

V14

## **Tomographie mit $\gamma$ -Strahlung**

Tahir Kamcili  
tahir.kamcili@udo.edu

Marina Andreß  
marina.andress@udo.edu

Durchführung: 11.04.2022

Abgabe: 15.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Tomographie . . . . .	3
2.2	Wechselwirkung von Materie mit Gamma-Strahlung . . . . .	3
2.3	Radioaktiverzerfall . . . . .	4
2.4	Abschwächung . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Aufbau und Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1	Aufbau . . . . .	5
3.2	Szintillationsdetektor . . . . .	7
3.3	Durchführung . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1	Untersuchung des Spektrums . . . . .	9
4.2	Bestimmung der Absorptionskoeffizienten . . . . .	10
4.2.1	Würfel 2 . . . . .	10
4.2.2	Würfel 3 . . . . .	11
4.2.3	Würfel 4 . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>13</b>
	<b>Literatur</b>	<b>14</b>

# 1 Ziel

Ziel des Versuches war es die Zusammensetzung eines 3x3x3-Würfels in einer Ebene des Würfels zu bestimmen, wobei die einzelnen Teilwürfel aus verschiedenen Metallen oder Kunststoff besteht.

## 2 Theorie

### 2.1 Tomographie

Die Computer-Tomographie ist ein Verfahren, welches viel Anwendung in der heutigen Medizin findet. Durch dieses Verfahren werden Querschnitte erzeugt und durch die Untersuchung mehrerer Schichten kann so ein 3 Dimensionales Bild generiert werden. In der Regel wird in der Medizin Röntgenstrahlung genutzt, in der Industrie kommen aber auch immer wieder Ultraschallwellen zum Einsatz um die Zusammensetzung von Objekten zu bestimmen.

Durch unterschiedliche Absorptionskoeffizienten und die Bestrahlung/Beschallung des Targets aus verschiedenen Winkeln kann ein Bild erzeugt werden. Da in dem Versuch eine radioaktive Quelle zum Einsatz kam, wird sich in diesem Protokoll auf die Untersuchung von Objekten mit  $\gamma$ -Strahlung beschränkt.

### 2.2 Wechselwirkung von Materie mit Gamma-Strahlung

Die Quelle der  $\gamma$ -Strahlung ist im Versuch der Zerfall eines radioaktiven Isotops. In diesem zerfällt der Kern unter Aussendung eines  $\gamma$ -Quants in ein energetisch günstigeren Zustand. Das Spektrum der  $\gamma$ -Strahlung diskret.

$\gamma$ -Strahlung wechselt wirkt hauptsächlich in 3 verschiedenen Prozessen mit Materie. Diese sind der Photoeffekt, die Compton-Streuung, sowie die Paarerzeugung.

1. **Photo-Effekt:** Beim Photoeffekt wird ein Photon vollständig von einem gebundenen Elektron absorbiert so, dass dieses aus seiner Bindung herausgelöst wird. Dafür muss die Energie des  $\gamma$ -Quants ( $E_\gamma = hf$ ) mindestens die Bindungsenergie  $E_B$  des Elektrons an den Kern betragen. Die kinetische Energie des Elektrons lässt sich somit bestimmen zu

$$E_e = E_\gamma - E_B \quad (1)$$

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ist  $\propto Z^5 E_\gamma^{-3,5}$ , daher dominiert im Allgemeinen der Photoeffekt bei Energien  $< 100\text{keV}$  und bei Kernen mit einer hohen Ladungszahl  $Z$ .

2. **Comptonstreuung:** Bei der Comptonstreuung, auch inelastische Streuung genannt, trifft ein Photon auf ein quasi-freies Elektron. Das Photon gibt dabei einen Teil seiner Energie  $\delta E$  ab, sodass die Wellenlänge um  $\delta\lambda = \lambda' - \lambda$  verändert wird. Wichtig für den Energieübertrag ist dabei der Winkel in dem das Photon auf das Elektron trifft. Der Energieübertrag wird maximal für  $180^\circ$ . Zudem werden beide

Teilchen von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt, sodass eine Streuung statt findet.

