kann in erster Näherung als eine Kugel mit einem Radius von 8 cm und einer Oberfläche von etwa 800 cm^2 betrachtet werden. Die Gesamtaktivität von 5 kg K_2CO_3 beträgt fünfmal 17150 Bq/kg (spezifische Aktivität) gleich $85,75 \text{ kBq}$. Die γ -Emissionsrate beträgt dann etwa 9200 pro Sekunde, entsprechend $2,76 \cdot 10^6$ in 5 Minuten.

Unter der Annahme, dass alle Photonen die Oberfläche erreichen und ihre Bewegungsrichtungen isotrop verteilt sind, ergibt sich eine Photonenflussdichte von $11,5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ oder 3450 pro cm^2 innerhalb von 5 Minuten. Das Zählrohrfenster besitzt einen effektiven Durchmesser von 45 mm, also eine Fläche von $15,9 \text{ cm}^2$. Wenn das Zählrohr in 5 Minuten von etwa 55000 γ -Photonen durchquert wird und daraus 300 Impulse entstehen, ergäbe sich eine γ -Ausbeute von etwa 0,5 Prozent.

Dies erscheint nicht unrealistisch und wäre zu vergleichen mit den Hersteller-Angaben zur γ -Sensitivität des Zählrohrs. [7]



Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 10.000, Einheit 62,5 mm, die andere in mm mit Prozentmaßstäb
 Nr. 369 1/2; 6 MADE IN GERMANY

Messreihe zum Schwächungsgesetz für Gammastrahlung in Blei

Material:

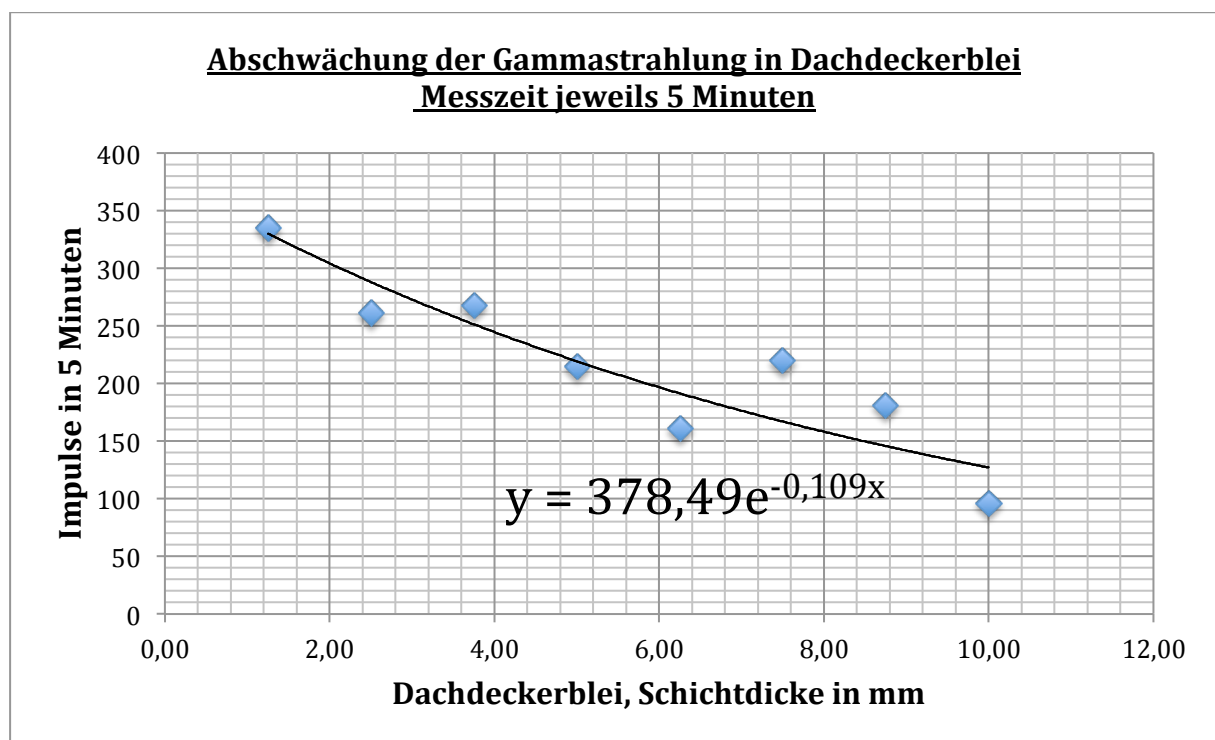
- 5 kg Kaliumkarbonat im Kunststoffeimer (Fa. Chemdiscount)
- Großflächenzählrohr (Inspector oder Ranger, Fa. S.E. International)
- 10 Blei-Bleche 10 cm x 10 cm x 1,25 mm (Dachdeckerblei)

