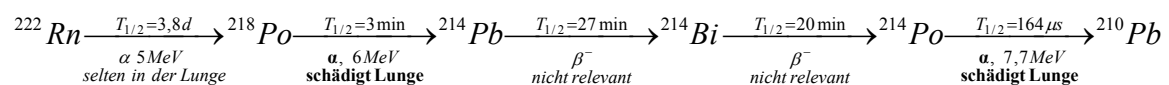


# DIY-Messgerät zur Bestimmung der Folgeproduktkonzentration

(von Robert und Martin Queitsch)

## Motivation

In Höhlen treten oft sehr hohe Radonkonzentrationen auf. Es erweist sich daher als sinnvoll, zumindest vor längeren Höhlenaufenthalten entsprechende Messungen durchzuführen. Übliche Messgeräte bestimmen die Radonzerfallskonzentration in der Luft. Eine Messung der Folgeproduktkonzentrationen wäre aber oft aufschlussreicher. Die Zerfallsreihe des wichtigsten Radon-Isotops  $^{222}\text{Rn}$  lautet:



Das Edelgas Radon kann jederzeit wieder ausgeatmet werden, während die radioaktiven Folgeprodukte größtenteils im Atmungstrakt haften bleiben. Nur  $^{210}\text{Pb}$  hat eine so lange Halbwertszeit, dass es vor seinem Zerfall vom Körper wieder ausgeschieden wird. Die Folgeproduktkonzentrationen in der Luft bestimmen weitgehend das Gesundheitsrisiko. Aus vielen Messungen in Wohnräumen hat sich ergeben, dass etwa 40% der entstehenden Folgeprodukte in der Luft verbleiben. Der Rest fällt zu Boden oder haftet an Wänden, wo er zerfällt (plate-out). Weil Messungen der Radonzerfallskonzentration technisch einfacher realisierbar sind, werden diese Messwerte für alle Empfehlungen als Basis verwendet.

In Höhlen ist der angenommene Folgeproduktanteil von 40% aber keineswegs gesichert [1]. Für Risikoeinschätzungen sollten dort besser die Folgeproduktkonzentrationen bestimmt werden. Zur Messung der Folgeprodukte von  $^{222}\text{Rn}$  ist das hier vorgestellte Verfahren sehr gut geeignet. Alle Komponenten können in ihren Eigenschaften gut eingeschätzt werden. Bei sorgfältiger Umsetzung sind relativ genaue Messungen möglich, ohne eine Kalibrierung über Referenzen bemühen zu müssen.

**Klarstellung: die Messungen mit Eigenbaugeräten ersetzen keine Messung mit offiziell zertifizierten und regelmäßig kalibrierten Geräten.**

## Beschreibung des Messverfahrens

Das in der Luft befindliche Radongas zerfällt in neue radioaktive Folgeprodukte (verschiedene Isotope von Polonium, Wismut und Blei). Die Folgeprodukte sind in der Regel elektrisch geladen, weswegen sie sich schnell an Staub oder Wassertröpfchen anlagern und größere Cluster bilden.

Zur Messung wird Luft über eine Filtermembran angesaugt. Dazu eignet sich z.B. gereckte Teflonfolie (Porengröße etwa 5  $\mu\text{m}$ ). Beim zeitlich begrenzten Ansaugvorgang werden die Cluster dank elektrostatischer Aufladung durch die Luftströmung aus einem messbaren Luftvolumen am Filter sicher abgeschieden. Das Ergebnis wird auf das Normvolumen 1  $\text{m}^3$  hochgerechnet.

Nach dem Pumpvorgang wird die Membran vor einen Sensor gebracht, der die in Richtung des Sensors emittierten Alphateilchen registriert. Der Sensor erzeugt bei jedem eintreffenden

Alphateilchen einen zur kinetischen Energie proportionalen Spannungspuls. Jedes Ereignis wird abhängig von dessen Energie einem Speicherkanal zugeordnet, welcher um 1 erhöht wird. Die graphische Darstellung der Speicherzellen ergibt eine Kurve mit mehreren Peaks, welche verschiedenen Isotopen zugeordnet werden können. Mehrere Speicherzellen werden zu ROIs (Regions of Interest) zusammengefasst.

### Berechnung der Ursprungsmenge eines Isotops

Die Auszählung der Ereignisse zu einem bestimmten Peak dient der Feststellung, wie viele Atome des betreffenden Isotops sich zum Zeitpunkt der Probenahme auf dem Filter befunden haben.