Die Comptonstreuung dominiert für Energien im Bereich von 100keV - 1MeV.

3. **Paarerzeugung:** Bei der Paarerzeugung zerfällt ein Photon in einem Coulombfeld eines Teilchens in ein Teilchen-Antiteilchen Paar. Die benötigte Mindestenergie für ein  $\gamma$ -Quant ist gesetzt durch die doppelte Masse des Elektrons (da diese identisch mit der Masse des Positrons ist), da dieses Pärchen das leichteste ist, in welches es zerfallen kann. Somit ist die Mindestenergie gegeben durch

$$E_{\gamma} = 2m_e c^2 \approx 1,02 \text{ MeV}.. \quad (2)$$

Da in diesem Versuch lediglich Energien bis  $E_{\gamma} = 662 \text{ keV}$  erreicht werden, spielt der Effekt der Paarerzeugung keine wichtige Rolle.

### 2.3 Radioaktiverzerfall

Wie bereits oben beschrieben wird als  $\gamma$ -Strahlungsquelle ein radioaktiver Zerfall benutzt. Es kann entweder ein  $^{60}\text{Co}$  oder  $^{137}\text{Cs}$ -Strahler genutzt werden. Da im Versuch eine  $^{137}\text{Cs}$  Quelle verwendet wurde wird exemplarisch nur auf diesen Zerfall eingegangen.

Im dominierenden Zerfallskanal, mit einer Zerfallswahrscheinlichkeit von 94,4%, zerfällt  $^{137}\text{Cs}$  in einen angeregten Zustand vom Barium  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Welches dann unter Emission eines Photons in den Grundzustand vom Barium  $^{137}\text{Ba}$  übergeht. Bei diesem Zerfall entsteht eine mittlere Photonenenergie von  $E_{\gamma} = 661,7 \text{ keV}$  [1]. Der Zerfall ist ebenfalls in Abbildung (1) dargestellt.

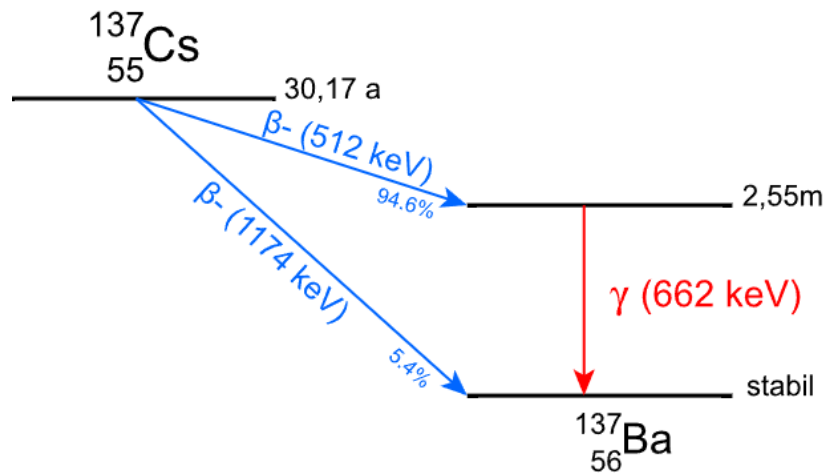


Abbildung 1: Zerfall eines  $^{137}\text{Cs}$  Atoms [1]

## 2.4 Abschwächung

Wenn Strahlung Materie durchdringt, wechselwirkt sie mit dieser. Dadurch verliert sie Energie und es wird von einer Abschwächung gesprochen. Bei einer nicht kontinuierlichen Intensitätsverteilung kann die Intensitätsveränderung beschrieben werden durch

$$N = I_0 \exp \left( - \sum_i \mu_i d_i \right) . \quad (3)$$

Dabei sind  $\mu_i$  die Absorptionskoeffizienten,  $I_0$  die Eingangsintensität und  $d_i$  die Länge der Strecke, in welcher die Strahlung wechselwirkt. Dies lässt sich nun umstellen zu

