

# Radonkonzentration in Luft

Fortgeschrittenen-Praktikum, Physik Department, TUM

## 1 Einleitung

Radon stellt den größten Beitrag zur natürlichen Strahlenbelastung des Menschen dar, und die maximal erlaubte Radon-Konzentration in der Luft von Wohnräumen soll demnächst gesetzlich geregelt werden. In diesem Versuch wird die Radon-Konzentration im Laborraum experimentell bestimmt.

Das radioaktive Edelgas Radon dringt ständig aus dem Erdmantel an die Erdoberfläche. In Kellerräumen und Bergwerken, in denen selten gelüftet wird, kann Radon in so hohen Konzentrationen vorkommen, dass es signifikant zum Krebsrisiko des Menschen beiträgt. Das Radon wird durch den radioaktiven Zerfall der primordialen radioaktiven Isotope  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$  gespeist, welche in Fels- und Mauerstein gehäuft vorkommen. Diese Isotope zerfallen über eine lange Zerfallsreihe, wobei die Tochterisotope am Ort der Mutter verbleiben, bis das chemisch inerte Radon gebildet wird. Dieses diffundiert aus dem Gestein heraus in Luft und Wasser. Das Radon zerfällt dann weiter in radioaktives Blei, Wismut, und Polonium, welche sich auf Aerosolen festsetzen, eingeatmet werden, und im Körper verbleiben bis sie zerfallen.

Die Radon-Konzentration der Luft kann bestimmt werden, indem man Aerosole aus der Luft über einen Luftfilter sammelt und deren Aktivität dann mit einem geeigneten Detektor bestimmt.

## 2 Theorie

Die Abnahme der Zahl  $N$  eines radioaktiven Isotopes mit der Zeit wird von der Gleichung

$$dN/dt = -\lambda N \quad (1)$$

bestimmt, wobei  $\lambda = 1/\tau$  und  $\tau$  die Lebensdauer ist.

In einer Zerfallskette gilt für die Zahl des i-ten Isotops die Gleichung

$$dN_i/dt = \lambda_{i-1}N_{i-1} - \lambda_iN_i \quad (2)$$

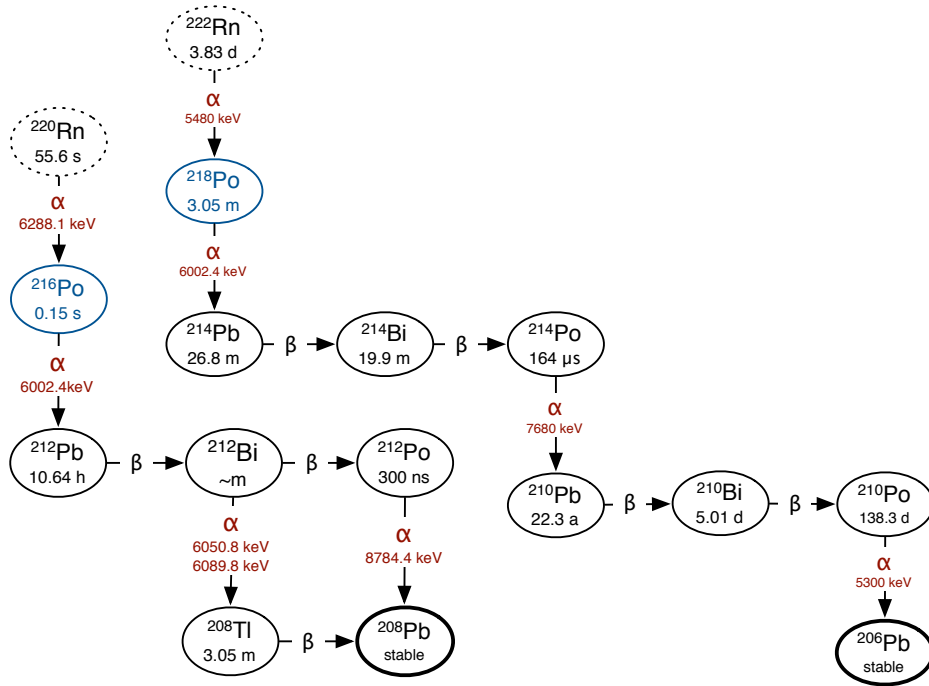


Figure 1: Zerfallsketten von  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$  ab deren Radon-Töchtern.

