

Rikamlno – Ein Radon-Ionisationskammer Break-Out für den Arduino

Bernd Laquai, 22.05.24

Wenn jemand in das Thema „ionisierende Strahlung“ einsteigt, dann benutzt er oft als Strahlungsquelle ein Stück Uranerz und für den Nachweis einen Geigerzähler. Aber genau genommen ist der Ansatz für den Nachweis doch schon sehr anspruchsvoll, was das Verständnis der Nachweismethode anbelangt. Ist das Zählrohr des Geiger-Müller Zählers zum Beispiel ein Standard Endfenster-Zählrohr wie z.B. das legendäre ZP1400 oder ZP1401 (= Vacutec 70072), dann ist das, was das berühmte Knacken bewirkt, doch schon ein sehr komplexes Geschehen. Trifft beispielsweise ein Beta-Teilchen mit hoher Energie die Wand des Zählrohrs, werden in vielen Fällen erst einmal auf der Innenseite der Kammerwand Sekundär-Elektronen aus dem Metall herausgelöst, in dem hohen elektrischen Feld der Hochspannung von der Kammerwand solange in Richtung Innenelektrode beschleunigt, bis sie mit Molekülen des Füllgases im Zählrohr so heftig kollidieren, dass sie diese ionisieren und dabei die freigesetzten Elektronen ihrerseits wieder beschleunigt werden. Diese ionisieren weitere Füllgas-Moleküle, bis eine Elektronenlawine entsteht. Gleichzeitig dissoziieren die Moleküle des Füllgases bei den Stoßprozessen zu Ionen und werden an der Kammerwand neutralisiert, so dass keine weiteren Sekundärelektronen beschleunigt werden können, und das weitere Anwachsen der Elektronenlawine gestoppt wird. Die Elektronenlawine entlädt sich schließlich an der inneren Elektrode schlagartig, so dass ein Stromimpuls entsteht, der zu einem Knacks im Lautsprecher verstärkt oder zum Zählen des Pulses durch einen Mikrocontroller verwendet werden kann. Diese Art des Nachweises mit dem Geiger-Müller Zählrohr ist ein recht perfider Trick, den Herr Müller am 5. Mai 1928 das erste Mal in seinem Laborbuch skizziert hat, um radioaktive Strahlung deutlich besser nachweisen zu können, als das bisher möglich war. Mit der normalen ionisierenden Wirkung radioaktiver Strahlung ganz ohne Hochspannung und Füllgas, wie in der freien Natur hat dieses Geschehen jedoch recht wenig gemeinsam.

Ein besseres Verständnis für die Wirkung ionisierender Strahlung bekommt man, wenn man als Nachweis eine offene Ionisationskammer für Raumluft verwendet. Mit einem heute verfügbaren, sehr kostengünstigen elektronischen Bauteil mit dem Namen „Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor“ (englisch abgekürzt JFET) ist der ganz direkte Nachweis der ionisierenden Wirkung der radioaktiven Strahlung ganz einfach möglich. Dazu reicht eine mit Haushaltsmitteln sehr leicht herstellbare Ionisationskammer, mit der man dann zum Geiger-Müller Zählrohr ganz vergleichbar empfindliche Messungen machen kann. In dieser offenen Ionisationskammer werden durch die ionisierende Wirkung der Strahlung die Luftmoleküle ionisiert, so dass die dadurch entstehende elektrische Ladung direkt gemessen werden kann. Oder in anderen Worten, die Ionisationskammer misst die in der Luft entstehende Ionendosis, die auch Ausgangspunkt für Strahlenschutz-Betrachtungen ist. Im Strahlenschutz wird aus der Ionendosis die Energiedosis berechnet (hier in Luft), welche dann mit einem Qualitätsfaktor für die Strahlungsart in die Äquivalentdosis überführt wird und welche schließlich dann die Einheit Sievert bekommt.

Die hier vorgestellte Ionisationskammer ist allerdings kein quantitativ hochgenaues Messinstrument, sondern für Ausbildungszwecke gedacht und kann zum Nachweis von radioaktiver und anderer ionisierender Strahlung verschiedenster Art verwendet werden, dazu zählen UV-Strahlung, Röntgenstrahlung sowie Alpha, Beta und Gammastrahlung aus festen und gasförmigen Quellen. Sie besteht aus lediglich einem Transistor und einem Widerstand und man kann sie ganz zeitgemäß, wie andere Sensor-Break-Outs einfach in einen Arduino-Mikrocontroller einstecken. Der Arduino führt die Messung mit dem internen Analog-Digital-Wandler durch und gibt die Daten dann wahlweise auf den Bildschirm, auf eine SD-Karte oder über in Bluetooth oder (W)LAN ins Internet aus. Das Besondere an dieser offenen, Freiluft-Ionisationskammer, wie hier beschrieben, ist jedoch, dass sie sich insbesondere für den Radon-Nachweis in der Raumluft eignet, was mit normalen Zählrohren recht schlecht möglich ist.

Die Ionisationskammer selbst besteht aus einer Konservendose, in der durch ein Teflon-Dichtungsband fixiert, ein dünner Draht gespannt ist der direkt am Gate des JFET-Transistors angelötet ist. Diese spezielle Verbindungs- und Isolationstechnik ist ganz essenziell, da Ladungen gemessen werden sollen, die nicht durch Leckströme abfließen dürfen. Durch ein Scheibchen Sperrholz getrennt ist auf die

Rückseite der Konservendose eine weitere Blechdose (Pulmoll-Hustenbonbons) aufgeschraubt, die als Abschirmung für den Ladung-zu-Spannungs-Konverter dient, der aus einem 47kOhm Widerstand und dem JFET-Transistor (SMP4117A) besteht. Die Front der aufgeschnittenen Konservendose ist, ebenfalls zur Abschirmung von Störfeldern, mit einer Kupfergaze bedeckt und elektrisch leitend mit der Konservendose verbunden. Zum Betrieb der Kammer braucht man lediglich etwa 20Volt, die man am einfachsten aus einem Laptop-Netzteil (19-19.5V) oder aus zwei 9V Blockbatterien gewinnt (18V). Der Arduino ist vermutlich das Teuerste an der ganzen Messeinrichtung. Neben der Detektion von ionisierender Strahlung aus den üblichen Haushaltsproben (Müllers Pottasche, Glühstrumpf, Uranglas, etc.), mit erstaunlicher Empfindlichkeit, ist es damit auch möglich das gasförmige Radon nachzuweisen. Für eine einfache Demonstration der Radon-Exhalation aus natürlichem uranhaltigem Gestein (Granit, Porphy) kann man in einen, mit einem Deckel dicht verschließbaren Eimer, in den man die Ionisationskammer zusammen mit ein paar Brocken Gestein oder mit 250g Superphosphatdünger (18%, Marke ICL) in einem Gefäß stellt, die Radon-Aktivitätskonzentration, die sich darin dann langsam mit der Halbwertszeit des Radons von 3.82 Tagen aufbaut, recht gut nachweisen. Da sich die Messkammer im Innern des Eimers und der Arduino außen befindet, kann man diese Sensor-Anordnung als Radon-Ionisationskammer Break-Out für den Arduino bezeichnen.

Das Konzept ist in einem Paper beschrieben, das eine IoT-taugliche Methode für Radonmessungen zur Erdbeben-Früherkennung vorgestellt, was auch eine interessante Anwendung fürs Radon-Monitoring im Citizen Science Bereich darstellt /1/. Nur gibt es im deutsch-sprachigen Raum glücklicherweise bisher wenig kritische Erdbeben, und dort, wo man es bräuchte, sind die IoT-Anwendungen und das dafür notwendige Internet vermutlich eher weniger vorhanden, außer vielleicht in Japan und in der Gegend um San Francisco. Dort sind aber die Häuser entsprechend solide gebaut und die Bürgermeister werden nur selten bestochen, um mit lausigem Beton noch eine Etage mehr aufstocken zu dürfen.

In diesem oben genannten Paper auf Seite 6, taucht die für die Funktion entscheidende Abbildung (hier Abb. 1) auf:

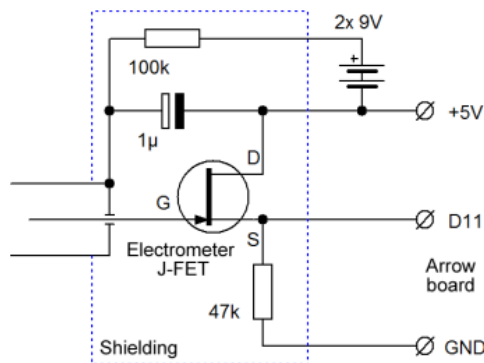


Figure 4. Simplest concept schematics of sensing circuitry—discharge method.

Abb. 1: Grundlegendes Prinzip der Radon-Ionisationskammer aus /1/

Der „Value-Add“ dieser Arduino BreakOut Beschreibung besteht also lediglich darin, dass die Messmethode, die in diesem Paper dargestellt ist, auf etwas „Bastelbares“ abgebildet wurde, ein geeigneter JFET ausgesucht und getestet wurde, und dass als Mikrocontroller, den etwas verbreitetere Arduino verwendet wurde anstelle des im Paper erwähnten „Arrow Boards“. Außerdem soll hier der Allgemeinheit auch ein minimal aufwändiger Code (Sketch) für den Arduino zur Verfügung gestellt werden um die Ionisationskammer einfach betreiben zu können. Selbstverständlich soll auch das Funktionsprinzip noch etwas ausführlicher erklären werden, da ja nicht jeder den entsprechenden Background zur JFET-Halbleitertechnologie parat hat.

Wie man also der Abbildung 1 entnehmen kann, ist der Schlüssel zum Erfolg die Verwendung eines „Electrometer J-FET“. Zunächst ist so ein JFET im Gegensatz zu dem zwischenzeitlich bekannteren

MOSFET nicht durch ein immer isolierendes „Gateoxid“ vom Halbleiter getrennt, sondern mit einer Sperrschicht variabler Dicke im Halbleiter selbst. „Electrometer-grade JFET“ nennt man einen n-Typ JFET dann, wenn der Sperrstrom zwischen dem p-Gate und dem n-Kanal (gesperrte Diode) im Bereich von Picoampere liegt. Ein ganz normaler JFET aus der Bastelkiste tut also für eine Anwendung als Ladungswandler in einer Ionisationskammer eher selten, weil einerseits der Ionisations-Strom aus ein paar 100Bq/m^3 Raumluft sehr gering ist und schnell von Leckströmen überlagert wird und weil andererseits auch die Kapazität der Gate-Elektrode sehr klein sein sollte, sonst wartet man ewig, bis das Gate geladen ist. Ansonsten funktioniert so ein JFET ähnlich wie eine Elektronenröhre mit einem Gitter (Triode): Liegt eine Spannung von 0V und weniger am Gate (also negativ), lässt sich der Strom durch den Kanal zwischen Source und Drain mit dem Gate über die Ausdehnung der Sperrschicht quasi leistungslos steuern. Legt man den Drain-Anschluss an eine positive Spannung und setzt man dann einen hochohmigen Widerstand zwischen Source und Masse, bekommt man die bekannte „Source-Follower“ Schaltung, bei der die Spannung am Source-Anschluss der Spannung am Gate folgt. Sie ist in diesem Fall lediglich um die Sperrspannung der Gate-Kanal-Diode kleiner als die Gate-Spannung. Durch die leistungslose Steuerung hat die Schaltung also den Charme, dass der Innenwiderstand mehr als $1\text{E}12$ Ohm erreicht, sowie dass der JFET naturgemäß deutlich weniger rauscht als ein MOSFET und zusätzlich einen begrenzten internen Schutz gegen statische Aufladung (ESD) hat, weil sich das Gate nicht grenzenlos aufladen kann, sondern der Sperrstrom die Ladungsspeicherung begrenzt.

