

S2 – Strahlenschutz

Physikpraktikum

Tobias Krähling
eMail: <Tobias.Kraehling@SemiByte.de>
Homepage: <www.SemiByte.de>

21.10.2007
Version: 1.1

Stichworte: Strahlenschutz, Radioaktivität, Radioaktiver Zerfall, Zerfallskonstante, Halbwertszeit, Protactinium, Uran-Radium-Reihe

Literatur: [Kuc94], [Lin93], [Hau92], [MSH⁺04] [Wik07b], [Wik07a]

1. Aufgabenstellung

1. Bestimmung der Zerfallskonstanten und Halbwertszeit von ^{234}Pa .

2. Strahlenschutz

Bereits durch natürliche Strahlung sind wir ständig einer Strahlenbelastung ausgesetzt, durch den natürlichen Zerfall von instabilen Nukliden in der Erde bzw. im Wasser, durch die kosmische Strahlung sowie instabilen Nukliden, die wir mit der Nahrung aufnehmen. Zusätzlich werden wir durch künstliche Strahlung wie beispielsweise medizinische Untersuchungen, Strahlung durch Kernkraftwerke sowie die Strahlung von Fernsehern und Computern belastet. Die mittlere Strahlenbelastung (Äquivalentdosis) durch die o. g. Faktoren in Deutschland beträgt etwa 4 mSv/a. Die Äquivalentdosis D_q ist ein Maß für die biologische Wirkung von Strahlung und hängt sowohl von der Energiedosis D ab – diese gibt an, wie viel Energie E eine bestimmte Masse m eines bestrahlten Stoffes aufnimmt –, als auch von einem Qualitätsfaktor q für die Art der Strahlung¹.

$$D = \frac{E}{m} \quad ; \quad D_q = Dq \quad ; \quad [D] = \text{Gy} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad ; \quad [D_q] = \text{Sv} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (1)$$

Bei größerer Strahlenexposition können Schäden am organischen Gewebe auftreten, sowohl somatische Schäden wie Organschäden und Krebs, wie auch genetische Schäden (Erbkrankheiten, Mißbildungen, Mutationen. . .). Daher ist der Umgang mit radioaktiver und ionisierender Strahlung in verschiedenen Gesetzen und Verordnungen geregelt (Atomgesetz AtG, Strahlenschutzvorsorgegesetz StrVG, Röntgenverordnung RöV, Strahlenschutzverordnung StrlSchV).

2.1 Praktischer Strahlenschutz

Grundprinzip beim Strahlenschutz ist, die Strahlenexposition so gering wie möglich zu halten. Beim Umgang mit radioaktiver oder ionisierender Strahlung sollten daher die folgenden Schutzmaßnahmen für die Reduzierung der Strahlenexposition getroffen werden:

¹Größe der Qualitätsfaktor: $q \approx 1$ für γ -, β - und Röntgenstrahlen, $q \approx 3 \dots 5$ für thermische (langsame) Neutronen, $q \approx 10$ für α -Strahlung, Protonen und schnelle Neutronen, $q \approx 10 \dots 20$ für schwere geladene Teilchen hoher Energie [Lin93, S. 556]

- Der Abstand zur Strahlungsquelle sollte so groß wie möglich gehalten werden. Bei doppeltem Abstand reduziert sich die Dosis auf ein Viertel (Dosis $\sim 1/R^2$).
- Die verschiedenen Strahlungsquellen sollten möglichst vollständig mit geeigneten Mitteln abgeschirmt werden.
 - α -Strahlung: Blatt Papier
 - β -Strahlung: Aluminium min. 2 mm²
 - Röntgenstrahlung: Blei min. 1 mm
 - γ -Strahlung: Blei min. 5 cm
 - Neutronenstrahlung: Beton min. 50 cm

Zu beachten ist, daß Röntgen- und Gammastrahlung nur geschwächt werden kann, eine vollständige Abschirmung ist nicht möglich.

- Die Expositionszeit sollte so kurz wie möglich sein. Dies bedeutet insbesondere, daß die Arbeitsvorgänge vorausschauend organisiert und geplant werden sollten, die Strahlungsquelle sollte nur direkt zum Experiment aus der Lagerungsabschirmung entnommen und sofort nach Ende der Messung in diese wieder verbracht werden (Dosis = Dosisleistung mal Zeit).