Die Zerfallsketten von  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$  sind in Abb. 1 ab deren Radon Tochterisotopen abgebildet. Beide Radon-Isotope haben Po und dann Pb als Töchter so dass die folgenden Herleitungen nur die Elemente erwähnen, und die entsprechenden Isotope dann je nach Zerfallskette ergänzt werden können. Da die Lebensdauer der Ausgangsisotope sehr viel länger als die aller Töchter sind, sind die Zerfallsketten zunächst im säkularen Gleichgewicht, so dass für beliebige Isotope i und j der gleichen Kette gilt

$$\lambda_i N_i = \lambda_j N_j \quad (3)$$

Das säkulare Gleichgewicht bleibt bestehen, so lange die Kette nicht unterbrochen wird.

Während des Filtrvorgangs wird  $V \text{ m}^3$  Luft pro Sekunde durch den Filter geblasen. Diese enthält  $\rho_{Po}$  bzw.  $\rho_{Pb}$  an Po bzw. Pb pro  $\text{m}^3$ . Die Zahl an

Atomen der direkten Radon Tochter Po auf dem Filterpapier wird bestimmt durch deren Anreicherung aus der Luft und dem gleichzeitigen dauernden Zerfall, so dass gilt

$$dN_{Po}/dt = \epsilon_f \rho_{Po} V - \lambda_{Po} N_{Po} \quad (4)$$

wobei  $\epsilon_f$  die Effizienz ist, mit der das Isotop im Filter hängen bleibt. Da das Radon nicht im Filter zurück bleibt, sondern nur dessen Töchter, unterbricht der Filtervorgang das säkulare Gleichgewicht.

Die Zahl an Atomen der nächsten Tochter in der Zerfallsreihe, Pb, wird sowohl von der Anreicherung aus der Luft, als auch von dem Zerfall des Po gespeist, welches sich schon auf dem Filter befindet, so dass für dieses Isotop gilt

$$dN_{Pb}/dt = \lambda_{Po} N_{Po} + \epsilon_f \rho_{Pb} V - \lambda_{Pb} N_{Pb} \quad (5)$$

Der Zerfall einer Radon-Tochter wird in diesem Experiment anhand der emittierten Gamma-Strahlung nachgewiesen. Die Zerfallslinien sind in Abb. 5 und 6 tabelliert. Insbesondere eignen sich hierzu die Zerfallslinien von Pb, die mit dessen Beta-Zerfall einhergehen.

Die Zahl der gemessenen Pb Zerfälle erlaubt Rückschluss auf die Pb Konzentration in der Luft über folgende Gleichung [1]:

$$\begin{aligned} N_\gamma = & \epsilon_f \epsilon_d R \rho_{Pb} V \\ & \cdot \left[ \left\{ \frac{1}{\lambda_{Po}} + \frac{1}{\lambda_{Pb}} + \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Po}(\lambda_{Po} - \lambda_{Pb})} + \frac{\lambda_{Po} e^{-\lambda_{Pb} T_f}}{\lambda_{Pb}(\lambda_{Pb} - \lambda_{Po})} \right\} (e^{-\lambda_{Pb} t_1} - e^{-\lambda_{Pb} t_2}) \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Po}(\lambda_{Pb} - \lambda_{Po})} (1 - e^{-\lambda_{Po} T_f}) \right\} (e^{-\lambda_{Po} t_1} - e^{-\lambda_{Po} t_2}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

wo die folgenden Variablen benutzt wurden:

$V$  : Luftumsatz des Filters pro Zeiteinheit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\epsilon_d$  : Nachweiswahrscheinlichkeit der Zerfallslinie

$R$  : Verzweungsverhältnis der Zerfallslinie

$T_f$  : Der Zeitraum, über den der Luftreiniger betrieben wurde

$t_1, t_2$  : Die Anfangs- und Endzeit der Datennahme mit dem HPGe Detektor, gemessen ab dem Zeitpunkt, an dem der Luftreiniger ausgeschaltet wurde

Gleichung 6 ist in Abb. 4 graphisch dargestellt.