Durchführung:

1. Bestimmen Sie den erhöhten Nulleffekt des Zählgerätes auf der Bleioberfläche für eine Messzeit von 5 Minuten. (160 imp/5 min.)
2. Glätten Sie das Pulver im Eimer und decken Sie die Oberfläche zum Schutz des Zählgeräts vor Kontaminationen mit einem Blatt Papier ab.
3. Legen Sie das Zählgerät auf das Papier und bestimmen Sie die Impulsrate für 5 Minuten.
4. Wiederholen Sie die Messung mit jeweils 5 Minuten Messzeit mit einer wachsenden Anzahl von Bleiblechen zwischen Papier und Zählrohr.
5. Berechnen Sie jeweils die Impulsraten, die auf Strahlung aus K_2CO_3 zurückgehen.
6. Fertigen Sie ein Diagramm der Messwerte mit EXCEL an und lassen Sie das Programm eine exponentielle Trendlinie mit dazu gehöriger Funktionsgleichung ermitteln.
7. Berechnen Sie aus der Funktionsgleichung die Halbwertsdicke des Bleis für diese Strahlung und vergleichen Sie mit den Literaturangaben für Gammastrahlung verschiedener Energien.
8. Wiederholen Sie die Messungen und Auswertungen mit deutlich längeren Messzeiten.

Messwerte:

Dicke d der Blei-Absorberschicht aus gestapelten Blechen in mm	Roh-Impulsrate in Impulse pro 5 Minuten	Impulsrate I aus K_2CO_3 in Impulse pro 5 Minuten		
1,25	653	335		
2,50	579	261		
3,75	586	268		
5,00	533	215		
6,25	479	161		
7,50	538	220		
8,75	499	181		
10,00	414	96		



Auswertung:

Die Messwerte sind offensichtlich starken stochastischen Schwankungen unterworfen, so dass keine stetige Messkurve entsteht. Deutlich längere Messzeiten liefern harmonischere Ergebnisse.

Die Abschwächung elektromagnetischer Strahlung beim Durchgang durch Materie kann durch das exponentielle Schwächungsgesetz beschrieben werden (Lambert-Beersches Gesetz):

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Dabei ist d die Schichtdicke des Materials und $I(d)$ die Intensität (Impulse pro Zeit). I_0 ist in diesem Fall die Intensität nach dem Durchgang durch 1,25 mm Blei, welches die Betastrahlung vollständig herausfiltert. Der Abschwächungskoeffizient μ ermöglicht die Berechnung der energie- und materialspezifischen Halbwertsdicke oder Halbwertschicht, in der die Hälfte der eintreffenden Strahlungsenergie absorbiert wird:

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Mit den aufgenommenen Messwerten ergibt sich $d_{1/2}(\text{Blei}) = 6,4$ mm. Charakteristische Literaturwerte für die Energie der K-40-Gammastrahlung ($E_\gamma = 1,3$ MeV) liegen im Bereich von 8,7 mm (für $E_\gamma = 1,0$ MeV) bis 11,7 mm (für $E_\gamma = 1,5$ MeV). [8]

Auch längere Messzeiten ergeben systematisch jeweils etwas geringere als die tabellierten Halbwertsdicken. Dies kann mit der Energieabschwächung der einzelnen Photonen durch Wechselwirkungen bereits auf dem Weg durch das Kaliumkarbonat erklärt werden.