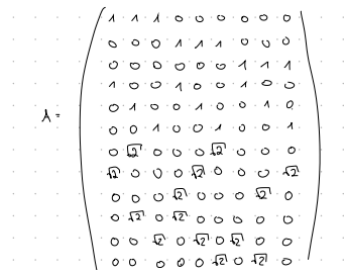
$$\sum_i \mu_i d_i = \log \left( \frac{I_0}{N_j} \right) = I_i . \quad (4)$$

Hierbei steht  $N_j$  für die jeweils gemessenen Ausgangsintensitäten, also der Intensität die nach dem Durchgang durch das Target gemessen wurde. Aus diesem Zusammenhang kann ein LGS (kurz für Lineares Gleichungssystem) aufgestellt werden.

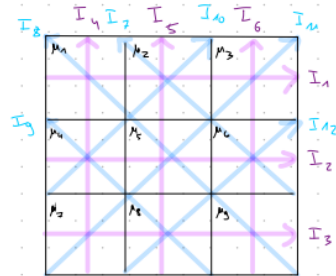
Da im Versuch ein 3x3-Würfel tomographisch untersucht wurde, kann eine 9 x 12 Matrix  $\underline{\underline{A}}$  in dem Zusammenhang

$$\underline{\underline{A}} \vec{\mu} = \vec{I} \quad (5)$$

aufgestellt werden. Das LGS wird bewusst überbestimmt aufgestellt (Mess-)Fehleranfälligkeiten zu senken, sodass die Matix (passend zu den Strahlengängen in der Abbildung 2b) aussieht, wie in Abbildung 2a dargestellt ist.



(a) Matrix A



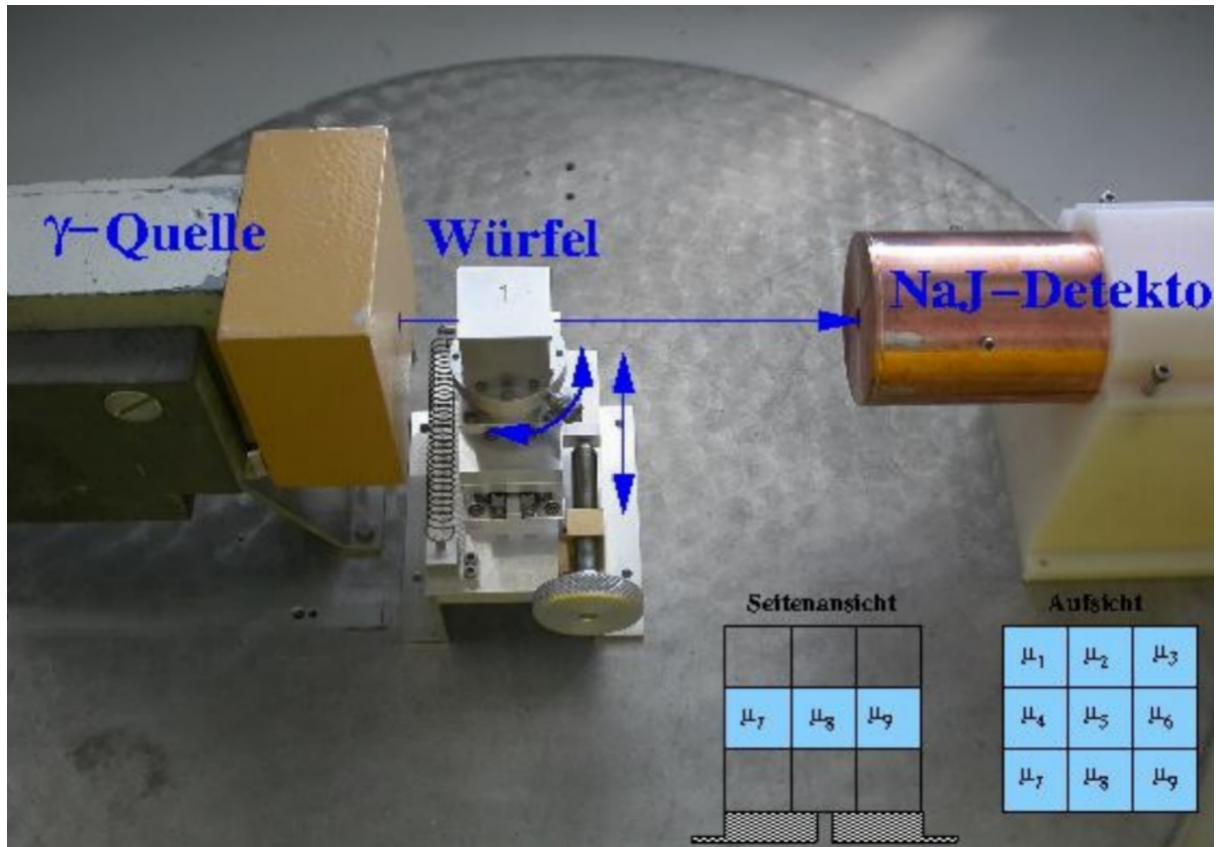
(b) Schematische Darstellung der Strahlengänge durch den Würfel