Electrometer-grade Operationsverstärker mit JFETs gibt es schon seit längerem, sie erfordern aber doch etwas mehr externe Beschaltung und sind nicht immer so leicht zu verstehen. Außerdem kosten gute OPs schon etwa das Zehnfache eines diskreten JFETs. Zudem muss man relativ viel Aufwand auf der Leiterplatte betreiben, um Leckströme zu begrenzen. Nun hat sich aber in den letzten Jahren die amerikanische Firma InterFET im Bereich der diskreten electrometer-grade JFETs als guter Lieferant hervorgetan. Die Verwendung solcher diskreter JFETs macht die Schaltungstechnik deutlich einfacher und günstiger. Der JFET-Typ, der hier für die Anwendung in der Ionisationskammer ausgewählt wurde, ist der SMP4117A (bzw. in den anderen Package Formen der PN4117A bzw. 2N4117A) von InterFET.

Dabei sind die SOT23-Gehäuse (SMP) und TO92-Gehäuse (PN) Varianten deutlich billiger als das TO72-Gehäuse aus Metall (2N Präfix). Wichtig ist der Buchstabe A am Ende der Typenbezeichnung bei allen Gehäuse-Varianten, weil das den Gate-to-Source Reverse Current (Igss) betrifft, der in diesem Fall mit max. -1pA spezifiziert ist. Der 2N4117A ist in der Standard Library des bekannten und kostenlosen Simulationsprogramms LTSpice von Analog Devices bereits enthalten, so dass man das Transistor-Modell für eine Simulation nicht händisch einbinden muss. Wenn man die Schaltung noch mit ein paar Ergänzungen versieht und mit hoher Zeitauflösung simuliert, versteht man schnell das Prinzip, wie der JFET in dieser Anwendung funktioniert. Wichtig ist, dass klar wird, dass es bei dieser Anwendung um Ladungen geht und weniger um die Ströme. Die ionisierende Strahlung erzeugt durch die Ionisation Ladungen, welche auf dem Draht in der Kammer aufgesammelt werden. Die Ladung auf dem Draht erzeugt eine Spannung auf der Gate-Kapazität des JFET und die Source Spannung folgt der Gate-Spannung. Deswegen wirkt die Schaltung wie ein Landungs-Spannungs-Konverter.

Ein weiterer Trick, der in dem Paper vorgestellten Methodik besteht darin, dass am Source-Anschluss ein Analog-Digital-Konverter (ADC), wie er in vielen IoT-Mikrocontrollern intern zur Verfügung steht, direkt angeschlossen werden kann, so dass nun die Ladung auf dem Gate gemessen und dann digital weiterverarbeitet werden kann. Zusätzlich kann aber bei so einem Mikrocontroller der ADC-Eingang auch programmgesteuert vom Eingang zum digitalen Ausgang umfunktioniert werden und so die vorhandene Source-Spannung überschrieben werden, was zu einer Entladung des Gates führt. Dabei ist der maximale Strom einerseits durch den $47\text{k}\Omega$ Source-Widerstand und andererseits durch den maximalen Drain-Sättigungsstrom bzw. beim Entladen des Gates durch den maximalen Strom des Mikrocontroller Output Pins begrenzt.

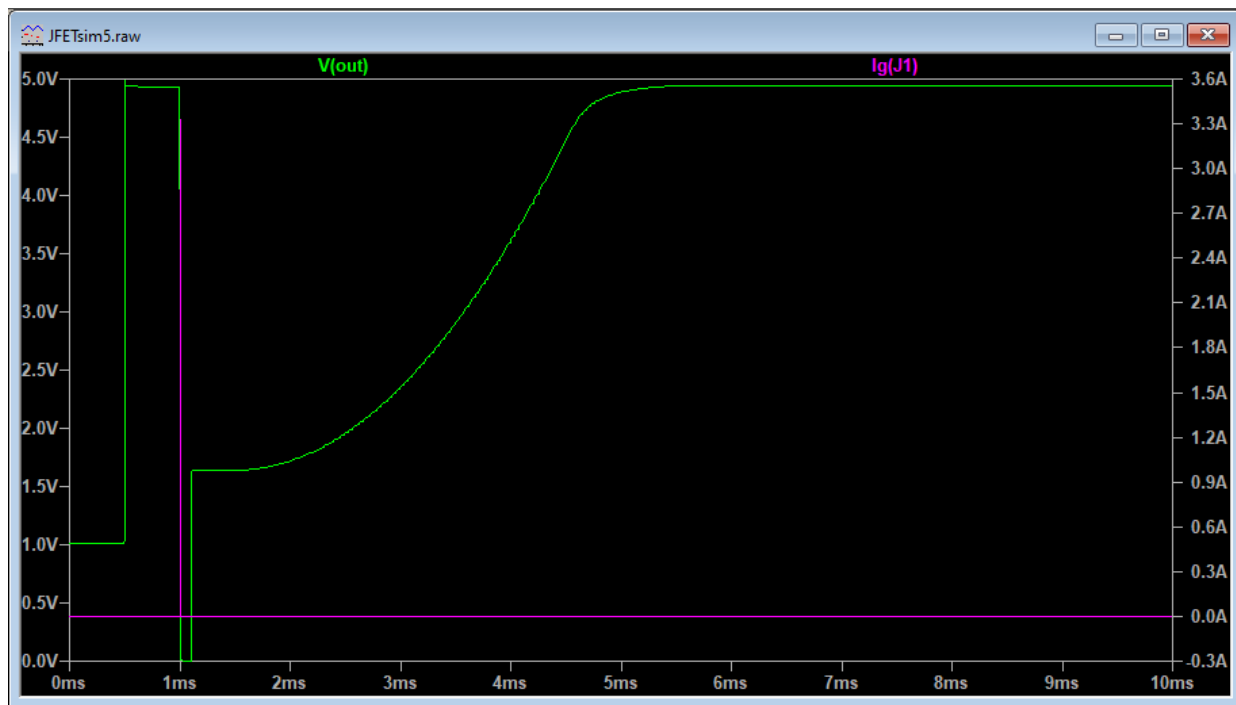
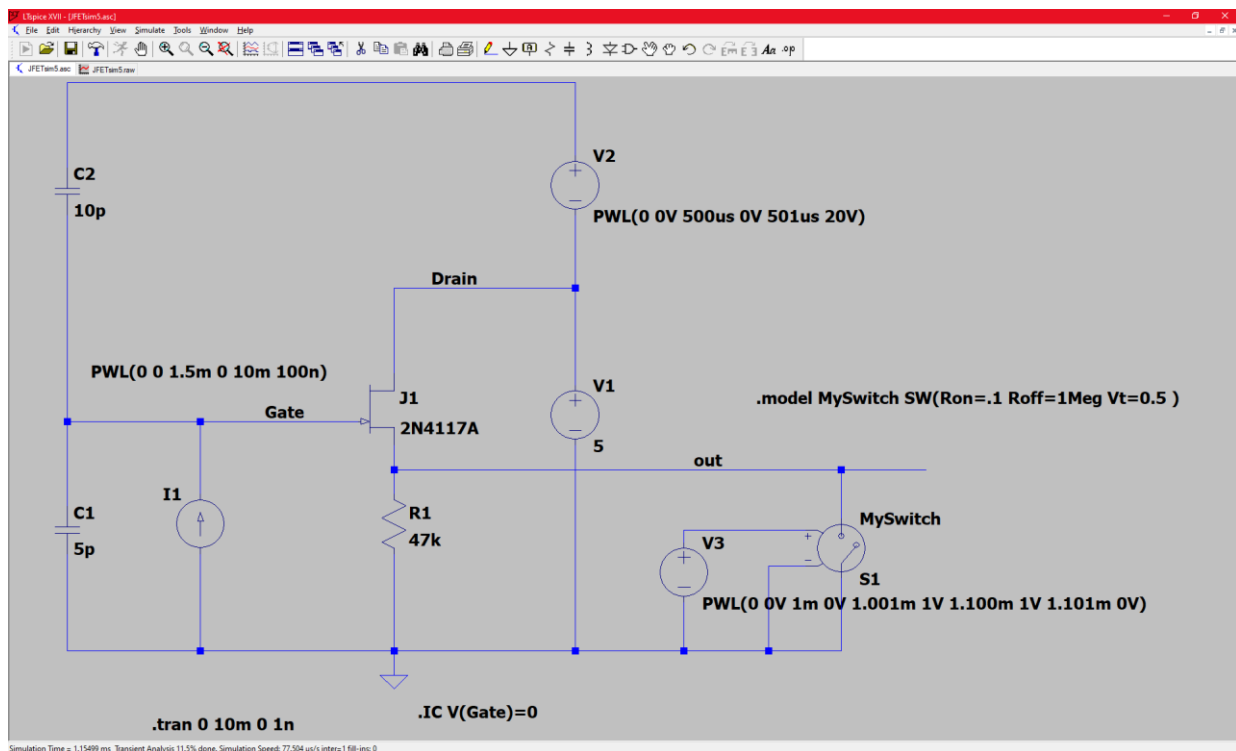


Abb. 2a, b: Simulation der Grundsaltung aus /1/ mit LTSpice

Simuliert man nun die Funktion der Schaltung unter der Annahme, dass die Kammer gegenüber dem Draht eine Kapazität von 10pF hat und am Gate nochmal eine parasitäre Kapazität von 5pF gegen Ground liegt (sehr grobe Schätzung), dann sieht man ausgehend von einer Gate Spannung von 0V (initial condition .IC), dass das Anschalten der Kammer von 20V dazu führt, dass durch die Ladungskopplung das Gate zunächst folgt, aber knapp unterhalb von 5V stehen bleibt. Dies ist so, weil dann ein Strom durch den Kanal fließt, der einen Spannungsabfall von fast 5V am Source Widerstand erzeugt, so dass die Drain-Source Spannung gegen 0V geht und die Gate-Spannung nur wenig positiver werden kann, ohne dass der Gate-Kanal Sperrstrom zunimmt und dem weiteren Aufladen ein Ende setzt. Der Mikrocontroller misst daher immer weniger als 5V an seinem Eingang. Wenn nun in der