3. Grundlagen zum Demo-Versuch

Radioaktive Strahlung entsteht bei spezifischen Kernprozessen und wird daher auch als Kernstrahlung bezeichnet (im Gegensatz zur Röntgenstrahlung oder Synchrotronstrahlung, die durch Beschleunigung/Abbremsung von Elektronen entstehen). Die auftretende Strahlung kann dabei eingeteilt werden in

α -Strahlung: besteht aus Helium-Kernen;

β^\pm -Strahlung: besteht aus Elektronen (β^-) bzw. Positronen (β^+);

γ -Strahlung: elektromagnetische Strahlung (Quanten) mit einer Wellenlänge von etwa 10^{-12} m und kleiner, hochenergetisch;

n - und p -Strahlung: Neutronen- und Protonenstrahlung ist nur künstlich herstellbar (z. B. bei der Kernspaltung).

Der radioaktive Zerfall von Kernen ist ein statistisches Ereignis – bei der Betrachtung nur eines isolierten instabilen Atomkerns kann nicht vorhergesagt werden, wann dieses zerfällt. Über die Betrachtung einer größeren Anzahl an instabilen Atomkernen können jedoch über statistische Ansätze einige Eigenschaften der Radioaktivität des betrachteten Stoffes bestimmt werden: die Zerfallskonstante und die Halbwertszeit. Man betrachte hierfür die Zahl der radioaktiven Kerne zur Zeit t [$N(t)$], die Zahl der Zerfälle in einem Zeitintervall Δt [ΔN] und die Zahl der nach dem Zeitintervall Δt noch verbliebenen aktiven Kerne [$N(t) - \Delta N$]. Der Ansatz ist nun, daß die Zahl der Zerfälle in einem Zeitintervall Δt proportional zu der Anzahl der radioaktiven Kerne ist:

$$\Delta N \sim -N(t)\Delta t$$

Mit der Einführung einer Proportionalitätskonstanten λ – die sog. Zerfallskonstante – kann dies als Gleichung geschrieben werden:

$$\Delta N = -\lambda N(t)\Delta t$$

Mittels Übergang von $\Delta N \rightarrow dN$ und $\Delta t \rightarrow dt$ und anschließender Integration folgt das Zerfallsgesetz, wobei N_0 die Anzahl an radioaktiven Kernen zum Zeitpunkt $t = 0$ darstellt³:

$$\text{Zerfallsgesetz: } N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

² β -Strahlung darf nicht zu schnell abgeregnet werden, da andernfalls wieder Bremsstrahlung auftritt.

³ $dN = -\lambda N(t) dt \Rightarrow -\lambda \int_0^t dt' = \int_{N_0}^N \frac{1}{N'} dN' \Rightarrow -\lambda t = \ln \frac{N}{N_0} \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gibt an, nach welcher Zeit die Hälfte der ursprünglich vorhandenen radioaktiven Kerne zerfallen sind.

$$\text{Halbwertszeit: } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

Die Gl. (3) kann dabei wie folgt aus Gl. (2) hergeleitet werden:

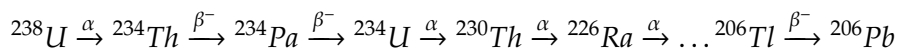
Gefordert ist, daß nach der Zeit $t = T_{1/2}$ die Hälfte der Kerne zerfallen sind, d. h. $N(t) = N(T_{1/2}) = \frac{1}{2}N_0$. Einsetzen in Gl. (2) liefert:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda T_{1/2} \Rightarrow \ln 2 = \lambda T_{1/2} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Häufig ist das Zerfallsprodukt eines radioaktiven Nuklids selbst nicht stabil und zerfällt weiter, eine Kette von Zerfällen bis zu einem stabilen Endkern wird Zerfallsreihe genannt (siehe beispielsweise die Uran-Radium-Reihe in Abschnitt 4). Dabei hängt die Aktivität der Tochterkerne von den Erzeugungsraten der Mutterkerne ab. Dies führt auch dazu, daß sämtliche Glieder einer Zerfallsreihe vorhanden sein können, wenn die Halbwertszeiten der Einzelkomponenten entsprechend groß genug sind.