## 3 Aufbau und Durchführung

### 3.1 Aufbau

Der Aufbau des Versuches ist relativ simpel (3) . Auf der einen Seite befindet sich die Strahlungsquelle, in unserem Fall Cs-137, welches von großes Bleiböcken abgeschirmt wird, sodass ein schmaler Strahl entsteht. Gegenüber von der Quelle befindet sich ein NaJ-Detektor. Mit diesem wird die  $\gamma$ -Strahlung detektiert.

Unterhalb des Strahlengangs befindet sich eine Platte, auf welche sich Proben montieren lassen. Diese lässt sich verschieben und drehen. Im Versuch wurden auf dieser mehrere Würfel platziert. 2 waren gefüllt mit einem unbekannten Metall, einer war leer (für eine Referenzmessung) und einer war gefüllt mit 27 kleineren Würfeln, welche das Volumen des großen Würfels füllen.



**Abbildung 3:** Foto vom Aufbau des Experimentes [9]

Da die Platte nicht in der Höhe verstellbar war wurde lediglich die 2. Schicht des Würfels gemessen, sodass nur eine Bestimmung von 9 kleineren Würfeln möglich war. Der Aufbau ist in der Abbildung 4 dargestellt.

Als mögliche Stoffe kommen nur Aluminium, Blei, Eisen, Messing ( $Cu_{0.63}Zn_{0.37}$ ) und Delrim (POM) infrage [9].

Als zusätzliche Aubaute wird ein Multichannelanalyzer (kurz MCA) genutzt. Mithilfe diesem werden elektrische Impulse mit unterschiedlichen Amplituden ihrer Häufigkeit nach sortieren.