Simulation nach 1ms der Mikrocontroller den „out“-Pin auf Ausgang schaltet und der „out“-Pin auf „Low“ gesetzt wird, um den Source-Anschluss auf null zu ziehen (hier in der Simulation mit der Konstruktion um den Schalter „MySwitch“), dann muss man genau hinschauen (bzw. in den Zeitbereich um 1ms hineinzoomen), dann sieht man einen kurzen Peak für den Gatestrom. Dieser Gatestrom fließt in der Simulation, ohne den Innenwiderstand des Mikrocontroller Ausgangs zu berücksichtigen, nur für ein paar Nanosekunden und schießt auf daher auf mehr als 2A hoch und entlädt die kleine Gate-Kapazität von 3pF schlagartig, weil für Source=5V und $V_g < 5V$ die Gate-Kanal Diode vorwärts gepolt ist. Das regelt sich aber schnell, denn wenn das Gate unter 0.4V entladen wird, dann entsteht gleich wieder eine Sperrschicht um das Gate, so dass sich der Strom in das Gate auf den Sperrstrom bei dieser Spannung reduziert. Schaltet der Mikrocontroller dann wieder auf Input und beginnt nun mit dem ADC zu messen, dann springt das Gate durch die kapazitive Kopplung Source-Gate auf etwas über 1V hoch und die Source Spannung folgt dem entsprechend. Dies reflektiert dann die Ladung auf dem Gate des JFET zu Messbeginn. Ab 1.5ms in der Simulation wird nun die Wirkung der ionisierenden Strahlung simuliert, die dazu führt, dass sich auf dem Draht in der Kammer positiv geladenen Ionen sammeln (die durch einen Strom von 100nA dargestellt werden) und auf diese Weise eine positive Ladung auf den Draht und das Gate fließt. Da der Draht mit der Kammer eine gewisse Kapazität bildet und das Gate eine kleine Kapazität mit dem Kanal bildet führt das Anwachsen der Ladung auch zu einem Ansteigen der Spannung am Gate. Das aber hat ein Ansteigen des Stromflusses durch den Kanal zur Folge, der einen höheren Spannungsabfall am Source-Widerstand erzeugt und der somit der Gate-Spannung folgt, bis wieder knapp 5V am Source-Anschluss erreicht sind.

Interessanterweise braucht man keine Hochspannung, um die in dem Kammer-Volumen erzeugten Ionen zu trennen und die positiven Ionen Richtung Draht zu beschleunigen, um das Gate zu laden, dazu reichen bereits ca. 20Volt.

Man sieht also auch in der Simulation sehr schön, wie die erzeugten Ionen das Gate langsam aufladen und die Gate-Spannung wieder gegen 5V geht. Jetzt kommt ein weiterer Kniff in der Mess-Methodik zum Tragen, die in dem Paper beschrieben ist. Der Mikrocontroller läuft in einer Schleife und obiger Prozess wiederholt sich periodisch, weil das Entladen des Gates automatisch initiiert wird, sobald die Gate-Spannung eine gewisse obere Schwelle erreicht. Das erzeugt nun einen sägezahn-artigen Verlauf der vom ADC gemessenen Spannung am Source-Anschluss des JFET. Da die Zeitdauer für das Ansteigen der Source-Spannung vom Ansteigen der Menge der Ionen, die in der Kammer durch die ionisierende Strahlung generiert werden abhängt, ist die Frequenz des sägezahn-förmigen Signals zur Aktivität der ionisierenden Strahlung proportional. Man misst also die Frequenz (bzw. die inverse Periodendauer) um die Aktivität bzw. Stärke der ionisierenden Strahlung, die in die Kammer gelangt, zu bestimmen.

Nun könnte man theoretisch eine Fast-Fourier-Transformation bemühen (das gibt es auch als Library für den Arduino), um die Frequenz der Sägezahn-Schwingung sehr genau zu bestimmen. Aber das braucht es gar nicht. Es reicht, wenn eine Programmschleife mit dem Entladen des Gates beginnt und man nach Erreichen einer oberen Schwelle für die Source-Spannung, die Zeitdifferenz zum Schleifenbeginn misst und dann die Schleife beendet. So bekommt man die Periodendauer des Sägezahns und kann dann die Frequenz durch Invertieren berechnen. Das erscheint gegenüber den anderen möglichen Fehlerquellen ausreichend genau zu sein. Und damit ist man auch abgesehen von einer Kalibrierung für eine quantitatives Messen bereits fertig. Es muss aber auch gesagt werden, dass sich selbst ohne Strahlung, die Spannung am Source des JFET sehr langsam an die Drain-Spannung von 5V annähert. Das liegt an dem parallel zum Ionisationsstrom vorhandenen, sehr kleinen Sperrstrom. Damit entsteht also auch ein periodisches Signal, aber mit sehr großer Periodendauer. Im Gegensatz dazu erzeugt eine große Aktivität eine sehr kleine Periodendauer. Man bekommt also auch ganz ohne Strahlung einen gewissen Nulleffekt, so wie auch bei einem Geigerzähler.

Hier soll nun eine einfache sehr pragmatische Implementierung dieser Art von Ionisationskammer, wie sie in der genannten Veröffentlichung vom Prinzip her beschrieben ist, als BreakOut für den Arduino beschrieben werden. Die Ionisationskammer besteht aus einer einfachen 73x110mm Konservendose. Dazu wird die Oberseite der Konservendose mit einem Sicherheits-Dosenöffner aufgeschnitten, der den

Dosenfalz von der Seite her aufschneidet und keinen Rand lässt, an dem man sich schneiden könnte. In die Unterseite wird mit einem 10mm Holzbohrer ein Loch gebohrt und ein abisolierter, sehr dünner Draht (z.B. ein Wire-Wrap Draht mit 30AWG/0.25mm Durchmesser) hindurchgeführt, der sehr leicht ist. Um ihn axial-zentrisch in der Dose zu fixieren wird ein super dünnes Teflon-Dichtungsband mit 0.1mm Dicke (zum Dichten von Rohrleitungsverschraubungen aus dem Baumarkt) über das 10mm Loch gelegt und auf dem Blech mit Tesafilm festgeklebt. Das Teflonband wird im Zentrum mit einer Stecknadel durchstoßen, so dass man den dünnen Draht hindurchstecken kann. Im vorderen Teil der Dose wird quer zur Dosenachse, entlang des Durchmessers, ein der Länge nach halbiertes Stück Teflonband gespannt, in das ebenfalls mit einer Stecknadel ein Loch gebohrt wird. Das halbierte Teflonband wird durch Langlöcher in der Dosenwand gespannt und außen ebenfalls mit Tesafilm festgeklebt. Der dünne Draht wird ebenfalls durch dieses Loch gefädelt und wird so nun von den zwei dünnen Teflonbändern entlang der Dosenachse von der Kammer gut isoliert in der richtigen Lage gehalten. Teflon ist ein sehr guter Isolator.

Auf die Unterseite der Konservendose wird nun eine Blechdose für Hustenpastillen als Abschirmung für den Verstärker montiert. Als DC-Isolation zur Kammer wird zwischen Konservendose und Pulmolldose eine 3mm Sperrholzscheibe montiert und ebenfalls mit dem 10mm Holzbohrer durchbohrt. Beide Dosen werden, um auch die eigentliche Kammer vor eingestreuten Störungen zu schützen, mit einem 10nF verbunden (nur AC-Kopplung). In die Pulmolldose wird eine Buchse zur Spannungsversorgung und eine SMA-Buchse für das Auskoppeln des Source-Signals montiert. Der JFET wird mit dem Drain- und Source-Anschluss an die Kante einer Lochraste-Platine gelötet (das SOT23 Gehäuse des SMP4117A) und die Lochraster-Platine mit einem Kupferblechstreifen so in der Pulmolldose festgelötet, dass das Gate über den 10mm Löchern zwischen den Dosen zu liegen kommt. Dann wird der Kammer- Draht ohne einen Flussmittelrest auf dem Transistor-Gehäuse zu hinterlassen am Gate-Beinchen des JFET festgelötet (Flussmittel im Lot vorher verdampfen lassen). Diese Maßnahmen zur Vermeidung jeder Art von Leckströmen sind sehr essentiell für die korrekte Funktion der Anordnung. Am Ende der Montage wird die geöffnete Dosenseite mit einem dünnen, feinmaschigen Kupfer-Netz bedeckt um sicherzustellen, dass das Innere der Kammer von allen Seiten elektrisch abgeschirmt ist.

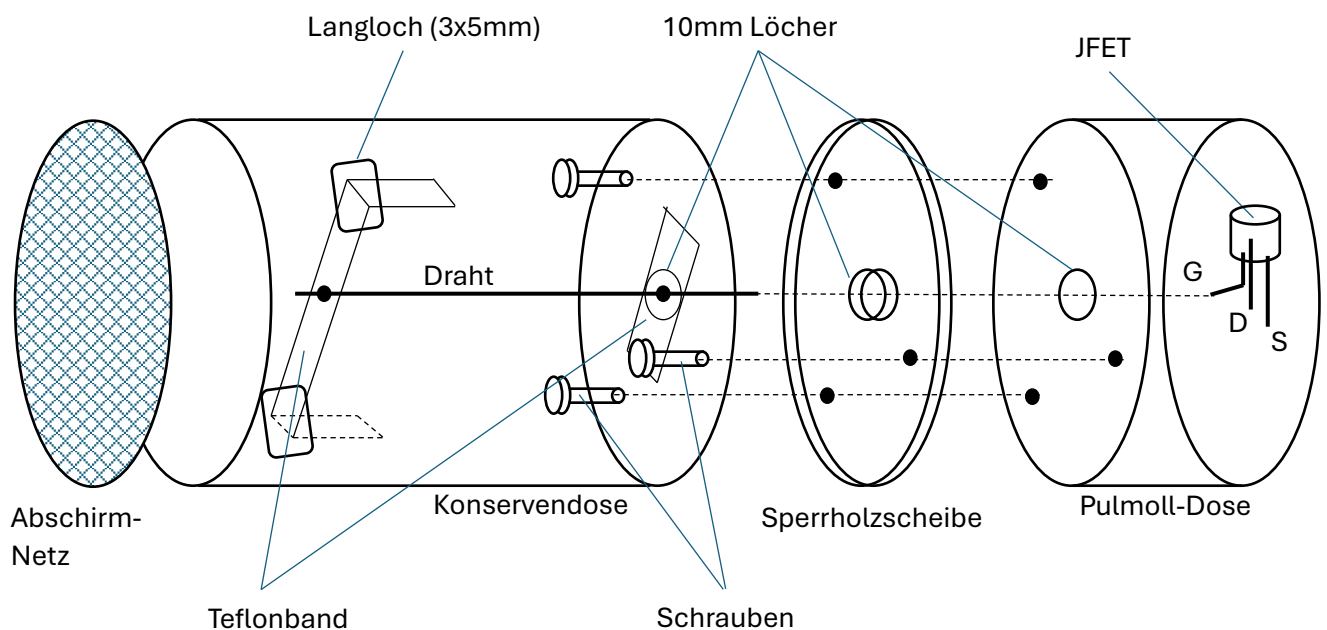


Abb. 3: Schematische Zeichnung zum mechanischen Aufbau



Abb. 4a, b: mechanische Bauteile und Kunststoffschrauben zum Verschrauben der Dosen