Radioaktives Zerfallsgesetz:  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$  mit  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$

$N(t)$  Zum Zeitpunkt  $t$  noch vorhandene Isotope

$N_0$  Ursprungsmenge

$T_{1/2}$  Halbwertszeit

Berechnung der Ursprungsmenge aus der Zahl der Zerfallsereignisse  $\Delta N$  nach einer Messzeit  $t_{mess}$ :

$$\Delta N = N_0 - N(t_{mess}) = N_0 - N_0 e^{-\lambda t_{mess}} = N_0 (1 - e^{-\lambda t_{mess}})$$

$$\Rightarrow N_0 = \frac{\Delta N}{1 - e^{-\lambda t_{mess}}}$$

### Korrekturrechnungen für kurzlebige Zerfallsprodukte

Bei kurzlebigen Isotopen muss berücksichtigt werden, dass schon während der Probenahme ein signifikanter Anteil der Isotope zerfällt. Eine Verdoppelung der Pumpzeit ergibt also nicht die doppelte Anzahl an abgeschiedenen Isotopen. Tatsächlich zerfallen rund 15% der gesammelten Isotope während einer kurzen Probenahmezeit von 90 Sekunden. Diese 15% nehmen an der Messung gar nicht mehr teil. Der Korrekturfaktor lässt sich wie folgt herleiten:

Wird die Probenahme in zwei gleiche Zeitabschnitte unterteilt, so würden jeweils 50% der Teilchen in den beiden Zeitabschnitten abgeschieden. Für die Teilchen des ersten Zeitabschnitts wird angenommen, dass sie während des zweiten Zeitabschnitts dem radioaktiven Zerfall unterliegen, während die Teilchen des zweiten Abschnitts als vollständig erhalten angenommen werden. Am Ende bleiben dann:

$$N(t) = \frac{N_0}{2} + \frac{N_0}{2} e^{-\frac{\lambda t}{2}} = \frac{N_0}{2} \left( 1 + e^{-\frac{\lambda t}{2}} \right)$$

Bei Unterteilung in vier 4 Zeitabschnitte ergäben sich:

$$N(t) = \frac{N_0}{4} \left( 1 + e^{-\lambda t/4} + e^{-\lambda 2t/4} + e^{-\lambda 3t/4} \right) \quad \text{und so fort.}$$

Für eine Unterteilung in 64 Zeitabschnitte ergibt sich ein ausreichend genauer Korrekturfaktor. Die bereits während des Pumpvorgangs verloren gegangenen Isotope werden mit dem Korrekturfaktor  $k_{pump}$  kompensiert. Für 90 s Pumpzeit gilt:

$$N_{0,korr} = k_{pump} \cdot N_0 \quad \text{mit} \quad k_{pump} \approx 1,174$$

Der weiter oben genannte Verlust von 15% kann aus  $k_{pump}$  berechnet werden. Für die Parametrierung des Geräts ist aber  $k_{pump}$  besser geeignet.

$$N_{Verlust} = 1 - \frac{1}{1,174} = 0,15$$

Ziel sollte es sein, die Pumpzeit bei möglichst großem Luftmengenumsatz klein zu halten. Nicht zu vernachlässigen ist außerdem die Zeit, welche zwischen Probenahme und Radioaktivitätsmessung vergeht. Der Vorgang darf nur wenige Sekunden dauern.