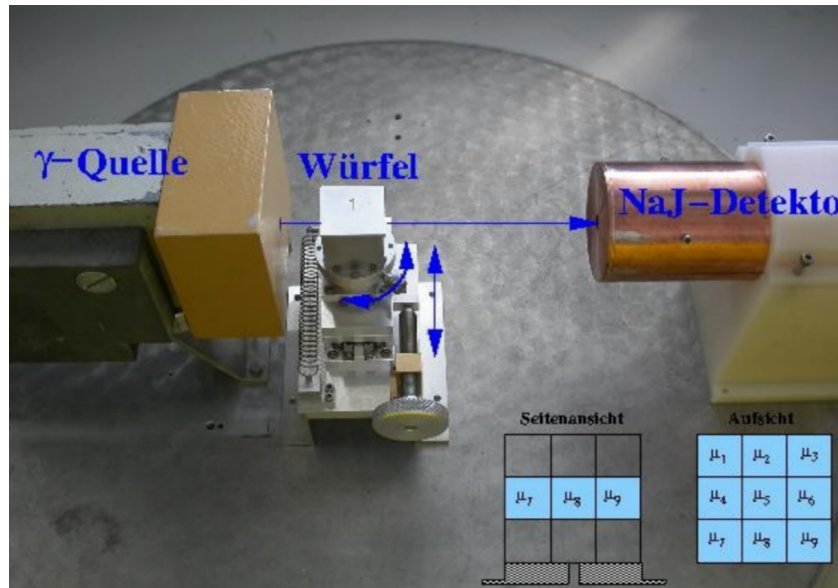


Abbildung 4: Versuchsaufbau [9]

### 3.2 Szintillationsdetektor

Mithilfe eines Szintillationsdetektors kann die Energie und Intensität von ionisierender Strahlung bestimmt werden. Dieser kann aus organischen, aber auch aus anorganischen Stoffen bestehen. Der im Versuchsaufbau verwendete Szintillationsdetektor nutzt einen anorganischen Natriumiodidkristall, welcher, wenn eine Energie größer als die Anregungsenergie dessen in ihn eindringt, sogenannte 'Lichtblitze' erzeugt, die durch einen Bandwechsel von angeregten Elektronen entstehen. Die freigesetzten Photonen werden mithilfe eines Photomultipliers detektiert. Der Strom der in dem Photomultiplier entsteht ist proportional zu der Energie des  $\gamma$ -Quants, welches für die Erzeugung des detektierten Photons durch den Photomultiplier verantwortlich ist.

### 3.3 Durchführung

Zur Hilfe mit der Messung wird das Programm MAESTRO genutzt. Zuerst wird ein Spektrum der verwendeten Quelle genutzt. Gemessen wird solange bis mindestens am Peak 1112 Impulse gemessen wurden. Da eine relative Unsicherheit  $< 0,03$  gewünscht ist und kann mithilfe des Zusammenhangs

$$\frac{\sqrt{N}}{N} = 0,03 \leftrightarrow N = \frac{1}{0,03^2} \approx 1112 \quad (6)$$

die Mindestanzahl an Peaks so ermittelt werden. Das Programm zeigt dies an, sodass einfach die Messung auf einen USB Stick exportiert werden können.

Bei dem leeren Würfel, dem 2 Würfel und dem 3x3x3 Würfel wurden alle Strahlengänge nach der Abbildung 2b gemessen. Beim 3. Würfel wurden lediglich die Strahlengänge

1,2,3,10,11,12 gemessen.

Da das Programm automatisch nach 300s aufhört musste bei dem 3. Würfel der Strahlengang 11 und beim 3x3 Würfel der Strahlengang 8 und 11 2 mal gemessen und später in der Auswertung addiert werden, um die Messunsicherheiten gering zu halten.