Abb. 5a, b: Isolationsscheibe aus Sperrholz und verschraubte Dosen



Abb. 6a, b: Oberes halbiertes Teflonband und Bohren der Löcher für die Buchsen

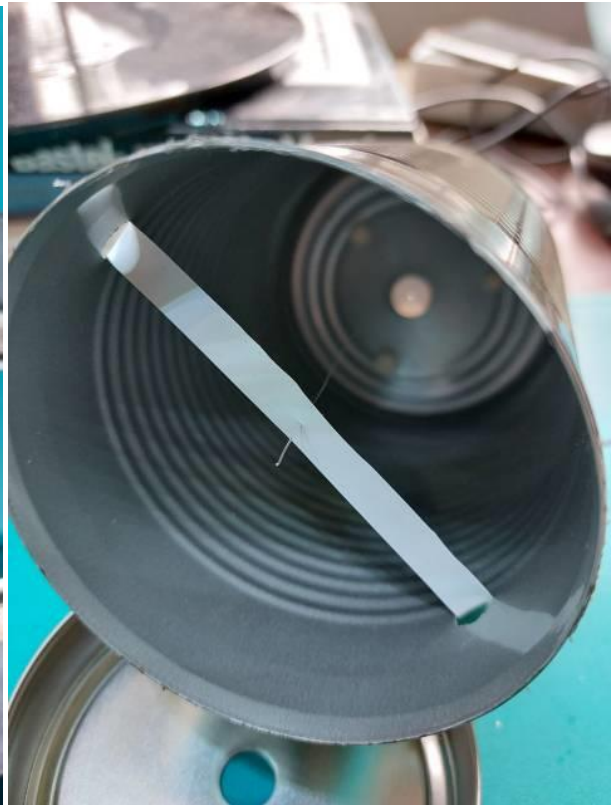


Abb. 7a, b: Lötén der JFET-Platine und Einfädeln des Kammerdrahts

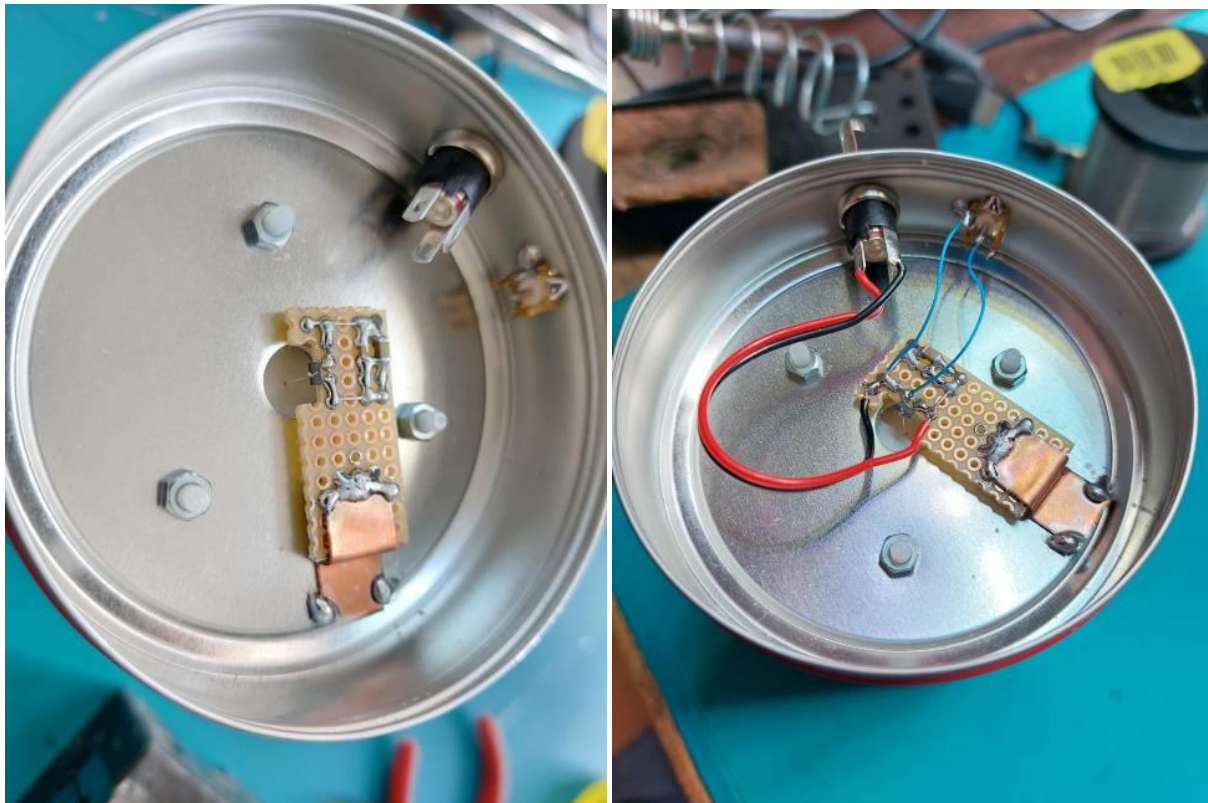


Abb. 8 a, b: Einlöten der JFET-Platine und Anschließen an die Buchsen



Abb. 9a, b: Koppelkapazität zwischen den Dosen und Abschirmgitter

Hier die sehr überschaubare, schematische Verschaltung des Ionisationskammer Break-Outs mit dem Arduino:

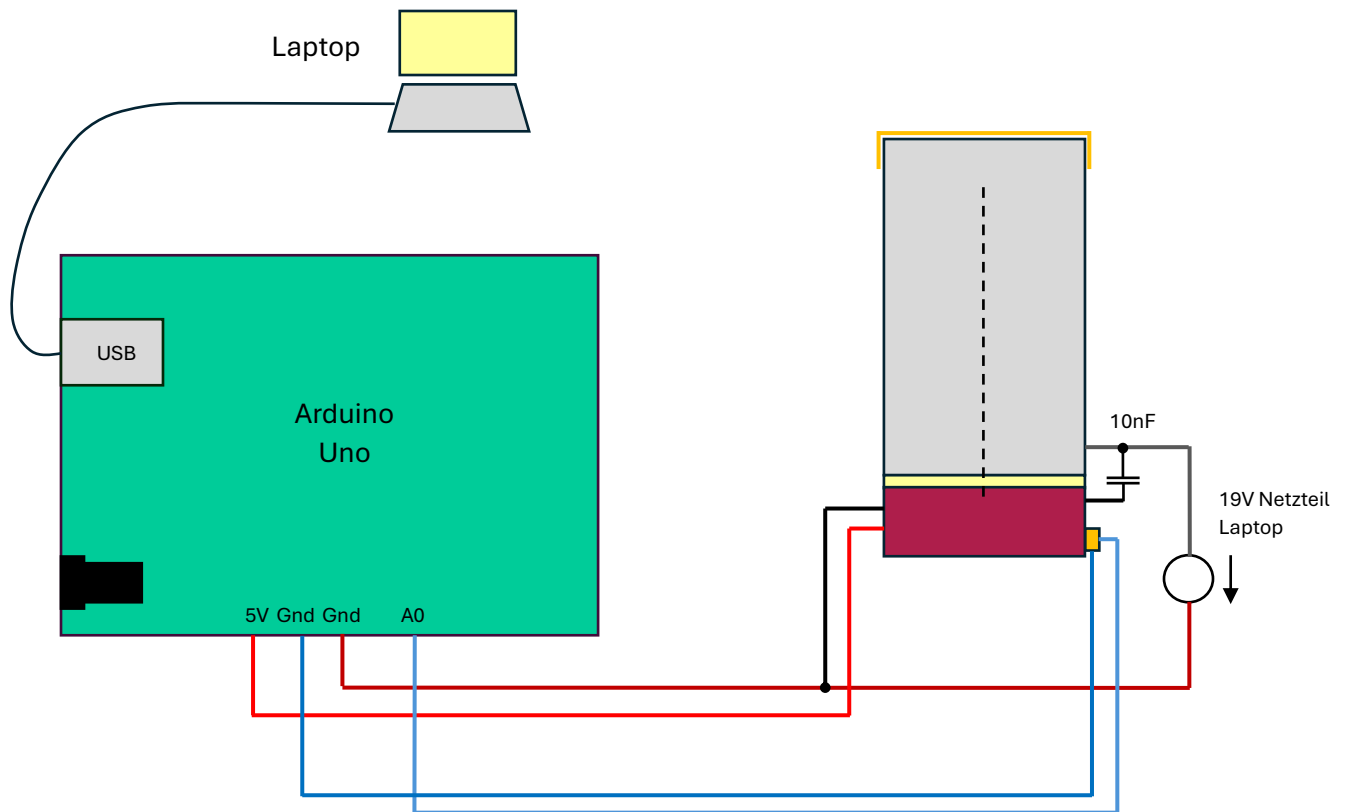


Abb. 10: Schematischer Aschaltplan des RikamIno BreakOuts am Arduino

Bei dieser Verschaltung mit dem Arduino wird die 5V Spannungsversorgung des Arduino Uno auch zur Versorgung der JFET-Platine verwendet. Der Signalausgang der Platine wird mit einem gut geschirmten Kabel an den Analog-Pin A0 und an Ground des Arduino angeschlossen. Wichtig ist, dass alle Elektronik in der Kammer sehr gut geschirmt ist. D.h. es muss auch sichergestellt sein, dass das engmaschige Gitter eine gute Verbindung zur Konservendose hat.