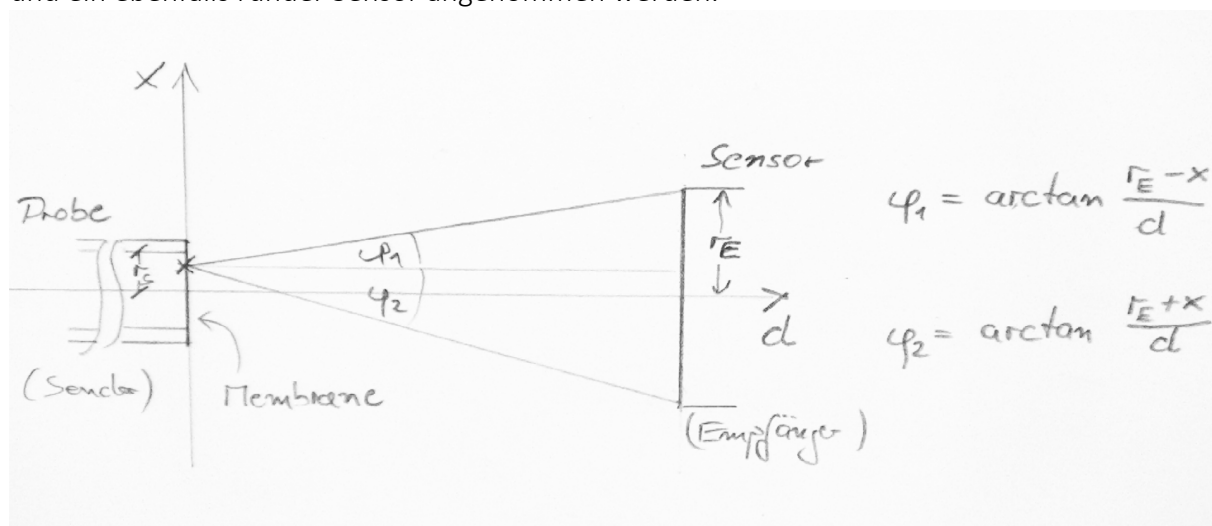
### Fehler durch die Probenwechselzeit

Wie erwähnt, vergeht etwas Zeit zwischen Ende des Pumpvorgangs und Anfang der Probenvermessung, weil die Probe von Hand umgesteckt werden muss. Für diesen Vorgang werden 3 Sekunden fest veranschlagt. erst nach dieser Zeit wird die Messung gestartet. Die kurzlebigen  $^{218}\text{Po}$ - Isotope verringern sich gemäß Zerfallsgesetz um  $N_0 e^{-\lambda t_{umst.}}$ . Bei der kurzen Zeit bleibt der Korrekturfaktor nahe 1:

$$k_{umst.} = e^{\lambda t_{umst.}} \approx 1,011 \quad (\text{vgl. LibreOffice-Calc-Dokument})$$

### Abschätzung des Geometriefaktors $k_g$

Die Emission eines Alphateilchens ist rein statistisch in alle Raumrichtungen möglich. Ein großer Teil der Emissionen gehen daher ins Leere. Für die Abschätzung des Korrekturfaktors genügt es, das Problem auf zwei Dimensionen zu reduzieren, sofern eine runde Emitterfläche und ein ebenfalls runder Sensor angenommen werden.



Der Sender (Teflonmembran des Messprobenröhrchens) mit Radius  $r_s$  hat den Abstand  $d$  zum Empfänger (Sensor) mit Radius  $r_E$ . An jedem Ort  $x$  der Membran kann ein Alphateilchen emittiert werden. Die Summe der Winkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  beschreibt den maximalen Akzeptanzwinkel des Sensors. Für jeden Ort  $x$  ergibt sich ein etwas unterschiedlicher Öffnungswinkel. Der Mittelwert kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 &= \arctan \frac{1}{d} \left( r_E - \frac{r_s}{2} \right) & \text{genauer:} & \quad \bar{\varphi}_1 = \frac{1}{r_s} \int_0^{r_s} \arctan \frac{r_e - x}{d} dx \\ \bar{\varphi}_2 &= \arctan \frac{1}{d} \left( r_E + \frac{r_s}{2} \right) & \text{genauer:} & \quad \bar{\varphi}_2 = \frac{1}{r_s} \int_0^{r_s} \arctan \frac{r_e + x}{d} dx \end{aligned}$$

Die jeweils rechts aufgeführten Integrale liefern genauere Ergebnisse. Für die Berechnung muss aber auf numerische Methoden zurückgegriffen werden (Casio fx991 oder Geogebra können dies leisten). Die Werte beider Berechnungsmethoden weichen in der Regel nur gering voneinander ab. Für den geometrischen Korrekturfaktor  $k_g$  gilt:

$$k_g = \frac{2\pi}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2} \quad (\text{Winkel jeweils im Bogenmaß})$$

### Aktivitätsberechnung

Die Aktivität wird in Bequerel gemessen. Ein Bequerel entspricht einem Zerfall pro Sekunde. Abhängig von der Ausgangsmenge  $N_0$  kann die Zahl der Ereignisse je Sekunde (Aktivität) berechnet werden:

$$A = (N_0 - N_{t=1s}) \cdot 1Bq = (N_0 - N_0 e^{-\lambda \cdot 1s}) \cdot 1Bq = N_0 (1 - e^{-\lambda \cdot 1s}) \cdot 1Bq$$