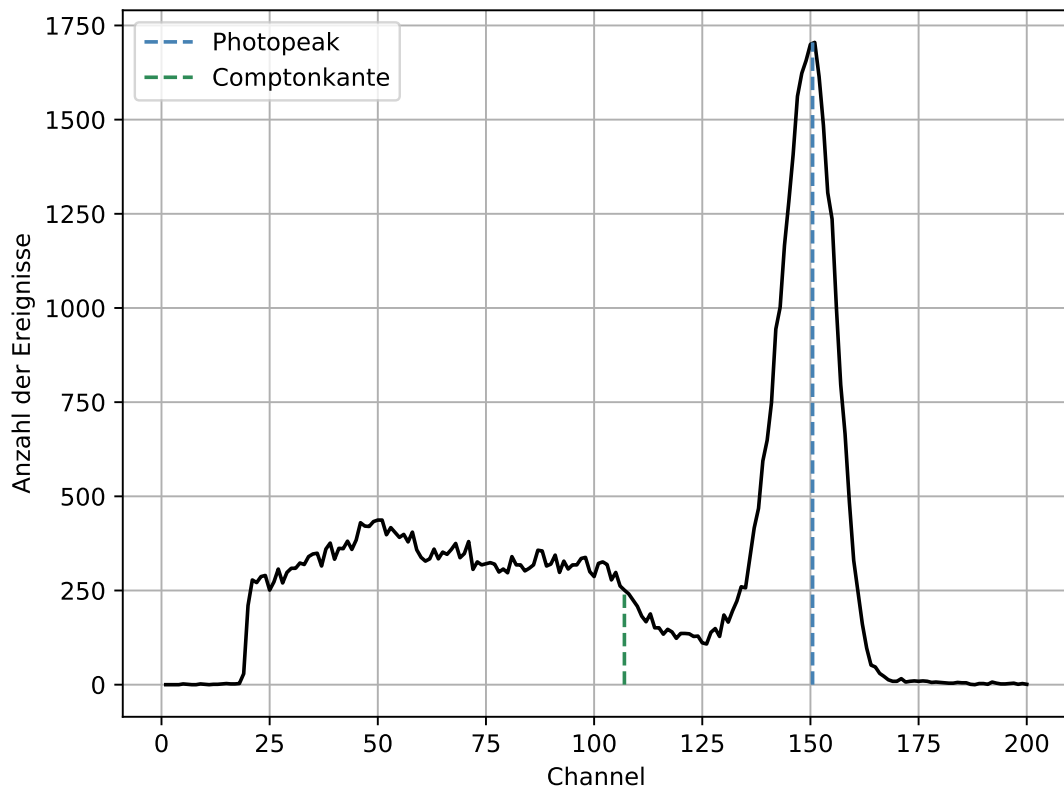


## 4 Auswertung

Alle Berechnungen werden mit Python mithilfe des Pakets NumPy [7] durchgeführt und alle Plots mit matplotlib [3] erstellt. Die Fehlerrechnung erfolgt mit dem Paket uncertainties [5].

### 4.1 Untersuchung des Spektrums

Das Spektrum der Caesium-Quelle mit Würfel 1 im Durchgang ist in Abbildung 5 dargestellt. Zu erkennen ist die Anzahl der gemessenen Ereignisse in dem jeweiligen Channel, in dem sich die Ereignisse befinden.



**Abbildung 5:** Spektrum der Caesium-Quelle.

In dem Plot sind außerdem der Photopeak und die Comptonkante markiert. Bei Caesium liegen die Energien dieser Größen bei  $E_P = 662 \text{ keV}$  und  $E_C = 478 \text{ keV}$ .

## 4.2 Bestimmung der Absorptionskoeffizienten

Im folgenden wird die Nullmessung ausgewertet, wobei sich bei der Messung nur die Aluminiumhülle (Würfel 1) im Strahlengang befindet, die Teil jedes Würfels ist. Die aufgenommenen Werte befinden sich in Tabelle 1. Die Intensitäten  $I$  werden durch

$$I = \frac{N}{t} \quad (7)$$

bestimmt.

Projektion	Counts	$\Delta t / s$	$I_0 / \frac{1}{s}$
1	1705	150	$11.367 \pm 0.275$
2	1440	135	$10.667 \pm 0.281$
3	1571	142	$11.063 \pm 0.279$
4	2111	166	$12.717 \pm 0.277$
5	1424	102	$13.717 \pm 0.369$
6	2444	180	$13.578 \pm 0.275$
7	1633	165	$9.897 \pm 0.245$
8	1554	115	$13.513 \pm 0.343$
9	1126	107	$10.523 \pm 0.314$
10	1434	110	$13.036 \pm 0.344$
11	1432	102	$14.039 \pm 0.371$
12	1036	76	$13.632 \pm 0.424$