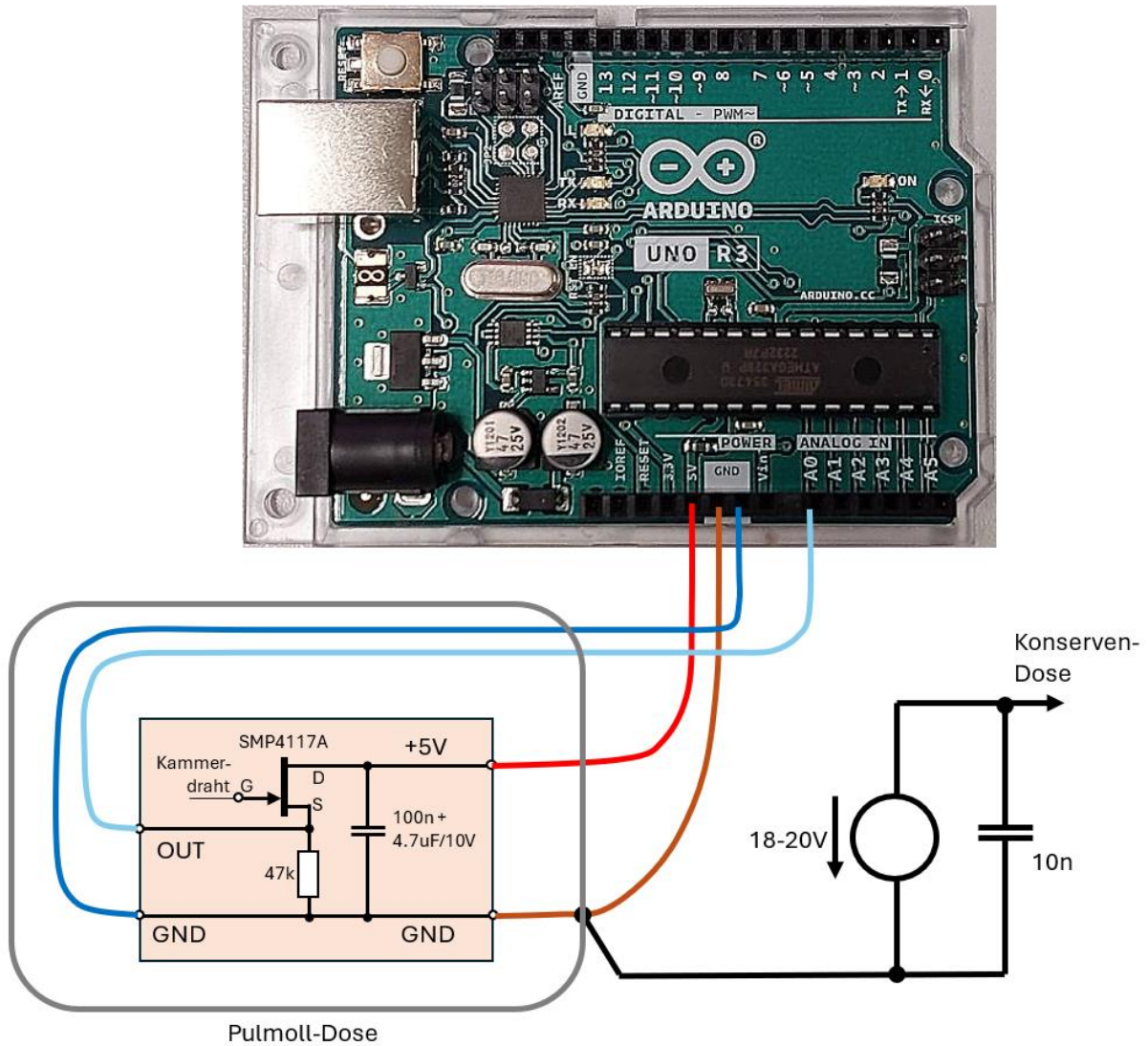


Abb.11: Anschluß der JFET-Platine in der Pullmol-Dose an den Arduino

Diese schematische Zeichnung zeigt nochmal wie die Komponenten auf der JFET-Platine mit dem Arduino verbunden sind. Man sieht hier auf der Platine noch ein 100nF und ein 4.7uF/10V Kondensator zum Abblocken von Störungen auf der Versorgungsspannung.

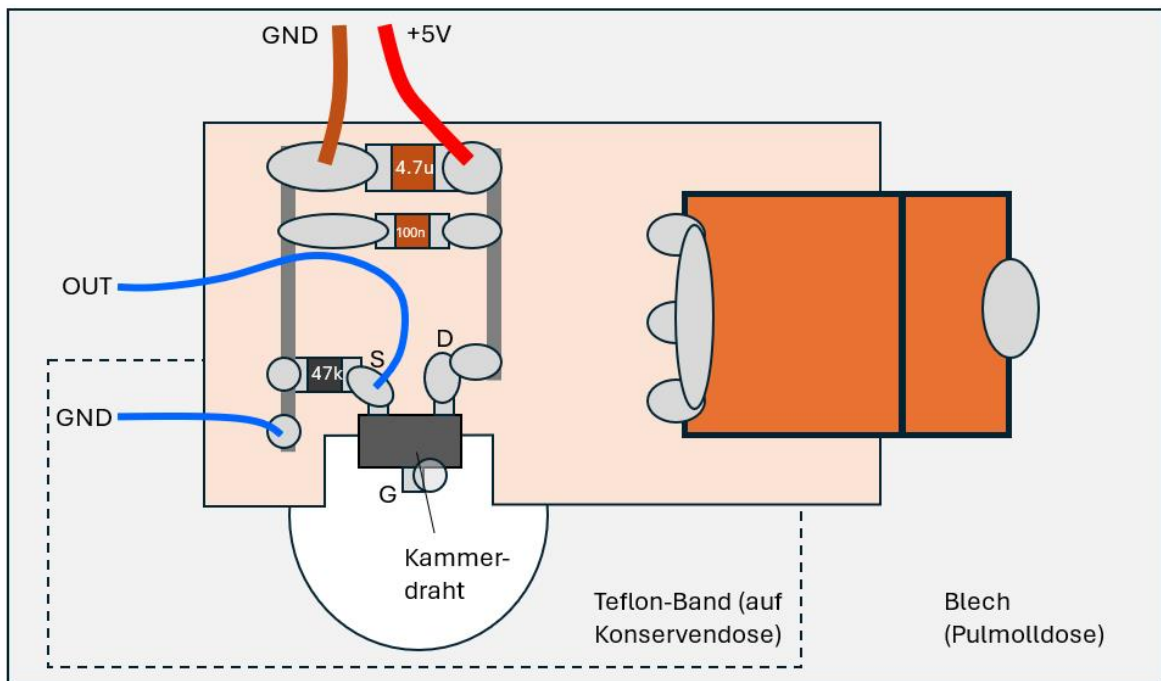
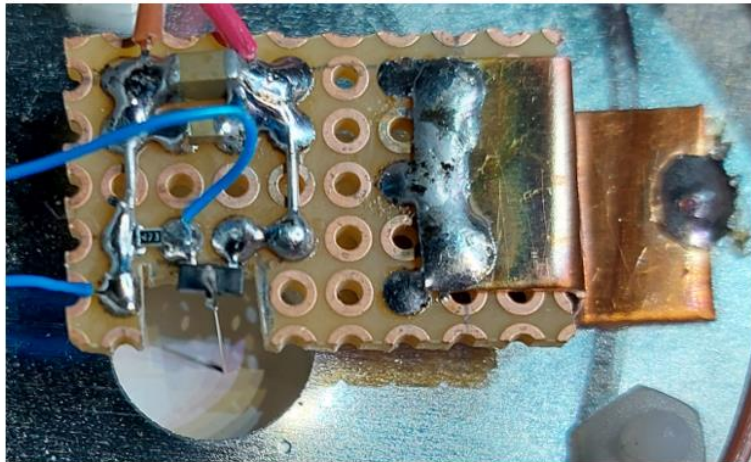


Abb. 12 a, b: Foto der JFET-Platine und schematische Darstellung der Lötverbindungen

Als Arduino Sketch kann folgender einfacher Code verwendet werden:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int out = A0;
  int adcValue = 0;
  unsigned long timeStart, timeStop, dt;
  float volt;

  pinMode(out, OUTPUT);
  digitalWrite(out, LOW); // discharge
  delay(1000);
  digitalWrite(out, HIGH);
  pinMode(out, INPUT);
  delay(1000);
  volt = 0;