Messreihe zum Schwächungsgesetz für Gammastrahlung in Aluminium

Material:

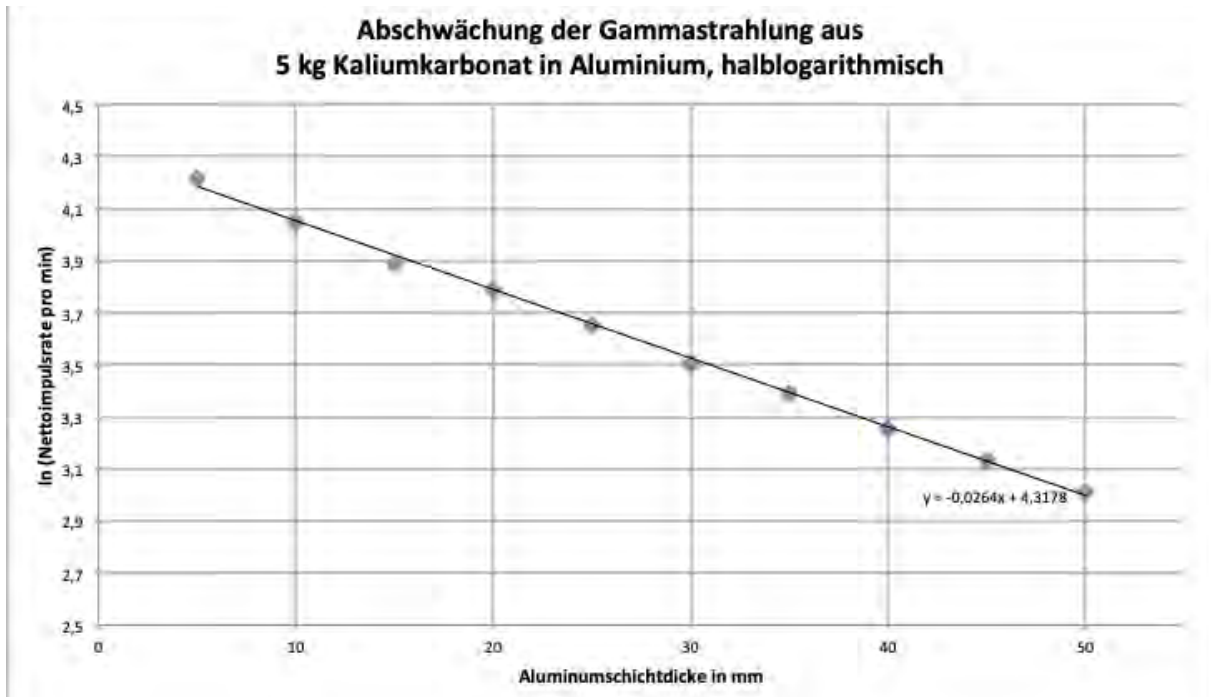
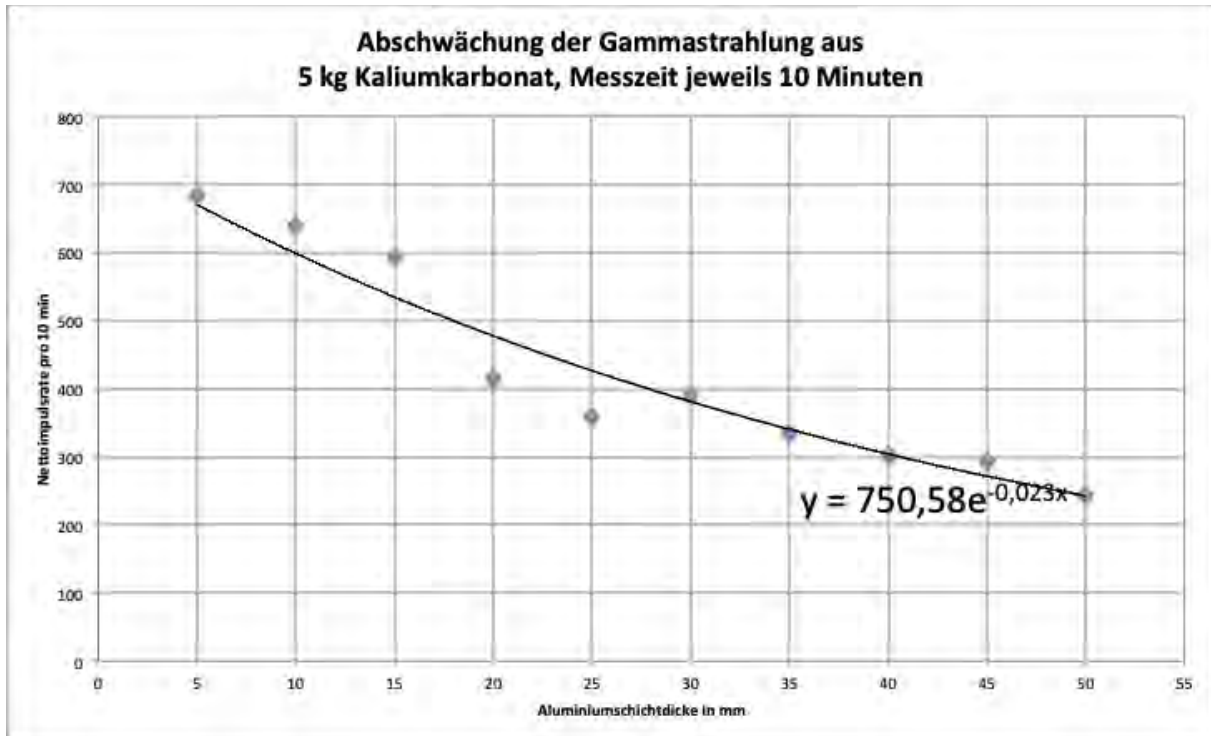
- 5 kg Kaliumkarbonat im Kunststoffeimer (Fa. Chemdiscount)
- Großflächenzählrohr (Inspector oder Ranger, Fa. S.E. International)
- 10 Aluminium-Bleche 10 cm x 10 cm x 5 mm