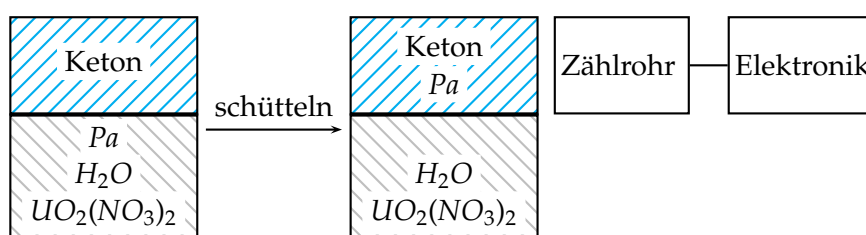
4. Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch soll die Zerfallskonstante und Halbwertszeit von Protactinium bestimmt werden. Das untersuchte Protactinium entstammt aus dem natürlichen Zerfall von ^{238}U (Uran-Radium-Reihe). Dabei zerfällt ^{238}U über die folgende Reihe bis zum stabilen Endprodukt ^{206}Pb :



Beim Protactinium 234 besteht dabei eine Kernisomerie (differente innere Zustände bei gleicher Kernladungs- und Massenzahl), die zu zwei unterschiedlichen Halbwertszeiten führen.

Das Problem hierbei ist, das Protactinium von dem Ausgangsstoff ^{238}U und den anderen Zerfallsprodukten zu trennen, um isoliert die Zerfallsereignisse des Protactiniums detektieren zu können. Hierzu wird ein chemischer Trick verwendet, die sogenannte Schüttelquelle. In einem Behälter befindet sich abgereichertes Uran (Isotop ^{235}U wurde entzogen) als Uranylнитrat in wässriger Lösung (saure Uransalzlösung) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$. Um das Protactinium von den anderen radioaktiven Anteilen zu separieren, befindet sich in der Schüttelquelle ebenfalls ein Keton (Carbonylverbindungen, bei der die Carbonylgruppe ($>\text{C}=\text{O}$) nicht endständig angeordnet ist), welches erstens das Protactinium bindet sowie zweitens leichter als Wasser ist, nicht wasserlöslich ist und sich daher oberhalb des Wassers anreichert. Wird der Behälter geschüttelt, so verbindet sich das Protactinium mit dem Keton und es bildet sich nach kurzer Zeit eine Grenzschicht, wobei sich oberhalb der Grenzschicht zum größten Teil das Protactinium mit dem Keton, im unteren Teil das Wasser, Uran sowie die weiteren Zerfallsprodukte befinden. Wird das Zählrohr nun so an die Schüttelquelle gebracht, daß Zerfälle aus dem oberen Bereich detektiert werden, so werden vorwiegend die Zerfälle vom Protactinium detektiert.



Die Zähltechnik mißt jeweils in einem 12 s-Intervall (Torzeit) die Anzahl der Impulse, daß angeschlossene Meßprogramm ermittelt anschließend aus den gemessenen Impulsen die Impulsrate R über $R = n/\Delta t$.

Wird die Impulsrate R über t aufgetragen, und dabei eine halblogarithmische Darstellung (der y -Achse) verwendet, erhält man eine Gerade, da gilt:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \underbrace{\log N(t)}_{=y} = \underbrace{-\lambda t \log e}_{=bt} + \underbrace{\log N_0}_{=a} \quad (4)$$

Damit kann nun die Zerfallskonstante λ sowie die hieraus die Halbwertszeit $T_{1/2}$ über die Steigung der Geraden ermittelt werden über