  timeStart = millis();
  while (volt < 3.0) {
    adcValue = analogRead(out);
    volt = (float) adcValue*5/1023.0;
    timeStop = millis();
    dt=(timeStop-timeStart)/1000.0;
    //Serial.println(volt);
    delay(10000);
  }
  Serial.println(dt);
}
```

Hierin ist out die Variable, die den IO-Pin spezifiziert, der am JFET Source angeschlossen ist und an dem gemessen werden soll. Beim Arduino gibt es bestimmte IO-fähige Pins, die man von Input auf Output umschalten kann, sie beginnen mit A. Der hier verwendete A0 ist der erste davon. Die Variable adcValue nimmt den gewandelten Roh-Messwert des ADC in LSBs auf, und volt ist der daraus berechnete Spannungswert in Volt, den man mit der Simulation bzw. mit Werten an einem Multimeter oder an einem Oszilloskop vergleichen kann. Die Variablen zur Zeitmessung haben selbsterklärende Namen.

Im Code Block vor der while-Schleife wird der IO-Pin mit pinMode auf Ausgang geschaltet und auf low gelegt, um die Entladung des Gate zu erreichen. Zur Sicherheit wird dafür eine Sekunde gewartet, was aber sehr großzügig bemessen ist. Danach wird der IO-Pin mit pinMode auf Input geschaltet und nochmal 1 Sekunde gewartet. Danach müsste die Spannung am Source des JFET etwas über 1Volt betragen. Dann holt man sich noch mit millis() die Zeit vor Schleifen-Beginn für die spätere Berechnung der Periodendauer während eines while-Schleifendurchlaufs. Jetzt können ADC-Messungen in der while-Schleife so lange gemacht werden, bis die Spannung über den Schwellwert von 3Volt gestiegen ist. Diese obere Schwelle von 3V wurde empirisch bestimmt für den speziellen hier verwendeten JFET bestimmt. Dieser Wert könnte bei anderen JFET-Exemplaren losabhängig sehr stark streuen. Man kann ihn nur experimentell bestimmen. Es ist dabei wichtig, dass diese Schwelle unter allen Bedingungen immer erreicht wird, also auch bei schwachen Strahlungsquellen. Man sollte ihn als ohne Strahlungsquelle mit einer „Kalibriermessung“ bestimmen. Dann wird im Programm der ADC

ausgelesen und man berechnet die zugehörige Spannung zum Messwert in LSB. Danach wird die Zeit seit Schleifenbeginn dt berechnet. Um den Verlauf des Spannungssignals am Source-Anschluss mit dem Serial-Plotter der Arduino IDE anschauen zu können, gibt man nun den Spannungswert auf die serielle Schnittstelle aus. Dazu muss das Kommentar-Zeichen vor `Serial.println(volt)` entfernt werden. Diese Zeile bleibt jedoch normalerweise auskommentiert, wenn nur die Periodendauer des Sägezahn-Signals gemessen wird. Danach kann man noch eine Zeitverzögerung einbauen, damit nicht zu viele Messwerte produziert werden. Sobald die obere Grenze des Spannungswerts (hier 3V) überschritten wird, verlässt man die while-Schleife und gibt nur die Dauer dt einer Sägezahnperiode auf dem Serial-Monitor aus. Für das Plotten des Spannungsverlaufs kommentiert man jedoch die Anweisung aus, welche dt ausgibt. Danach ist dann ein Sägezahn abgelaufen und das übergeordnete Loop()-Konstrukt des Arduino Sketches beginnt mit der Messung des nächsten Sägezahns.

Wenn man die Ionisationskammer in Betrieb nimmt, ist es doch sehr überraschend, mit welcher Empfindlichkeit sie auch auf die einfachen Haushalts-Strahlungsquellen reagiert, wie zum Beispiel ein Päckchen Pottasche (Backtriebmittel). Es gibt etliche kommerziell erhältliche Geigerzähler, die auf so eine Probe überhaupt nicht reagieren, vor allem wenn das Zählrohr durch ein Plastik-Gehäuse abgeschirmt ist. Man merkt auch recht schnell, dass die Ionisationskammer recht deutlich selbst auf schwache Alpha-Strahlung reagiert. So emittiert ein Stückchen „Trinitit“ auch noch heute Alphastrahlung aus dem unvollständig gespaltenen Plutonium-239 (Halbwertszeit 24110 Jahre), die man mit der Ionisationskammer noch deutlich sieht, während man die anderen Radionuklide mit deutlich kürzerer Halbwertszeit mit Hobby-Mitteln kaum noch nachweisbar ist. Es gibt allerdings auch einen Nulleffekt, der dadurch zustande kommt, dass der Gate-Kanal-Sperrstrom nicht wirklich Null ist. Ganz grundsätzlich reagiert die Kammer auf alle Strahlungsarten. Da jedoch die Alphastrahlung stark ionisierend wirkt, gefolgt von der Betastrahlung, sieht man bei der Gammastrahlung einen eher geringeren Effekt.