### 3 Versuchsaufbau

Ein Luftreiniger wird benutzt um Raumluft durch einen Feinstaub-Filter zu blasen. Radon-Töchter, die sich auf Staubpartikeln abgesetzt haben, werden in dem Filter festgehalten. Die Zerfallslinien der Radon-Töchter

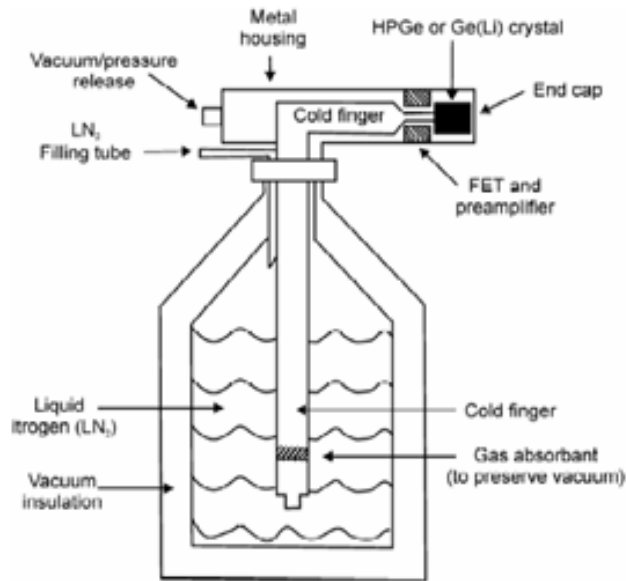


Figure 2: Germanium-Detektoraufbau[2].

auf dem Filter werden mit einem hochreinen Germanium (HPGe) Detektor nachgewiesen. Germanium Detektoren haben eine hohe Energieauflösung, so dass die Zerfallslinien der relevanten Isotope von denen anderer Zerfälle gut unterschieden werden können.

Abb. 2 und 3 zeigen schematisch einen HPGe-Detektoraufbau und dessen Verbindung zum Datenaufnahme-Computer.

### 4 Kenntnisse vor Versuchsbeginn

Der Versuch findet im Raum 3519 der Physik I statt. Da hier mit radioaktiven Quellen gearbeitet wird, bitte keine Lebensmittel mitbringen!

Ihr braucht einen USB Datenträger um die Daten zu speichern und eine Möglichkeit um eine Kalibrationskurve zu zeichnen. Hierzu entweder Karopapier, Lineal und Taschenrechner, oder Laptop mit entsprechender Software.

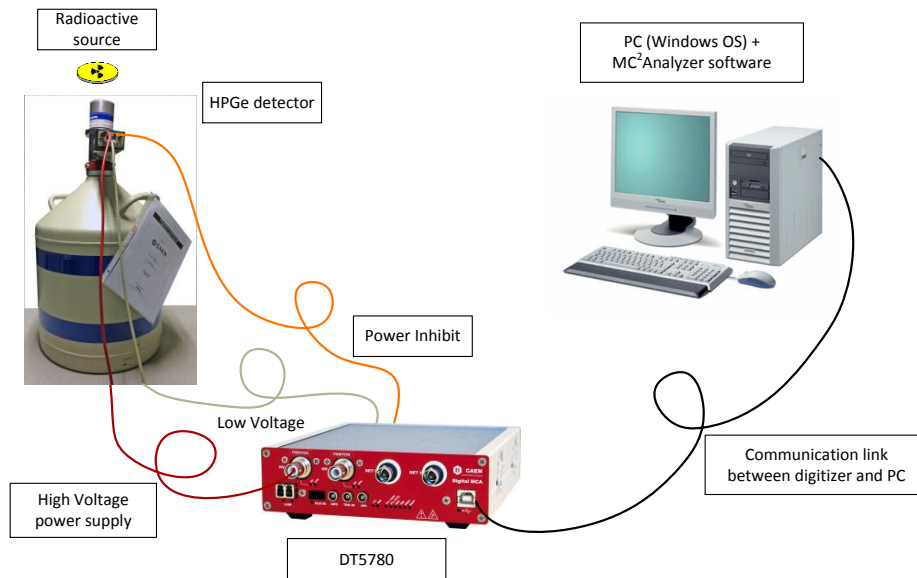


Figure 3: Verbindung des Germanium-Detektors mit dem Datenaufnahme-Computer[3].

1. Begriffe: Primordiale Nuklide, Zerfallsreihe, Gleichgewichtsreaktionen, säkulares Gleichgewicht.
2. Zerfallsreihen von  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$ .
3. Begriffe und Gleichungen des radioaktiven Zerfalls (Halbwertszeit, Lebensdauer, Zerfallsenergie, Verzweungsverhältnis, Zerfallsspektrum). Gleichgewichtsreaktionen.
4. Funktionsweise von Germanium Detektoren.