Durchführung: Auf das im Eimer mit Papier abgedeckte Kaliumkarbonat werden schrittweise die einzelnen Aluminiumbleche gestapelt. Die durchdringende Strahlung wird jeweils mit dem aufgelegten Messgerät erfasst.



Abb. 5:

Messwerte:



Auswertung:

Die Abschwächung elektromagnetischer Strahlung beim Durchgang durch Materie kann durch das exponentielle Schwächungsgesetz beschrieben werden (Lambert-Beersches Gesetz):

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Dabei ist d die Schichtdicke des Materials und $I(d)$ die Intensität (Impulse pro Zeit). I_0 ist in diesem Fall die Intensität nach dem Durchgang durch 1,25 mm Blei, welches die Betastrahlung vollständig herausfiltert. Der Abschwächungskoeffizient μ ermöglicht die Berechnung der energie- und materialspezifischen Halbwertsdicke oder Halbwertschicht, in der die Hälfte der eintreffenden Strahlungsenergie absorbiert wird:

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Mit den aufgenommenen Messwerten ergibt sich $d_{1/2}(\text{Al}) = 25$ mm. Charakteristische Literaturwerte für die Energie der K-40-Gammastrahlung ($E_\gamma = 1,3$ MeV) liegen im Bereich von 42 mm (für $E_\gamma = 1,0$ MeV) bis 51 mm (für $E_\gamma = 1,5$ MeV). [8]

Auch längere Messzeiten ergeben systematisch jeweils etwas geringere als die tabellierten Halbwertsdicken. Dies kann mit der Energieabschwächung der einzelnen Photonen durch Wechselwirkungen bereits auf dem Weg durch das Kaliumkarbonat erklärt werden. Hinzu kommt ein recht geringer Abstandseffekt durch den höher wachsenden Stapel.