Misst man die unbeladene Kammer, dauert es bei den beschriebenen Prototypen ca. 1200 Sekunden, bis der Sperrstrom zusammen mit der Hintergrundstrahlung das Gate geladen hat. Plottet man die einzelnen Messwerte des ADC in einer while-Schleife, kann man das Sägezahnsignal deutlich erkennen. Man erkennt dabei, dass mit der Aktivität und mit der ionisierenden Wirkung einer Strahlungsart der Probe die Periodendauern im Sägezahn-Signal immer kürzer werden. Lässt man sich nur die gemessenen Periodendauern ausgeben, erkennt man z.B. beim Trinitit-Stückchen Folgendes: Während der Maximalwert für die Periodendauer 1300 Sekunden nach dem Entfernen des Trinitit-Stücks betrug, wurde mit aufgelegtem Trinitit-Stück ein Minimalwert von 220 Sekunden gemessen.

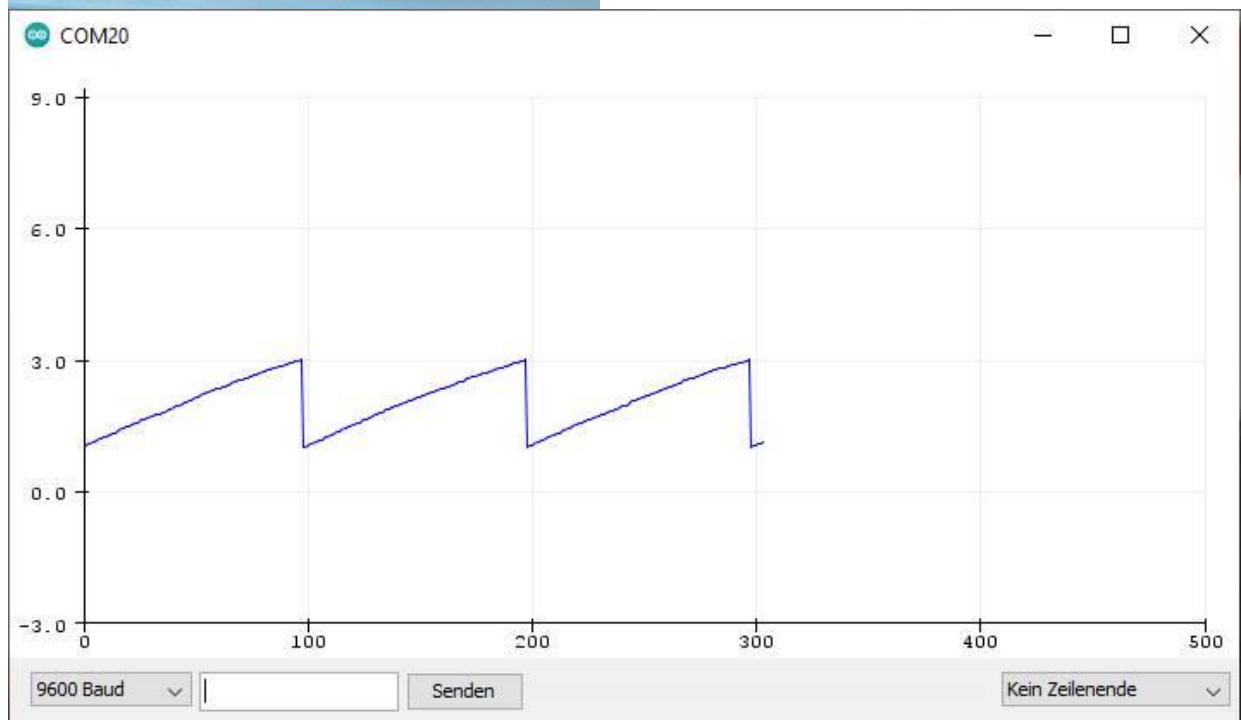
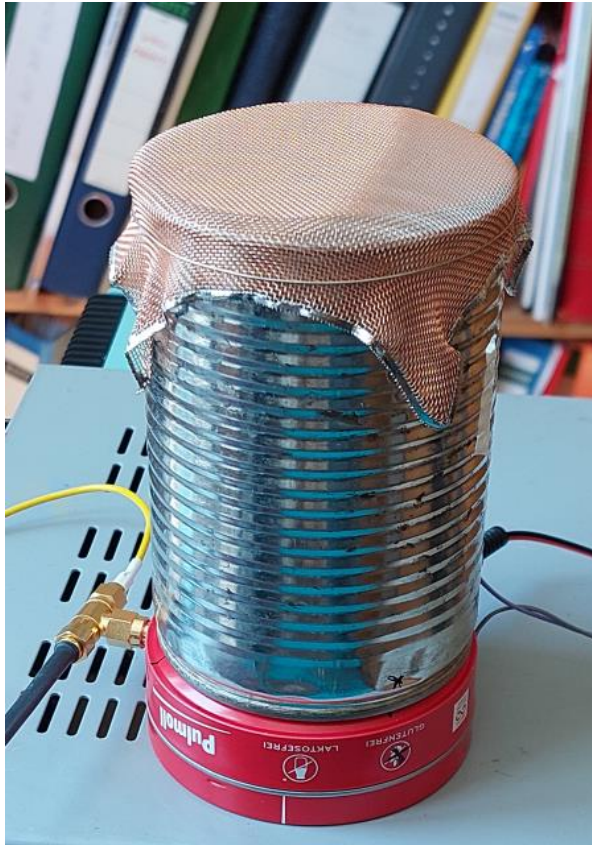


Abb. 13: Leermessung über dem Messpunkt-Index. da am Ende der while-Schleife 10s gewartet wird, beträgt die Periodendauer hier 1000s

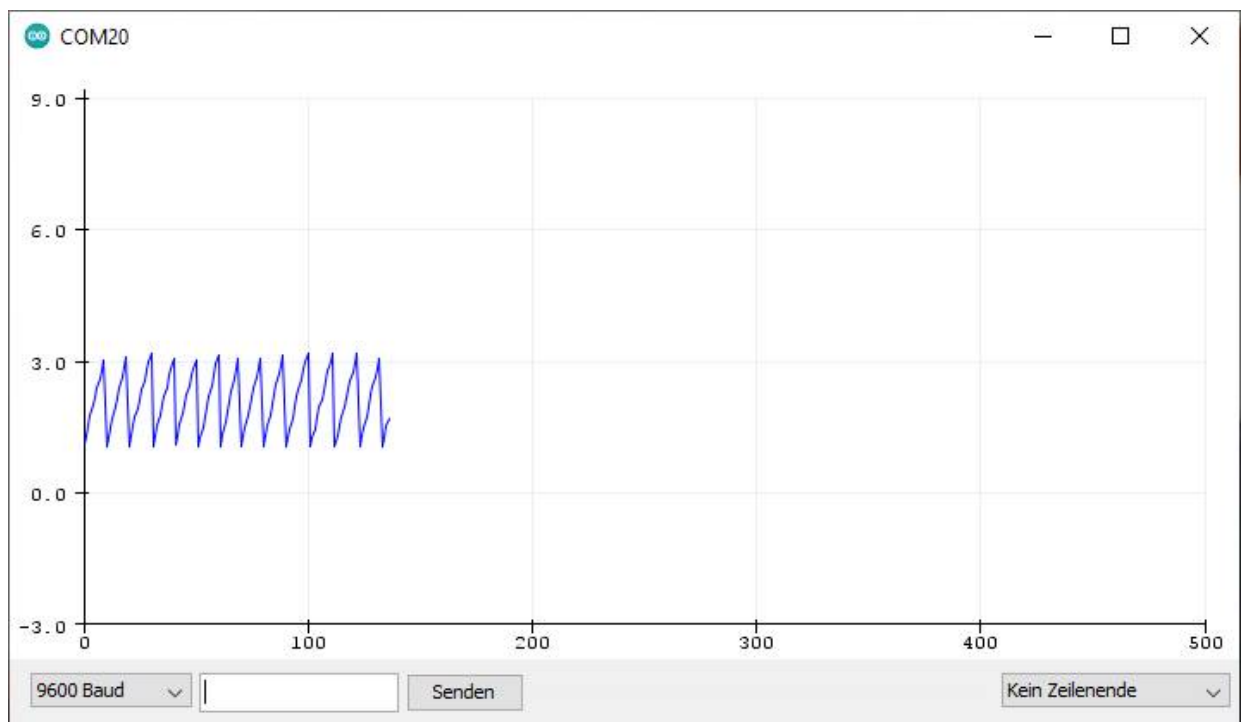


Abb. 14.: Messung eines Thorium-Glühstrumpfs, man kann deutlich die kürzere Periodendauer und damit höhere Sägezahn-Frequenz erkennen.

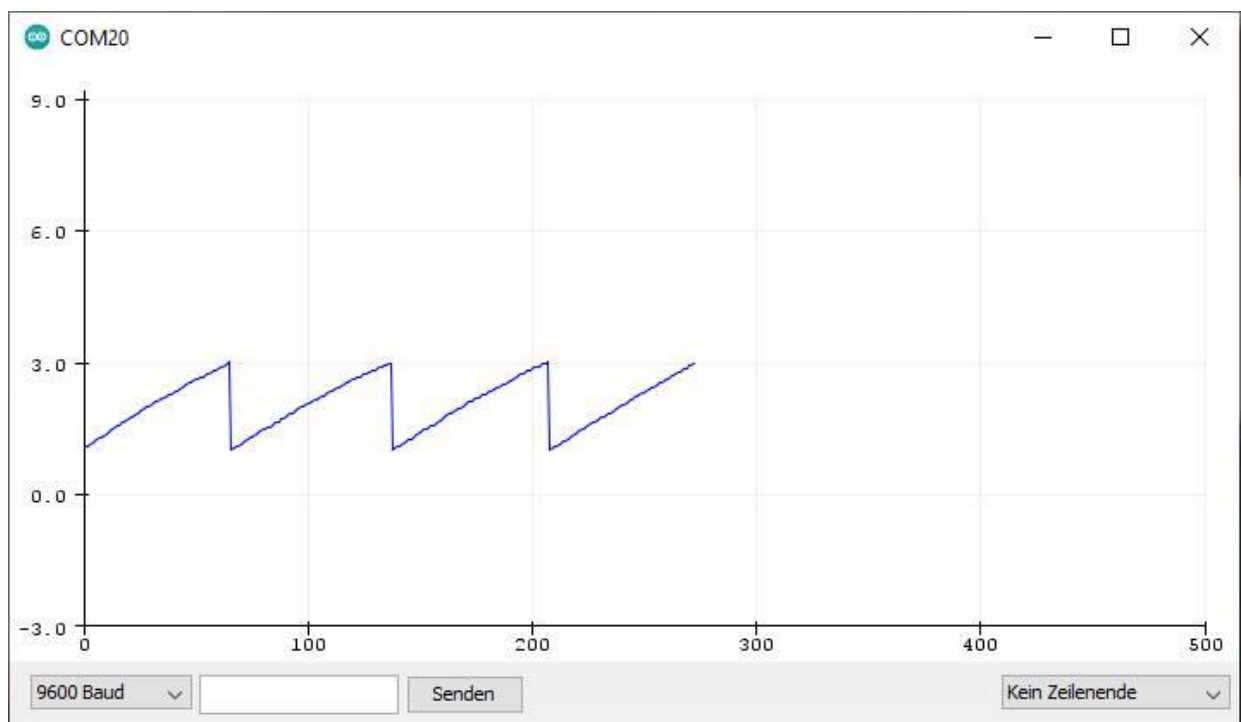


Abb. 14: Uranglas-Murmel (vorwiegend Betastrahlung) mit langer Periodendauer bzw. niedriger Zyklusfrequenz

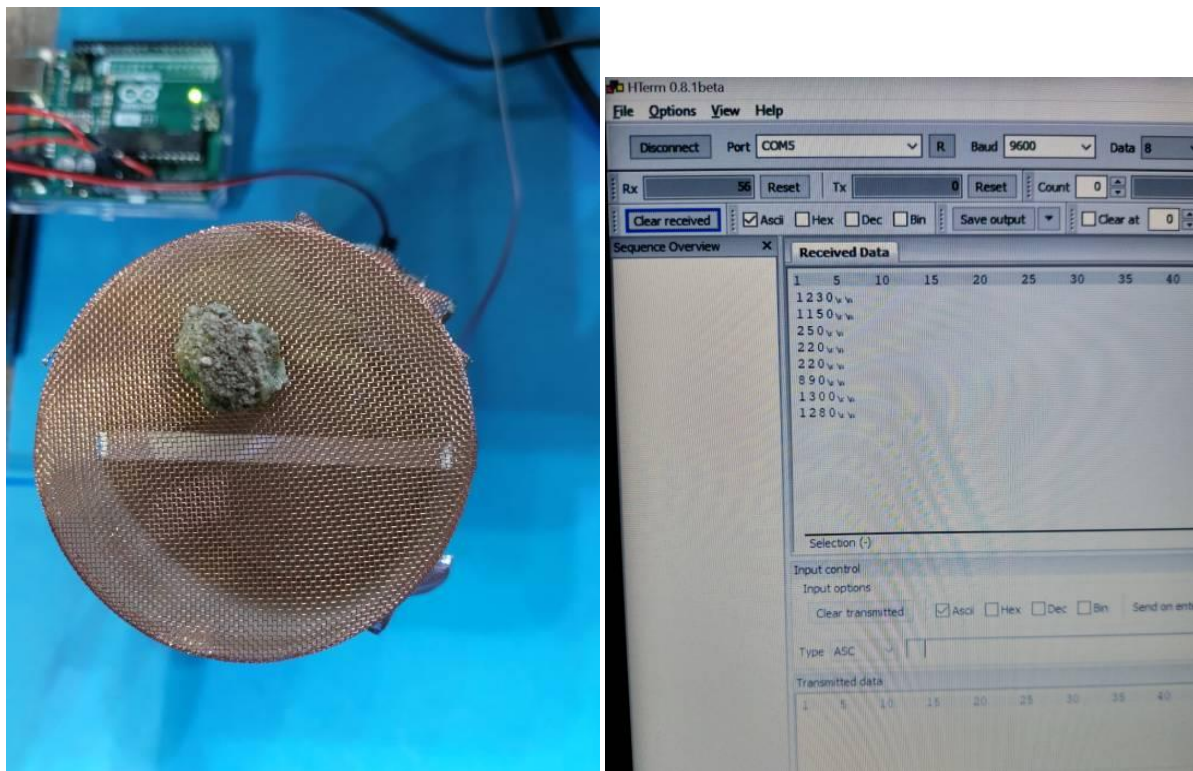


Abb. 15: Messung eines kleinen Stücks Trinitit, Ausgabe über den Serial-Monitor, zuerst ohne Trinitit (große Periodendauern), dann mit (kleine Periodendauern) dann wieder ohne Trinitit (große Periodendauern)

Um nun, wie für ein Strahlungsmessgerät üblich, einen Messwert, der zur Aktivität der Strahlung proportional ist zu erhalten, sollte man die Periodendauer des Sägezahn-Signals durch Bildung des Kehrwerts in die Frequenz umrechnen. Dabei ist es günstiger, die Zahl der gemessenen Perioden pro Stunde (Kehrwert der Periodendauer in Stunden) zu berechnen, weil so angenehmere Zahlenwerte entstehen. Dazu dividiert man die Zahl 1 durch die Periodendauer in Sekunden und multipliziert dann mit 3600. So erhält man z.B. bei der Trinitit-Messung einen Nulleffekt von 2.8 Perioden pro Stunde und mit Trinitit-Stück einen Wert von 16.4 Perioden pro Stunde. Netto kann man daher der vom Trinitit in der Kammer registrierten (Alpha-) Strahlung einen Wert von 13.6 Perioden pro Stunde zuordnen.

Für eine Radon-Messung in einem Wohnraum reicht es jetzt, die Konservendose in ein Regal zu stellen, vielleicht mit etwas Abstand zur Wand, für den Fall, dass sie Radionuklide enthält. Dann sollte man wenigstens einige Halbwertszeiten lang messen, da es bei Änderung der Wetterbedingungen immer etwas dauert, bis sich eine Aktivitäts-Konzentration aufbaut. Bevor man allerdings eine Messung in einem Raum mit unbekannter Radon-Aktivitätskonzentration startet, sollte man zunächst einmal unter sehr kontrollierten Bedingungen in einem „Anreicherungsgefäß“ (z.B. einen Eimer) mit einer bekannten Quelle (zum Beispiel einige Brocken Granitgestein oder etwas Superphosphat Dünger) beginnen. Hat man ein Radonmessgerät zur Verfügung, oder kann man sich eines ausleihen, sollte man es zum Vergleich mit in das Anreicherungsgefäß stellen, bevor man dieses möglichst dicht verschließt und dann parallel messen.

Sofern sich bei der Aufstellung des Eimers als „Anreicherungsgefäß“ kein Radon in der Raumluft befindet, sollte die Messung bei weniger als 50Bq/m³ als Messwert des Radon-Messgeräts beginnen. Danach sollte die Radon-Aktivitätskonzentration gemäß einer Exponential-Funktion der Gestalt

$$A(t) = A_0 \cdot (1 - \exp(-\ln(2)/T_{12} \cdot t)) + B$$

ansteigen (Pile-Up Modell) und schließlich sättigen. Dies folgt aus den Gleichungen zum radioaktiven Gleichgewicht zwischen dem Radium Ra226 und dem Radon Rn222. Hierin ist A₀ eine Konstante, wobei A₀/T₁₂ die Exhalationsrate beschreibt, die von der Quellstärke abhängt (die Steigung im Nullpunkt). T₁₂ ist die Halbwertszeit des Radon (3.82Tage) und B ist eine Konstante welche einen gewissen Offset beschreibt, der den Nulleffekt des Messgeräts darstellt. LN(2) ist der natürliche Logarithmus der Zahl 2.

Nun ist es sehr schwierig, die Halbwertszeit mit einem solchen Anreicherungs-Gefäß auch nur annähernd zu verifizieren. Ein Grund ist, dass es schwer ist, so einen Eimer Radon-dicht zu bekommen. Einmal wegen den Kabel-Durchführungen, und zum andern, weil der Deckel nicht ganz dicht schließt. Es geht so also immer Radon verloren. Das andere ist, dass das Radon wie auch seine Zerfallsprodukte (die unter Annahme eines stabilen Gleichgewichts immer mit gemessen werden) zu einem großen Teil als geladene Ionen in der Luft vorliegen. Sie heften sich daher gerne an Plastikflächen an und stehen somit für die Messung auch nicht mehr zur Verfügung. Wenn man also das oben genannte Pile-Up Modell in die Messkurve einpasst, so dass der Fehler möglichst klein wird, dann erhält man meist ein T₁₂, das doch deutlich kleiner ist als die Halbwertszeit des Radon.