Aus der Zahl  $\Delta N$  der in der Messzeit registrierten Ereignisse lässt sich auf die Ursprungsmenge  $N_0$  zurückrechnen:

$$N_0 = \frac{\Delta N}{1 - e^{-\lambda t_{mess}}} \quad (\text{vgl. Berechnung der Ursprungsmenge})$$

Die Zahl der registrierten Ereignisse  $\Delta N$  liefert die Aktivität in der Luft:

$$A = \Delta N \frac{1 - e^{-\lambda \cdot 1s}}{1 - e^{-\lambda t_{mess}}} \cdot 1Bq$$

Das untersuchte Volumen muss auf einen Kubikmeter normiert werden, um die Aktivitätskonzentration angeben zu können. Im verwendeten Messgerät werden z.B. die in 1000 cm<sup>3</sup> Luft vorhandenen Isotope auf einem Filter abgeschieden. Damit ergibt sich ein Faktor von 1000 für die Aktivität in einem Kubikmeter Luft. Für die Aktivitätskonzentration  $Q$  gilt:

$$Q = A \cdot k_{pump} \cdot k_{umst.} \cdot k_g \cdot 10^3 \frac{1}{m^3}$$

### Praxisnahe Berechnung

Als Hilfestellung existiert ein Libre-Office-Sheet "Korrekturfaktoren.ods".

#### für das kurzlebige Isotop Po-218:

Die Pumpzeit und das durch die Membrane gehende Luftvolumen können nicht gleichzeitig festgelegt werden. Da für die Berechnung des Korrekturfaktors abhängig von der Pumpzeit eine numerische Näherungslösung erforderlich ist, wird nur die Pumpdauer festgelegt und ein dazu angepasster Korrekturwert im Festspeicher hinterlegt. Der Korrekturfaktor für die Umsteckzeit der Probe kann ebenfalls fest hinterlegt werden.

Idealerweise werden alle Faktoren zu einem Korrekturwert zusammengefasst.

#### für das langlebige Isotop Po-214:

Hier können die Korrekturfaktoren für die Pumpzeit und das Umstecken der Probe mit 1 angenommen werden.

#### Messung des Luftvolumens

Bei veränderlicher Akkuspannung und durch unterschiedliche Strömungswiderstände verschiedener Membranen kann die angesaugte Luftmenge schwanken. Die Luftmenge wird aber verhältnismäßig genau über die Drehzahl des Motors wiedergegeben. Ein entsprechender Multiplikator je Motorumdrehung wird fest hinterlegt.

#### Berücksichtigung aller Faktoren:

$$Q = \frac{\Delta N}{v_{Luft}} \cdot \left[ k_g \cdot k_{Umst.} \cdot k_{pump} \cdot 10^6 \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_s}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{mess}}} Bq / m^3 \right]$$

mit:	$\Delta N$	Die Anzahl der zum Isotop gemessenen Zerfälle
	$v_{Luft}$	das durch die Membrane gezogene Luftvolumen
	$k_g$	Geometriekorrektur
	$k_{Umst.}$	Korrektur für das Umstecken der Probe
	$k_{pump}$	Pumpzeitkorrektur für kurzlebiges $^{218}Po$
	$\lambda$	Zerfallskonstante des jeweiligen Isotops (in $s^{-1}$ )
	$t_{mess}$	Zeit in der die Ereignisse gezählt wurden

Der Ausdruck in der eckigen Klammer kann für jedes Isotop als Konstante hinterlegt werden, wenn die Messzeit  $t_{mess}$  ebenfalls festgelegt ist.

#### Beispielwerte für folgende Konfiguration:

- Pumpzeit: 90 s
- Umsteckzeit der Probe: 3 s
- Sensordurchmesser: ca. 3 mm (BPX-61 auf "rund" gerechnet)
- Membrandurchmesser: 3 mm
- Abstand der Membrane zum Sensor: 2 mm
- Messzeit: 480 s (8 Minuten)

Das Isotop  $^{214}\text{Po}$  hat zwar eine extrem kurze Halbwertszeit von  $164 \mu\text{s}$ , es steht aber mit den beiden langlebigen Vorprodukten Blei und Wismut im Gleichgewicht. Die beiden Vorprodukte sind Betastrahler und deswegen für Risikobetrachtungen weitgehend unbedeutend. Die Summe der Halbwertszeiten der Vorprodukte ergibt eine virtuelle Lebensdauer von 47 Minuten. Daher können die Korrekturfaktoren für den Pumpvorgang und das Umstecken auf 1 gesetzt werden.