Messreihe zum Abstandsgesetz für Gammastrahlung aus Kaliumkarbonat

Material:

- 5 kg Kaliumkarbonat im Kunststoffeimer (Fa. Chemdiscount)
- Großflächenzählrohr (Inspector oder Ranger, Fa. S.E. International)
- 2 Aluminium-Bleche 25 cm x 25 cm x 1,5 mm
- Abstandshalter aus Pappe ohne Gammaabsorption (Milchtüten)

Durchführung:

1. Bestimmen Sie den Nulleffekt des Zählgerätes für 50 Minuten. (1580 Impulse)
2. Decken Sie den geöffneten Kunststoffeimer mit den beiden Aluminiumblechen (3 mm) zur Abschirmung der Betastrahlung ab.
3. Bestimmen Sie zunächst die Impulsrate pro 50 Minuten direkt auf den Al-Platten.
4. Wiederholen Sie die Messung mit jeweils 50 Minuten Messzeit und vergrößern Sie dabei schrittweise den senkrechten Abstand des Zählgerätes über den Metallplatten. Achten Sie auf eine mittige Anordnung des Zählrohres.
5. Berechnen Sie jeweils die Impulsraten, die auf γ -Strahlung aus K_2CO_3 zurückgehen.
6. Zeichnen Sie ein Diagramm der absoluten Messwerte auf Millimeterpapier (x-Achse: Abstand des Zählgerätes von der Aluminiumoberfläche plus 10 cm; y-Achse: Impulsrate in Imp./50 Minuten)
7. Berechnen Sie die theoretischen Verläufe der Impulsraten für die verschiedenen Abstände für ein Abstandsgesetz $I \sim 1/r$ (Flächenstrahler) und für ein Abstandsgesetz $I \sim 1/r^2$ (Punktstrahler) jeweils beginnend mit dem Messwert für $r = 10$ cm.
8. Zeichnen Sie die beiden theoretischen Kurvenverläufe ebenfalls in das Diagramm ein und vergleichen Sie mit den Messwerten. Die Messkurve verläuft in der Regel zwischen den beiden theoretischen Kurven und nähert sich mit wachsendem Abstand der Regel für eine punktförmige Strahlenquelle.

Messwerte:

Abstand zum Zentrum der kugelförmig angenommenen Masse von 5kg Kaliumkarbonat (10 cm unter dem Al)	Roh- Impulsrate in Impulse pro 50 Minuten	Impulsrate I aus K_2CO_3 in Impulse pro 50 Minuten	Theoretischer Verlauf für $I \sim 1/r$ in Impulse pro 50 Minuten	Theoretischer Verlauf für $I \sim 1/r^2$ in Impulse pro 50 Minuten
10 cm (K_2CO_3 plus 3 mm Al)	3440	1860	1860	1860
12,0 cm	3005	1425	1550	1292
16,0 cm	2676	1096	1163	727
20,0 cm	2354	774	930	465
25,0 cm	2178	598	744	298
30 cm	2005	425	630	214
35 cm	1919	339	531	151



Literatur und Bezugsquellen

- [1] <https://diacleanshop.com> (4.1.2021)
- [2] <https://mekruphy.com/de/> (4.1.2021)
- [3] <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-einfuehrung/versuche/kalium-40-lebensmitteln> (4.1.2021)
- [4] <https://www.radioaktivitaet-zum-anfassen.com> (15.1.2021)
- [5] Schildhauer, Heinz: Die Gammastrahlung des Kaliums, Dissertation Berlin, 1935
- [6] Stolze, Werner: Radioaktivität. Teubner, Stuttgart, 2003
- [7] <https://www.lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/7317/> (4.1.2021)
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Halbwertsschicht> (4.1.2021)