**Tabelle 1:** Messwerte der  $I_0$  Messung mit Würfel 1.

### 4.2.1 Würfel 2

Aus den Messdaten werden die Absorptionskoeffizienten  $\mu_i$  nach

$$\mu_i = \frac{\ln(\frac{I_0}{I_i})}{d_i} \quad (8)$$

bestimmt. Dabei ist  $d_i$  die Strahlenlänge durch den Würfel je nach Projektion. Es gilt:

$$\begin{aligned} d_{1,2,3,4,5,6} &= 3 \text{ cm} && \text{Senkrechte} \\ d_{7,9,10,12} &= 2\sqrt{2} \text{ cm} && \text{Nebendiagonale} \\ d_{8,11} &= 3\sqrt{2} \text{ cm} && \text{Hauptdiagonale} \end{aligned}$$

Im folgenden werden die negativen Absorptionskoeffizienten nicht betrachtet, da diese nicht physikalisch sind. Für Würfel 2 ergibt sich dann der gemittelte Absorptionskoeffizient  $\mu_2 = 0.1029 \frac{1}{\text{cm}}$ .

Projektion	Counts	$\Delta t / s$	$I_2 / \frac{1}{s}$	$\mu / \frac{1}{cm}$
1	1770	180	$9.833 \pm 0.234$	0.048
2	1569	147	$10.673 \pm 0.269$	-0.0002
3	1185	99	$11.969 \pm 0.348$	-0.026
4	1731	150	$11.54 \pm 0.277$	0.032
5	1477	141	$10.475 \pm 0.273$	0.095
6	1417	123	$11.52 \pm 0.306$	0.055
7	1094	170	$6.435 \pm 0.195$	0.152
8	1580	150	$10.533 \pm 0.265$	0.059
9	1126	94	$11.979 \pm 0.357$	-0.045
10	1337	160	$8.356 \pm 0.229$	0.157
11	1805	199	$9.07 \pm 0.213$	0.103
12	1063	147	$7.231 \pm 0.222$	0.224

**Tabelle 2:** Messwerte von Würfel 2.

#### 4.2.2 Würfel 3

Analog zu Würfel 2 werden auch hier die Absorptionskoeffizienten bestimmt. Die dazugehörigen Daten befinden sich in Tabelle 3.

Projektion	Counts	$\Delta t / s$	$I_0 / \frac{1}{s}$	$\mu / \frac{1}{cm}$
1	199	300	$0.663 \pm 0.047$	0.947
2	152	300	$0.506 \pm 0.041$	1.016
3	165	300	$0.55 \pm 0.042$	1.000
10	156	300	$0.52 \pm 0.042$	1.130
11	95	300	$0.316 \pm 0.032$	0.892
12	310	300	$1.033 \pm 0.059$	0.911

**Tabelle 3:** Messwerte von Würfel 3.

Gemittelt ergibt sich für Würfel 3  $\mu_3 = 0.9827 \frac{1}{cm}$ .

#### 4.2.3 Würfel 4

Da Würfel 4 aus verschiedenen kleinen Würfeln besteht, werden die Absorptionskoeffizienten mit

$$\vec{\mu} = (A^\top W A)^{-1} (A^\top W \vec{I}) \quad (9)$$

bestimmt. Die Elemente der diagonalen Gewichtsmatrix  $W$  werden mithilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung nach

$$\sigma_j = \left( \sqrt{\left( \frac{\sigma_{I_0}}{I_0} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{I_j}}{I_j} \right)^2} \right)$$

$$W_{jj} = \sigma_j^{-1}$$

berechnet.