$$\lambda_{218\text{Po}} = 0,0037266 \text{ s}^{-1} \quad \text{und} \quad \lambda_{214\text{Po}} = 0,00024738 \text{ s}^{-1}$$

$$\Rightarrow \quad k_{\text{pump},218\text{Po}} = 1,174 \quad k_{\text{pump},214\text{Po}} = 1$$

$$k_{\text{umst},218\text{Po}} = 1,011 \quad k_{\text{umst},214\text{Po}} = 1$$

$$k_g = 5,22 \quad (\text{vereinfachte Berechnung})$$

$$k_g = 5,32 \quad (\text{Integral numerisch berechnet, in LibreOffice nicht verfügbar})$$

Für eine variable Luftmenge bei fester Pumpzeit ergeben sich als Konstanten:

$$Q_{218\text{Po}} = \frac{\Delta N}{v_{\text{Luft}}} \cdot 28200 \text{ Bq} / \text{m}^3 \quad ; v_{\text{Luft}} \text{ gemessen in cm}^3$$

$$Q_{214\text{Po}} = \frac{\Delta N}{v_{\text{Luft}}} \cdot 11800 \text{ Bq} / \text{m}^3 \quad ; \Delta N \text{ die je ROI gemessenen Zählimpulse}$$

## Überlegungen zur idealen Messzeit

Mit wachsender Messzeit werden mehr Ereignisse erfasst und entsprechend wächst auch die Messgenauigkeit. Weil die vorhandene Menge kurzlebiger Isotope nach etwa 4 Halbwertszeiten fast vollständig verschwunden ist, bringt eine Verlängerung der Messzeit darüber hinaus nichts. Außerdem würden die kurzlebigen  $^{218}\text{Po}$ -Isotope mit einer Halbwertszeit von 47 Minuten nochmals als  $^{214}\text{Po}$ -Isotope auftreten. Innerhalb von 9 Minuten Messzeit wird das bereits bei rund 3% der  $^{218}\text{Po}$ -Isotope passieren. Die Zahl der gemessenen  $^{214}\text{Po}$  Isotope würde entsprechend zu groß angezeigt. Eine Messzeit zwischen 6 und 9 Minuten ist ein guter Kompromiss für die zueinander gegenläufigen Fehlerquellen.

## Elektrostatische Aufladung vermeiden

Aus den Überlegungen weiter oben geht hervor, dass eine kurze Pumpzeit bei hohem Massendurchsatz angestrebt werden sollte. Der Luftstrom durch die Teflonmembran führt dort zu einer starken negativen Aufladung. Die in der Luft schwebenden, überwiegend positiv geladenen Isotopcluster werden bevorzugt angezogen. Bei hohen Potentialen können Isotope aus größerer Entfernung angezogen werden, was zu mehrfach überhöhten Messwerten führt. Die Halterung der Membrane sollte deswegen metallisch ausgeführt werden und während der Probenahme mit der Hand berührt werden. Dadurch vergrößert sich die Kapazität der Anordnung so weit, dass die entstehenden elektrostatischen Potentiale nicht zur Fehlerquelle werden, aber lokal ausreichend hoch sind, um die Isotopcluster nicht durch die Membrane passieren zu lassen.

## Gleichgewichtsfaktor

Werden Radonmessungen gemacht, beziehen sich alle Grenzwerte und Empfehlungen auf einen Gleichgewichtsfaktor von 0,4. Das heißt, dass nur 40% der entstehenden Folgeprodukte in der Luft verbleiben und eingeatmet werden können.

Verblieben alle Folgeprodukte in der Luft, würde sich ein Gleichgewicht zwischen den einzelnen Isotopen einstellen. Alle Zerfallsaktivitäten wären dann gleich.

im Gleichgewicht gilt:  $Q_{Rn222} = Q_{Po218} = Q_{Pb214} = Q_{Bi214} = Q_{Po214}$

Verbleibt  $^{218}Po$  in der Lunge, so werden zwei aufeinander folgende Alphazerfälle die Lunge schädigen. Einmal durch den Zerfall von  $^{218}Po$  selbst (Energie 6,0 MeV) und später durch den Zerfall des Folgeprodukts  $^{214}Po$  mit der Energie 7,7 MeV. Die anderen Isotope würden nur jeweils 7,7 MeV Energie in der Lunge deponieren.