## 5 Durchführung

Die Radon Zerfallsprodukte haben unterschiedliche Lebensdauern. Daher ist es wichtig, zunächst zu überlegen, wie lange man den Luftreiniger betreibt, und wann und für wie lange jede Messung des Filters stattfinden soll.

Zunächst wird ein neuer HEPA Filter im Luftreiniger hinter dessen Vorderplatte eingebaut. Dort ist Platz für mehrere Filterarten, aber in diesem Versuch wird nur der HEPA Filter verwendet. Den Filter bitte richtig

herum einbauen (siehe Pfeil auf dem Filter). Der Luftreiniger wird dann auf die höchste Stufe eingeschaltet.

Als nächstes wird der Germanium Detektor in Betrieb genommen. Der Detektor ist gekühlt und sollte schon unter Hochspannung stehen. Am Datenauslese-Computer wird überprüft, dass die Datenauslese-Software eine Verbindung mit dem Detektor herstellen kann. Wird die Datenauslese angeschaltet, produziert die Software aus den Signalen des Detektors ein Energiespektrum, in dem die Zerfallslinien als Peaks hervortreten.

Zunächst ist allerdings nicht bekannt, welcher Kanal des Spektrums welcher Energie entspricht. Um die Peaks der Radon Töchter eindeutig lokalisieren zu können, muss der Detektor daher erst kalibriert werden. Dies wird mit Kalibrationsquellen bekannter Art und Stärke gemacht, welche im Labor zur Verfügung stehen. Die Kalibrationsquellen sollten nur wenige Zerfallslinien haben, so dass Peaks in deren Spektrum eindeutig einer Linie zugeordnet werden können. Auch sollten die Zerfallsenergien im Energiebereich liegen, der auch für das Vermessen der eigentlichen Probe von Interesse ist.

Nicht jeder Zerfall in der Probe wird im Detektor auch nachgewiesen. Die Nachweiswahrscheinlichkeit ist im allgemeinen von der Zerfallsenergie und von der Positionierung der Probe abhängig. Damit später genau bestimmt werden kann, wie viele Zerfälle eines bestimmten Isotops im Filter stattfanden, muss ausserdem die Effizienz des Detektors bestimmt werden.

Bevor Quellen aus dem Tresor genommen werden, überlegt genau, welche und wie viele Quellen Sinn machen, und wie lange diese gemessen werden sollten.

Legt auf dem Computer einen Ordner benannt FoPra\$EureNamen an und speichert alle Spektren dort. Die Spektren können sowohl im Format der Auslesesoftware, als auch als reine Textdatei gespeichert werden.

Der Luftreiniger wird im Versuchsraum aufgestellt. Ist genug Staub eingesammelt, sollte der Filter aus dem Luftreiniger entfernt und so klein wie möglich zusammengefaltet werden. Der Filter wird dann auch etwa an der gleichen Stelle vor dem Germanium-Detektor positioniert, wo die Kalibrationsquellen zuvor platziert waren. Die Zeitpunkte, an denen Geräte ein- und ausgeschaltet wurden, sollten genau vermerkt werden.

Auch die Umgebung des Detektors enthält Radon-Tochter Isotope, welche das Ergebnis verfälschen können. Messt das Umgebungsspektrum, um diesen Untergrund zu quantifizieren.

## 6 Analyse

**Energiekalibration:** Die Peaks in den Spektren der Kalibrationsquellen werden mit einer Normalverteilung gefittet. Wenn nötig wird etwaiger Untergrund durch eine Gerade dargestellt. Der Kanal, in dem sich der Mittelwert befindet, wird für alle Zerfallslinien gegen die Zerfallsenergie aufgetragen. Hierdurch entsteht ein Graph, der wiederum mit einer mathematischen Funktion beschrieben werden kann. überlegt, welche Funktion Sinn macht und bestimmt deren Parameter.

**Kalibration der Nachweiswahrscheinlichkeit:** Die Zahl der vom Detektor registrierten Impulse einer gewissen Energie ist durch die Fläche unter dem entsprechenden Peak gegeben. Bei vernachlässigbarem Untergrund kann die Zahl der Impulse in jedem Kanal, der zu dem Peak gehört, direkt aufaddiert werden. Die Zahl der tatsächlichen Zerfälle kann anhand der dokumentierten Aktivität der Kalibrationsquelle und der Messzeit ausgerechnet werden. Das Verhältnis von registrierten Impulsen zu tatsächlichen Zerfällen wird für alle Zerfallslinien gegen die Zerfallsenergie aufgetragen. überlegt, welche mathematische Funktion die Kurve, die dadurch entsteht, am besten beschreibt. Da das Filterpapier nicht die gleichen Ausmasse hat wie die Kalibrationsquellen, muss noch ein Korrekturfaktor berechnet werden. Überlegt, wie sich die Nachweiswahrscheinlichkeit mit dem Abstand verhält und wie ausgedehnt das Filterpapier war.