Projektion	Counts	$\Delta t / s$	$I_0 / \frac{1}{s}$	$W_{jj}$
1	987	300	$3.29 \pm 0.105$	25.002
2	1048	300	$3.493 \pm 0.108$	24.628
3	1132	300	$3.773 \pm 0.112$	25.65
4	1607	141	$11.397 \pm 0.284$	30.206
5	212	300	$0.707 \pm 0.049$	13.584
6	1917	169	$11.343 \pm 0.259$	32.776
7	1558	300	$5.193 \pm 0.132$	28.237
8	669	300	$2.23 \pm 0.086$	21.625
9	1248	300	$4.16 \pm 0.118$	24.329
10	2018	268	$7.529 \pm 0.168$	28.953
11	373	300	$1.243 \pm 0.064$	17.202
12	1111	300	$3.703 \pm 0.111$	23.153

**Tabelle 4:** Messwerte von Würfel 4.

Daraus ergeben sich nach Gleichung 9 folgende Absorptionskoeffizienten für Würfel 4 in Tabelle 5.

j	$\mu_j / \frac{1}{cm}$
1	2.011
2	0.562
3	2.284
4	4.701
5	-3.650
6	3.661
7	2.779
8	-1.119
9	3.641

**Tabelle 5:** Absorptionskoeffizienten von Würfel 4.

## 5 Diskussion

Nun werden die experimentell bestimmten Absorptionskoeffizienten mit den Literaturwerten aus Tabelle 7 verglichen.

Eisen	Aluminium	Blei	Messing	Delrin
0.578	0.202	1.245	0.62	0.118

**Tabelle 6:** Literaturwerte der Absorptionskoeffizienten [8] [2].

Dem homogenen Würfel 2 mit dem bestimmten Absorptionskoeffizient  $\mu_2 = 0.1029 \frac{1}{cm}$  ist mit einer relativen Abweichung von 12.79% das Material Delrin zuzuordnen.

Würfel 3 kann mit dem bestimmten Wert  $\mu_3 = 0.9827 \frac{1}{cm}$  mit einer Abweichung von 21.07% das Material Blei zugeordnet werden.

Die bestimmten Absorptionskoeffizienten von Würfel 4 befinden sich in Tabelle 4. Im folgenden werden erneut die negativen Werte nicht berücksichtigt, da sie physikalisch nicht sinnvoll sind. In Tabelle ?? befinden sich die zugeordneten Materialien und relative Abweichungen der einzelnen Würfel.

Einzelwürfel	Material	rel. Abw. / %
1	Blei	61.53
2	Eisen	2.75
3	Blei	83.48
4	Blei	277.57
5		
6	Blei	194.08
7	Blei	123.21
8		
9	Blei	192.46

**Tabelle 7:** Materialien der Elementarwürfel in Würfel 4.

Aufgrund der hohen Abweichungen und der fast ausschließlichen Zuordnung von Blei wird die Messung von Würfel 4 als nicht erfolgreich angesehen.

Mögliche Fehlerquellen dafür sind systematische Fehler bei der Messung. Die Auffächerung des Strahls ist eine weitere mögliche Ursache von Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der Absorptionskoeffizienten der Elementarwürfel, da der Strahl auch nebenliegende Elementarwürfel treffen kann und so die gemessene Intensität beeinflusst. Des Weiteren ist die Justierung der Würfel im Allgemeinen eine Fehlerquelle die sich auf die Messung auswirken kann.

## Literatur

- [1] *Abbildung für den Zerfall von Cs-137*. 2022. URL: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-fortfuehrung/versuche/gammaspektrum-von-cs-137>.
- [2] Reichelt Chemietechnik GmbH. *polyoxymethylen*. URL: <https://www.rct-online.de/de/RctGlossar/detail/id/17> (besucht am 04.11.2022).
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] *Literaturwert für spezifische Wärmekapazität von Wasser*. 2020. URL: [https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische\\_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html](https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html) (besucht am 01.11.2020).
- [7] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [8] HUG Technik. *Metallische Werkstoffe, Physikalische Eigenschaften*. URL: <https://www.hug-technik.com/inhalt/ta/metall.htm> (besucht am 04.11.2022).
- [9] *Versuchsanleitung zu Versuch V14*. Fakultät Phyik, TU Dortmund. 2022.