In der Realität liegt nie ein Gleichgewicht vor. Die Aktivitäten der in der Luft verbleibenden Folgeprodukte sind kleiner als die Aktivität des Radons. Bei allen Grenzwerten und Empfehlungen wird davon ausgegangen, dass 40% der Folgeprodukte in der Luft verbleiben. Der Gleichgewichtsfaktor kann aber erheblich von dieser Annahme abweichen. Für den Gleichgewichtsfaktor gilt:

$$F = \frac{Q_{Po218} \cdot (6 + 7,7)MeV + Q_{Pb214} \cdot 7,7MeV + Q_{Bi214} \cdot 7,7MeV + Q_{Po214} \cdot 7,7MeV}{Q_{Rn222} \cdot (13,7 + 3 \cdot 7,7)MeV}$$

Bei unserem Gerät treten alle Isotope ab  $^{214}Pb$  als Summenwert  $^{214}Po$  auf (die Betastrahler werden nicht gemessen). Der Gleichgewichtsfaktor kann daher nur etwas grober bestimmt werden. Außerdem benötigen wir zusätzlich ein Radonmessgerät zur Bestimmung der Radonzerfallskonzentration. Es gilt:

$$F \approx \frac{Q_{Po218} \cdot 13,7MeV + 3 \cdot Q_{Po214} \cdot 7,7MeV}{Q_{Rn222} \cdot 36,8MeV}$$

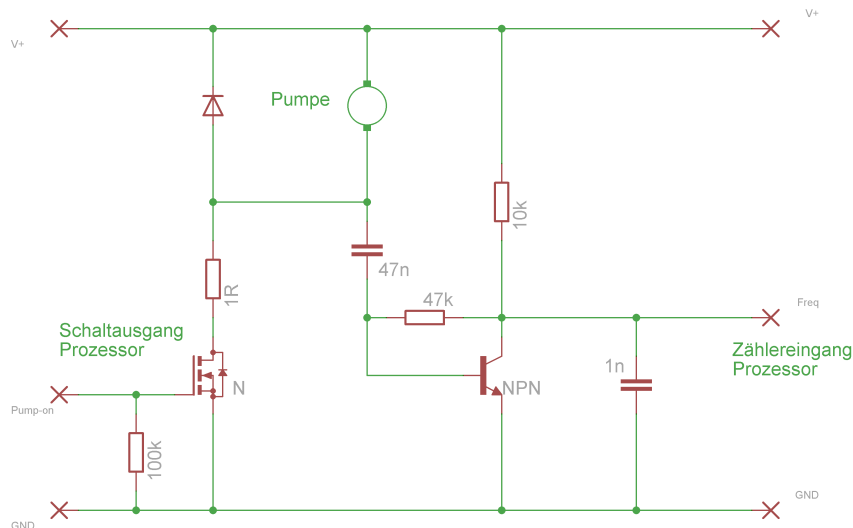
Anders herum können wir aus unseren Messungen die Radonzerfallskonzentration mit der Annahme  $F = 0,4$  berechnen. Der damit bestimmte Wert ist auf jeden Fall für Risikoabschätzungen gut, weil alle Grenzwerte und Empfehlungen von diesem Gleichgewichtsfaktor ausgehen. Vergleichsmessungen zwischen Eigenbaugerät und zertifizierten Messgeräten ergaben sehr gute Übereinstimmungen in Wohnräumen.