**Zahl der Radon-Tochter-Zerfälle:** Im Spektrum des Filterpapiers werden nun die Peaks der relevanten Po und Pb-Isotope identifiziert. Die Zahl der Ereignisse in jedem Peak wird wieder durch Fitten einer Normalverteilung + Untergrundfunktion bestimmt. Denkt daran, die Aktivität der Detektor-Umgebung von dem Resultat abzuziehen. Gleichung 6 wird benutzt, um auf die Pb-Konzentration in der Luft zu schließen. Die Konzentration von sowohl  $^{222}\text{Rn}$  also auch  $^{220}\text{Rn}$ ) kann dann anhand von Gleichung 3 ausgerechnet werden. Bitte gebt diese in Einheiten von  $\text{Bq}/\text{m}^3$  an.

## 7 Auswertung

Die Auswertung sollte als kleine wissenschaftliche Arbeit alle Informationen über Versuchsaufbau, Durchführung, Ergebnisse, und Analyse enthalten, die

ein typischer Physikstudent braucht, um die Resultate verstehen zu können. Auf jeden Fall enthalten sein sollte:

1. Kalibrationskurven für Energie und Nachweiswahrscheinlichkeit mit Fit der entsprechenden Funktion.
2. Die gemessenen Spektren des Filterpapiers und des Untergrundes sollten mit x-Achse in Energieeinheiten gezeigt werden, und relevante Peaks mit dem dazugehörigen Isotop beschriftet sein. Die y-Achse sollte Einheiten von Ereignissen/Zeit haben.
3. Tabelle mit den relevanten Parametern für jeden benutzten Peak (sowohl der Kalibrationsquellen als auch der Filtermessung), ie. Brutto und Netto Zählrate, Ursprungsisotop, Halbwertszeit des Ursprungsisotops, Nachweiswahrscheinlichkeit bei dieser Energie, Verzweigungsverhältnis dieser Linie.
4. Diskussion der systematischen Fehlerquellen in jedem Teil des Versuches (welche gibt es, welche dominieren, wie könnte man dies verbessern?).
5. Vergleich der gemessenen Radon-Konzentration mit typischen Werten in Innenräumen.

Bitte beachtet ausserdem, dass das Format dem eines Artikels in einem wissenschaftlichen Journal entsprechen soll. Insbesondere:

- Die Struktur sollte so sein, dass ein Student, der den Versuch nicht kennt, diesen wiederholen könnte. Es sollte die Standard Struktur fuer eine wissenschaftliche Arbeit verwendet werden.
- Alle Gleichungen und Zeichnungen, die ihr nicht selbst erstellt habt, brauchen eine Referenz. Referenzen sollten nummeriert und am Ende des Manuskriptes aufgelistet werden.

## References

- [1] H.C. Evans, "Radioactivity of the air", Queen's University, Physics 352
- [2] <http://www.expertsmind.com> (Oct 2016)
- [3] CAEN MC<sup>2</sup> Analyzer User Manual Rev.1 (2015)