$$\lambda = -\frac{b}{\log e} \quad (5a)$$

$$T_{1/2} = -\frac{\ln 2 \cdot \log e}{b} \quad (5b)$$

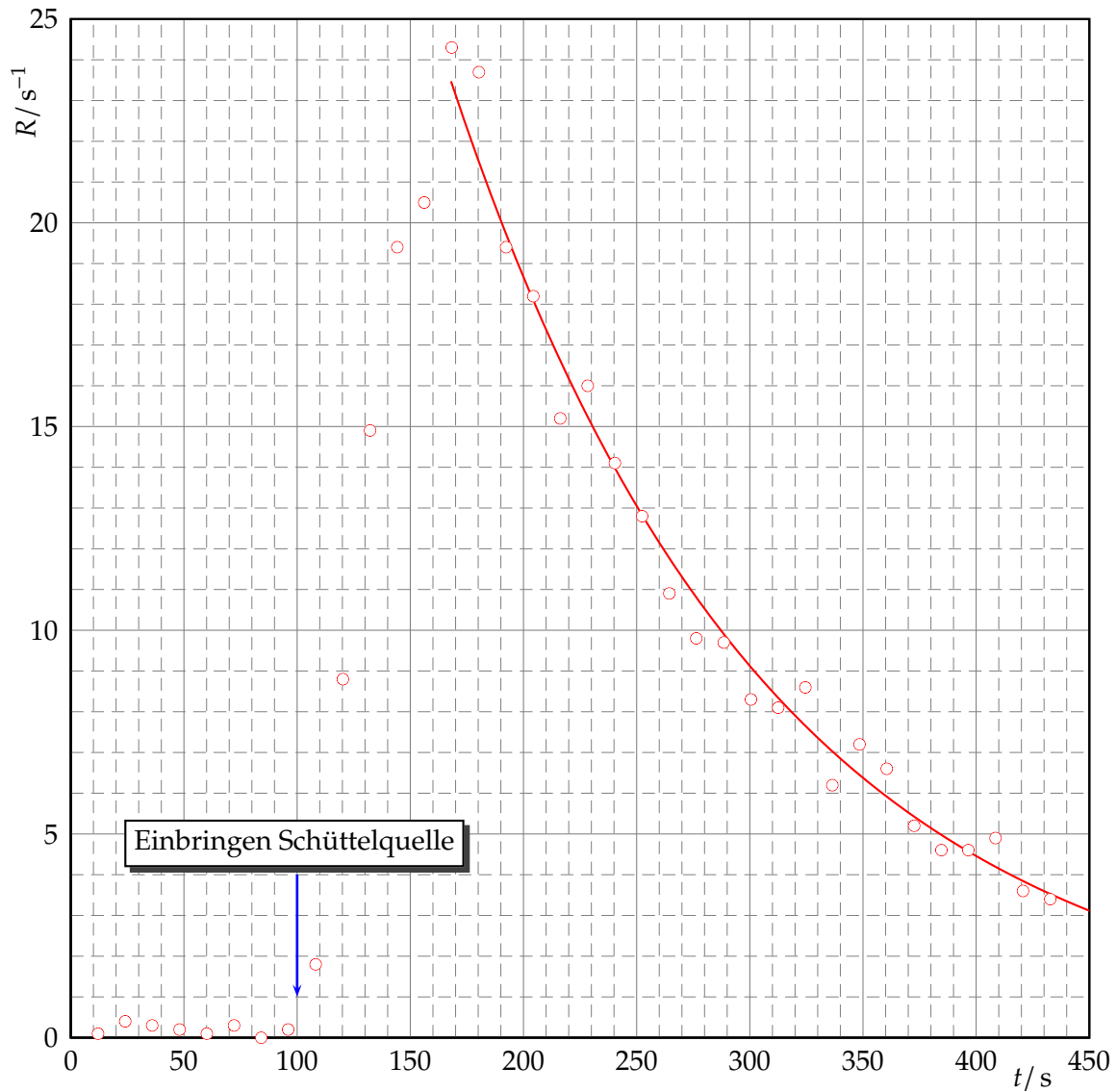
5. Meßwerte

i	t_i/s	R/s^{-1}	i	t_i/s	R/s^{-1}	$\log R/s^{-1}$	i	t_i/s	R/s^{-1}	$\log R/s^{-1}$
1	12	0,1	13	156,2	20,5	—	25	300,5	8,3	0,91908
2	24	0,4	14	168,3	24,3	1,3856	26	312,5	8,1	0,90849
3	36	0,3	15	180,3	23,7	1,3747	27	324,5	8,6	0,93450
4	48,1	0,2	16	192,3	19,4	1,2878	28	336,5	6,2	0,79239
5	60,1	0,1	17	204,3	18,2	1,2601	29	348,5	7,2	0,85733
6	72,1	0,3	18	216,3	15,2	1,1818	30	360,6	6,6	0,81954
7	84,1	0,0	19	228,4	16,0	1,2041	31	372,6	5,2	0,71600
8	96,1	0,2	20	240,4	14,1	1,1492	32	384,6	4,6	0,66276
9	108,2	1,8	21	252,4	12,8	1,1072	33	396,6	4,6	0,66276
10	120,2	8,8	22	264,4	10,9	1,0374	34	408,6	4,9	0,69020
11	132,2	14,9	23	276,4	9,8	0,99123	35	420,7	3,6	0,55630
12	144,2	19,4	24	288,5	9,7	0,98677	36	432,7	3,4	0,53148