$$Q_{Rn222, F=0,4} = 2,5 \cdot (0,37 \cdot Q_{Po218} + 0,63 \cdot Q_{Po214})$$

## Anhang

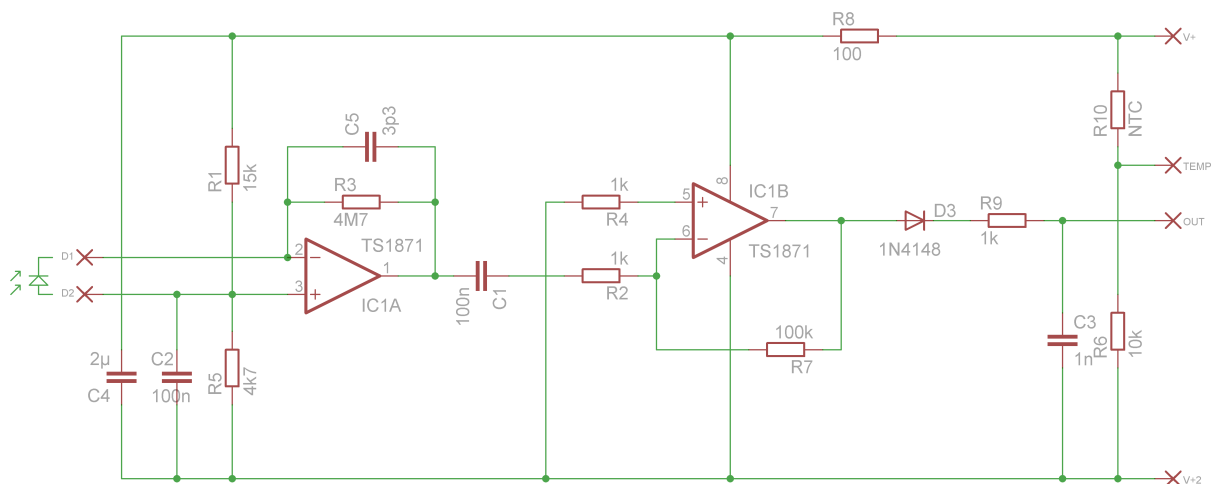
Einfache Schaltungsvorschläge zur Anpassung z.B. an Arduino-Boards.

### Motorsteuerung mit Drehzahlauswertung



Die Kommutierung des Bürstenmotors erzeugt über R1 (1 Ohm) Spannungsspitzen, welche mit dem NPN-Transistor auf digital verwertbare Signale verstärkt werden.

### Sensorverstärker und Peakdetektor (in Metallgehäuse einbauen)



Die Schaltung arbeitet mit nur einer Versorgungsspannung. Leichte Temperaturabhängigkeit besteht, weil die Diode D3 nicht in den Rückkopplungszweig integriert werden kann. Für eine Temperaturbestimmung am Verstärker kann der NTC-Widerstand verwendet werden. Der hier verwendete rail-to-rail-Operationsverstärker kann am Eingang auch Spannungen verarbeiten, die leicht negativ gegenüber der Masse sind (wichtig für IC1B). Der Kondensator C3 wird direkt mit dem AD-Wandler des Prozessors verbunden. Nach einem Zerfallereignis bleibt die Spitzenspannung solange im Kondensator erhalten, bis der Controller den AD-Eingang aktiv auf L-Pegel zieht. Dazu muss der entsprechende Pin kurzzeitig auf einen Digitalausgang umkonfiguriert werden.



Sowohl die Schaltung als auch der Prozessor werden mit einer geregelten Spannung von 5 Volt versorgt. Auch die Referenzspannung des AD-Wandlers ist auf 5 Volt eingestellt. R8 dient zusammen mit C4 als Tiefpassfilter für die Spannungsversorgung.

### Tipps zur Programmierung:

Die spektrale Analyse der Alphaenergien geschieht folgendermaßen: Der Prozessor misst solange die Sensorspannung, bis sie etwas abfällt. Der Maximalwert wird abgespeichert und die Speicherkapazität anschließend wieder entladen. Der Maximalwert bestimmt welcher Energiekanal incrementiert wird. Ideal ist es, etwa 32 Energiekanäle im Bereich zwischen 1,5 Volt und 3,5 Volt vorzusehen (für etwa 4,5 - 9 MeV). Das genaue Fenster muss experimentell bestimmt werden. Eine zu hohe Energieauflösung (zu viele Kanäle) führt zu niedrigen Zählraten je Kanal wodurch Peaks dann kaum mehr erkennbar sind. Bei der Division darauf achten, dass Kanalnummern Integerwerte sind. Ungünstige Teiler außerhalb von Zweierpotenzen führen in der Regel zu ungleicher Besetzung der einzelnen Kanäle. Bei der Verwendung niedrig getakteter Prozessoren (z.B. ATMEL-Mega-Serie) ist eine Assemblerroutine notwendig, um die erforderlichen Reaktionszeiten zu ermöglichen.

Mehrere Kanäle werden zu ROIs (**R**egion **O**f Interest) zusammengefasst. Die Energiekalibrierung erfolgt über Messungen z.B. im Keller. Dort tritt in der Regel nur Radon 222 auf. Es zeigt sich ein Peak bei 6 MeV für Po-218 und ein Peak bei 7,7 MeV für Po-214. Die Zählrate zu Po-214 kann durch sehr lange Pumpzeiten deutlich gesteigert werden.