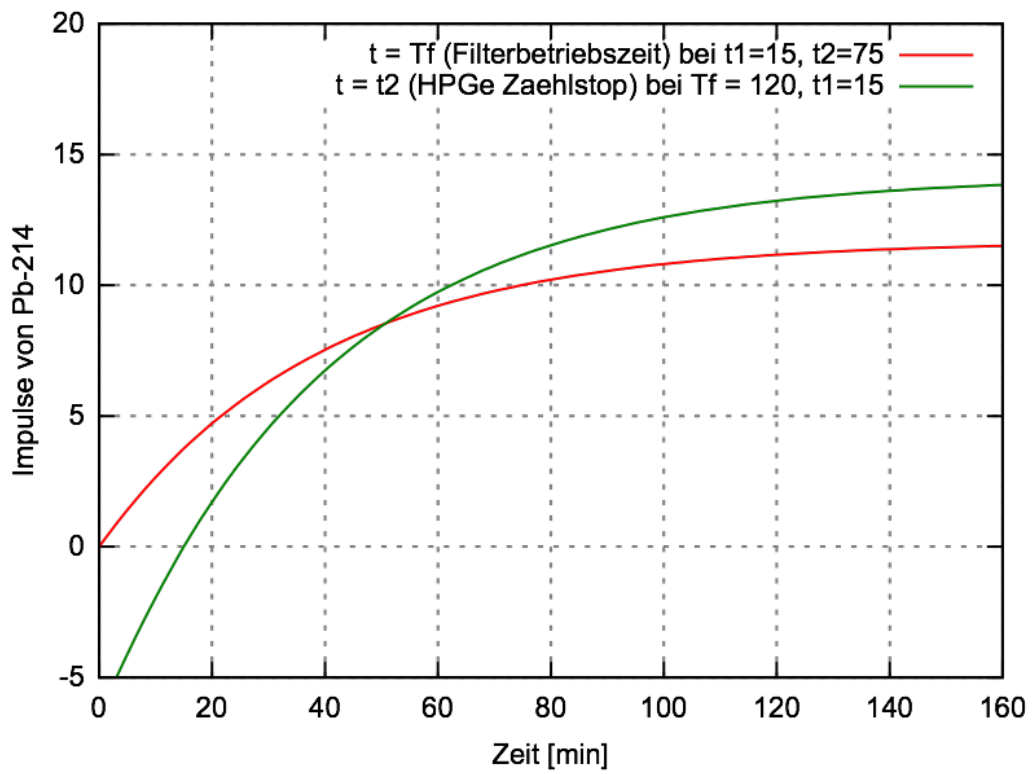


Figure 4: Gleichung 6 dargestellt in Abhängigkeit der Filter- und Messzeiten für die  $^{222}\text{Rn}$ -Zerfallskette. Die Zählrate ist beliebig skaliert.

Isotope	Half-life	Decay Gamma-ray Energy (keV)	Branching Ratio ( % )	Decay Mode	
$^{220}\text{Rn}$	55.6 s	549.7	0.095	$\alpha$	100%
$^{216}\text{Po}$	0.15 s	804.9	0.0018	$\alpha$	100%
$^{212}\text{Pb}$	10.64 hr	77.1	17.5	$\beta^-$	100%
		238.6	43.6		
		300.1	3.34		
$^{212}\text{Bi}$	60.55 min	727.2	6.65	$\beta^-$	64.1%
		785.4	1.11		
		1620.6	1.51		
$^{212}\text{Bi}$	60.55 min	39.9	1.10	$\alpha$	35.9%
$^{212}\text{Po}$	$2.98 \times 10^{-7}$ s			$\alpha$	100%
$^{208}\text{Tl}$	3.05 min	72.8	2.03	$\beta^-$	100%
		75.0	3.43		
		84.8	1.18		
		277.4	6.80		
		510.8	21.6		
		583.1	86.0		
		763.1	1.64		
		860.4	12.0		
		2614.6	99.8		
$^{208}\text{Pb}$	stable				

Figure 5: Eigenschaften der  $^{220}\text{Rn}$  Töchter.

Isotope	Half-life	Decay Gamma-ray Energy (keV)	Branching Ratio ( % )	Decay Mode
$^{222}\text{Rn}$	3.82 d			$\alpha$ 100%
$^{218}\text{Po}$	3.11 min	837.0	0.0011	$\alpha$ 99.98% $\beta^-$ 0.02%
$^{214}\text{Pb}$	26.8 min	77.1 241.9 295.2 351.9 785.9	10.8 7.46 19.2 37.1 1.09	$\beta^-$ 100%
$^{214}\text{Bi}$	19.9 min	609.3 665.5 768.4 806.2 934.1 1120.3 1155.2 1238.1 1281.0 1377.7 1401.5 1408.0 1509.2 1661.3 1729.6 1764.5 1847.4 2118.5 2204.1 2447.7	46.1 1.56 4.88 1.23 3.16 15.0 1.69 5.92 1.47 4.02 1.39 2.48 2.19 1.15 3.05 15.9 2.12 1.21 4.99 1.55	$\beta^-$ 99.98% $\alpha$ 0.02%
$^{214}\text{Po}$	$1.64 \times 10^{-4}$ s	799.7	0.0104	$\alpha$ 100%
$^{210}\text{Tl}$	1.3 min	298 797.7 860 1070 1110 1210 1316 2010 2360 2430	80 100 7 12 7 17 21 7 8 9	$\beta^-$ 100%

Figure 6: Eigenschaften der  $^{222}\text{Rn}$  Töchter.