Tabelle 1: Meßwerte

6. Auswertung

Der Nulleffekt ($i_1 - i_8$) muß hier nicht weiter berücksichtigt werden, da dieser nur zu einem Offset in vertikaler Richtung führt (Achsenabschnitt). Da für die weitere Auswertung lediglich die Steigung der Geraden benötigt wird und diese vom Achsenabschnitt unabhängig ist, ist eine Korrektur der gemessenen Impulsraten um den Nulleffekt nicht notwendig. Alle Meßwerte wurden in ein Norm-Norm-Diagramm eingetragen (Abb. 1). Die für die Auswertung relevanten Daten beginnen ab i_{14} , da ab hier die Separation beider Flüssigkeitsphasen abgeschlossen ist. Die Werte wurden in ein Norm-Log-Diagramm eingezeichnet (Abb. 2) und eine lineare Regression mit dem Statistikprogramm R durchgeführt, die hierüber ermittelten Werte sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Abbildung 1: $R(t)$ -Diagramm

$$a = (1,893 \pm 0,029) \text{ s}^{-1}$$

$$b = (-0,00311 \pm 0,00009) \text{ s}^{-1}$$

$$R^2 = 98,2\%$$

Tabelle 2: Werte der linearen Regression vom Typ $y = a + bx$

Mit der Steigung b und Gl. (5a) und (5b) kann die Zerfallskonstante und Halbwertszeit bestimmt werden zu:

$$\lambda = -\frac{b}{\log e} = 7,16 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$T_{1/2} = -\frac{\ln 2 \cdot \log e}{b} = 96,8 \text{ s}$$