Ein alter Glühstrumpf für Petroleumlampen oder mit Thorium dotierte WIG-Elektroden können als Radongenerator dienen, falls im Keller kein Radon auftritt. In einem Behälter entwickelt sich nach ca. 10 Stunden ein messbares Testgas. Die erzeugten Folgeprodukte des in der Natur nur wenig auftretenden  $^{220}\text{Rn}$  zeigen einen gut sichtbaren Peak bei ca. 8,8 MeV für Po-212. Ein weiterer Peak bei 6,7 MeV für Po-216 ist nur selten erkennbar. Für Schnelltests kann auch der Glühstrumpf direkt auf den Sensor gelegt werden. Das Ereignis mit der höchsten Energie ist dann aus Po-212 und definiert den oberen Grenzwert des Vielkanalanalysators. Allerdings treten auf diese Weise nur sehr unscharfe Peaks auf, weil die Alphateilchen aus sehr unterschiedlichen Entfernungen auf den Sensor treffen. Die "Bremswirkung" der Luft ist enorm! Die mit etwa  $10^7$  m/s startenden Alphateilchen sind nach 7 cm vollständig abgebremst. Die Versuche müssen natürlich bei völliger Dunkelheit am Sensor durchgeführt werden.

Hinweis: nur alte Glühstrümpfe (vom Flohmarkt) enthalten noch Thorium als radioaktive Quelle. Neuere Glühstrümpfe sind ungeeignet. Die thoriumdotierten WIG-Elektroden können zu vertretbaren Preisen regulär erstanden werden. Noch besser ist es, am Flohmarkt einen alten Wecker mit Radiumleuchtziffern zu erstehen. Damit kann ein Messgas für das eigentlich wichtigere  $^{222}\text{Rn}$  erzeugt werden.

## Geeignete Photodioden:

### BPX-61:

PIN-Diode mit  $2,65 \times 2,65 \text{ mm}^2$  aktiver Fläche. Das Gehäuse muss durch vorsichtiges Anschleifen rund um das Fenster geöffnet werden. Der kleine Chip führt zu relativ kleinen Erfassungswinkeln und damit auch niedrigeren Zählraten. Dafür erscheinen die Peaks sehr scharf und deutlich voneinander getrennt. Evtl. die Kontaktierung mit einem winzigen Tropfen Zweikomponentenkleber gegen mechanische Einflüsse sichern. Die Fläche des Chips muss aber unbedingt frei bleiben. Wegen größerer Pulshöhen muss R3 auf Werte zwischen 1,5 und 2,2 Megaohm reduziert werden.

Bezug:

Conrad, Pollin, Reichelt... halt die üblichen Verdächtigen. Preis ca. 12 €

### Silonex DS-SLCD-61N5:

blanker Chip mit großer Sensorfläche ( $9,5 \times 9,5 \text{ mm}^2$ ). Bei Mouser als PIN-Diode gelistet. Das ist aber wahrscheinlich falsch, weil die Kapazität der Diode sehr hoch ist. Die Chips sind trotzdem gut für unsere Messungen geeignet. Unbedingt mehr als einen Chip bestellen - der erste geht beim Löten sicher kaputt.

Bezug:

Für Privatbestellungen derzeit nur bei Mouser erhältlich. Sonst noch bei Farnell oder Digikey. Preis ca. 20 €

Solarzellen sind definitiv ungeeignet. Ideal sind großflächige PIN-Dioden (Spezialhersteller: Hamamatsu, Perkin-Elmer, Vishay - alle hervorragend geeignet, aber viel zu teuer).

## Quellen und weiterführende Literatur

- [1] A. Cigna, „Radon in caves“, *IJS*, Bd. 34, Nr. 1/2, S. 1–18, Jan. 2005, doi: [10.5038/1827-806X.34.1.1](https://doi.org/10.5038/1827-806X.34.1.1).
- [2] H. von Philippsborn und R. Geipel, *Radioaktivität und Strahlungsmessung*, 8. Aufl. in Blaue Buchreihe. 2006. Zugegriffen: 27. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.wolkersdorfer.info/publication/pdf/stmugv\\_app000009.pdf](https://www.wolkersdorfer.info/publication/pdf/stmugv_app000009.pdf)
- [3] H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*, 6. Aufl. Springer Spektrum, 2019. doi: [10.1007/978-3-662-60584-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60584-4).