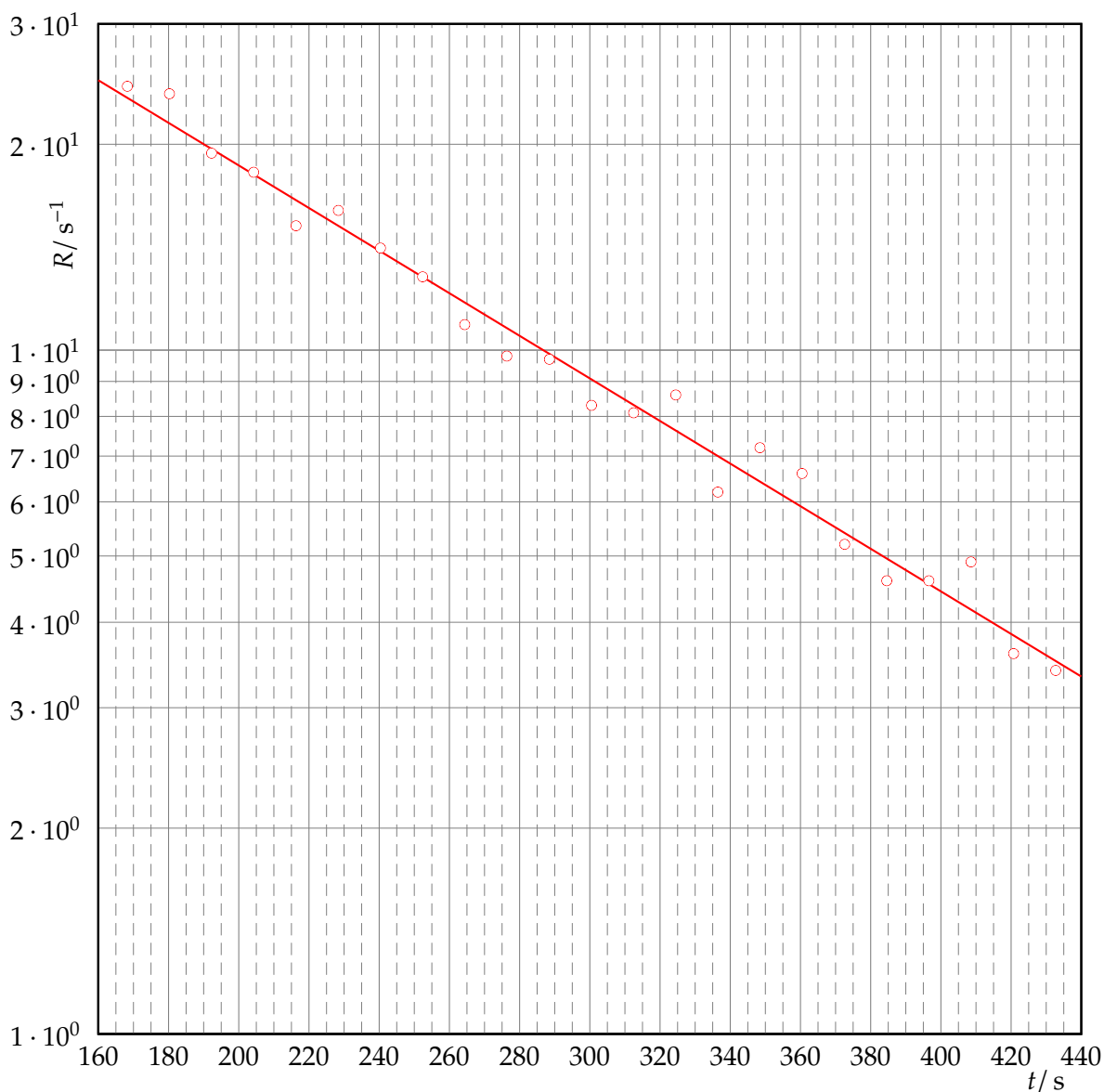


Abbildung 2: $(\log(R))(t)$ -Diagramm für $i \in [14,36]$

6.1 Fehlerabschätzung

In Tabelle 2 sind bereits die von R ermittelten Fehler für die Koeffizienten eingetragen, die im folgenden verwendet werden. Die Fehlerabschätzung wird über die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung durchgeführt, die hier einfach durchzuführen ist, da nur eine Größe berücksichtigt werden muß.

$$\Delta\lambda = \pm\lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2} = \pm 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta T_{1/2} = \pm T_{1/2} \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2} = \pm 2,8 \text{ s}$$

7. Ergebnis

Für die Zerfallskonstante von Protactinium ^{234}Pa konnte in dem Versuch ein Wert von $\lambda = (7,16 \pm 0,21) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} = 7,16 \cdot 10^{-3} (1 \pm 2,9\%) \text{ s}^{-1}$ ermittelt werden. Die Halbwertszeit konnte bestimmt werden zu $T_{1/2} = (96,8 \pm 2,8) \text{ s} = 96,8 (1 \pm 2,9\%) \text{ s}$. In der Literatur [Wik07b] wird ein Wert von $T_{1/2} = 6,7 \text{ h}$ für ^{234}Pa und $T_{1/2} = 70,2 \text{ s}$ für ^{234m}Pa genannt. Da das hier untersuchte Protactinium als ein Gemisch aus zwei Kernisomeren mit unterschiedlicher Halbwertszeiten vorliegt, liegt die bestimmte Halbwertszeit zwischen den beiden Einzelisomeren, da auch Zerfallereignisse in dem Versuch registriert werden, die von dem längerlebigen Protactinium ^{234}Pa herrühren (der Unterschied zwischen der bestimmten Halbwertszeit und dem des kürzerlebigen Protactinium-Kernisomer ^{234m}Pa beträgt etwa 38%).

Literatur

- [Hau92] HAUPTMANN, Siegfried: *Einführung in die organische Chemie*. 4., durchgesehene Auflage. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, 1992. – ISBN 3–342–00635–8
- [Kuc94] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik*. 14. Auflage. Leipzig-Köln : Fachbuchverlag, 1994. – ISBN 3–343–00858–3
- [Lin93] LINDNER, Helmut: *Physik für Ingenieure*. 14. Auflage. Leipzig-Köln : Fachbuchverlag, 1993. – ISBN 3–343–00772–2
- [MSH⁺04] MEYER, Prof. Dr. habil. L. ; SCHMIDT, Dr. Gerd-Dietrich ; HOCHÉ, Detlef ; KÜBLECK, Dr. J. ; REICHWALD, Dr. R. ; SCHWARZ, Dr. O. ; MEYER, Prof. Dr. habil. L. (Hrsg.) ; SCHMIDT, Dr. Gerd-Dietrich (Hrsg.): *Physik*. 1. Auflage. PAETEC Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, Berlin und Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, 2004 (Duden – Abiturwissen). – 464 S. – ISBN 3–411–00220–4
- [Wik07a] WIKIPEDIA: *Strahlenschutz* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. "<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Strahlenschutz&oldid=35717147>". Version: 2007. – [Online; Stand 20.10.2007]
- [Wik07b] WIKIPEDIA: *Uran-Radium-Reihe* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. "<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Uran-Radium-Reihe&oldid=36988926>". Version: 2007. – [Online; Stand 20.10.2007]

Liste der Versionen

Version	Datum	Bearbeiter	Bemerkung
1.0	15.10.2007	Krä	Seminar und Versuchsdurchführung
1.1	21.10.2007	Krä	Protokoll und Auswertung