Hier wurde als Radon-Quelle ein mineralischer Phosphatdünger verwendet (Superphosphat 18% des israelischen Herstellers ICL Fertilizers), der bekannt dafür ist, dass er relativ viel natürliches Uran enthält. Da er gleichzeitig so verarbeitet wird, dass er sehr porös ist, um eine hohe Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors zu garantieren, weist er eine sehr hohe Radon-Exhalationsrate auf. Mit einem derartigen Düngemittel lässt sich aus einer kleinen Menge (250g sind ausreichend) in einem 10 Liter Eimer leicht eine Radon-Aktivitätskonzentration von mehr als 1000Bq/m³ erzeugen. Einen vergleichbaren Effekt erreicht man aber auch mit zerkleinertem, deutlich uranhaltigem Granit, z.B. aus Flossenbürg.



Abb. 16: Eimer mit Rikamlno BreakOut und RadonEye-Messgerät, als Radon-Quelle wurden hier 750g Superphosphat 18% (ICL Fertilizers) verteilt auf zwei Konservenbüchsen verwendet.

Bei dieser Messung mit dem RikamIno Prototyp und einem RadonEye (FTLab bzw. ecosense) als kommerzielles Radon-Messgerät wurden mit 250g Düngemittel (in einer Konservenbüchse) bereits nach zwei Tagen mehr als 1200Bq/m³ in dem 10Liter Eimer erreicht (Abb. 17).

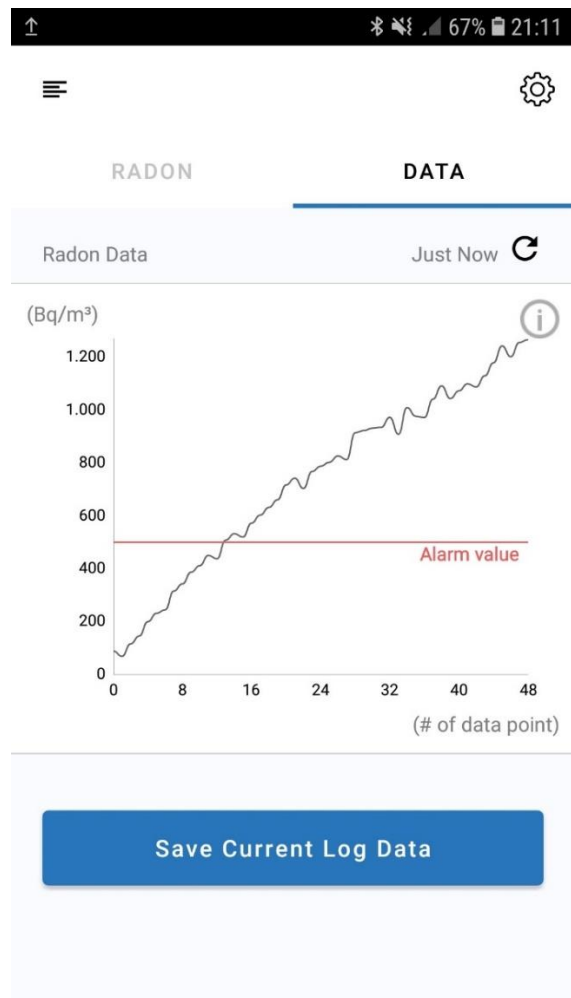


Abb. 17: Messung von 250g Superphosphat im 10 Liter Eimer mit dem RadonEye

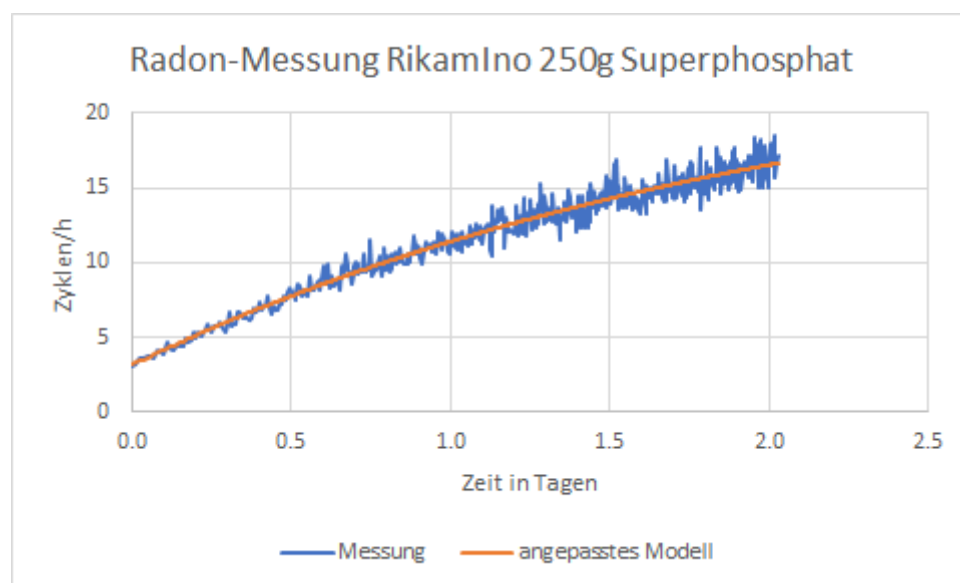


Abb. 18: Messung und angepasste Pile-Up Modellkurve für den RikamIno

Der RikamIno zeigt einen ganz vergleichbaren Verlauf der Messwerte und erreicht in der Messzeit etwa 16Zyklen pro Stunde gegenüber einem Wert von etwa 3.3 Zyklen pro Stunde zu Beginn. Die Kurvenanpassung für die Modellkurve ergibt so ein A0 von 21.9 Bq/m³, ein T12 von 1.47Tage und ein B von 3.15 Bq/m³. Damit können nun Werte des RikamIno für das Zeitraster des RadonEye auf der angepassten Modellkurve berechnet werden. Diese Werte können den Messwerten des RadonEye gegenübergestellt werden, weil sie zur selben Messzeit gehören. Auf diese Weise kann eine Korrelation berechnet werden. Sie ist erstaunlicherweise fast linear und erlaubt eine einfache Kalibration des RikamIno Prototypen. Die RikamIno Messwerte in Zyklen/h können daher mit einer linearen Funktion in die Radon-Aktivitätskonzentration des RadonEye überführt werden. Damit ist der RikamIno dann auf den RadonEye kalibriert. Die Kalibrierkoeffizienten, die sich für diesen Prototypen ergeben sind 88,6 Bq/m³ / (Zyklus/h) als Steigung und -249Bq/m³ als Offset.

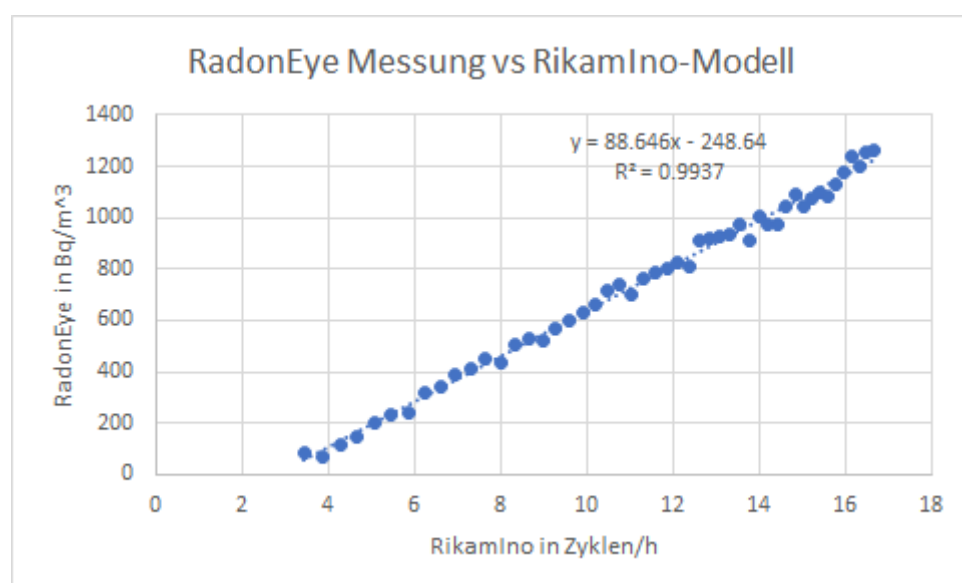


Abb. 19: Korrelations-Plot RadonEye versus RikamIno zur Ermittlung von Kalibrierkoeffizienten

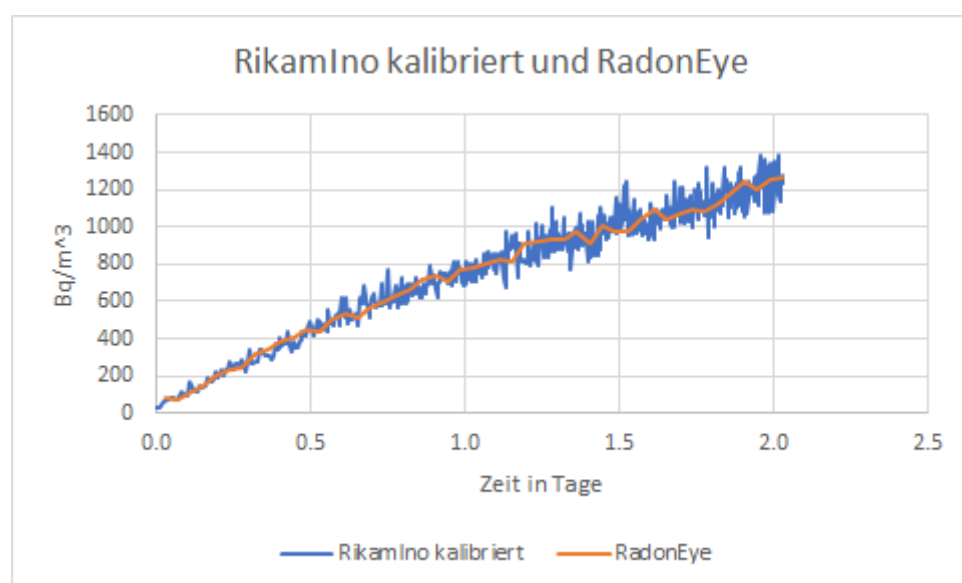


Abb. 20: Ergebnis der Kalibrierung, die Messwerte des auf den RadonEye kalibrierten RikamIno und des RadonEye

Mit Hilfe einer solchen Kalibrierung kann nun der jeweilige RikamIno-BreakOut unabhängig vom RadonEye zur quantitativen Messung der Radon-Aktivitätskonzentration verwendet werden. Was sich

bei den ersten Versuchen aber sehr deutlich gezeigt hat ist, dass verschiedene Prototypen sehr unterschiedliche Kalibrierkoeffizienten ergeben. Eine Bauart-bedingte Kalibrierung wäre daher sehr ungenau. Das hängt schon allein damit zusammen, dass der obere Schwellwert für den sägezahnförmigen Verlauf der JFET-Drainspannung, wie auch die Spannung auf welche die Drainspannung nach einer Entladung zurückgeht, sehr vom individuellen JFET abhängt und stark variiert. Zudem ist der jeweilige, individuelle Aufbau doch etwas unterschiedlich und beeinflusst das Ergebnis der Kalibration relativ deutlich, insbesondere die Leckströme, die sich unweigerlich einstellen. Daher muss jedes Exemplar auch individuell kalibriert werden, wenn eine quantitative Messung der Radon-Aktivitätskonzentration in Bq/m^3 angestrebt wird.

Was auch sehr deutlich bei den Experimenten mit den ersten Prototypen aufgefallen ist, ist die starke Temperaturabhängigkeit der RikamIno Messwerte. Das liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der deutlichen Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms eines pn-Übergangs. Daher gilt eine Kalibrierung immer nur für die Temperatur, bei der kalibriert wurde. Allerdings kann eine Temperatur-Kompensation dadurch erreicht werden, dass auch die Temperatur vom Arduino mit gemessen wird und dann ein temperaturabhängiger Korrekturwert vom Roh-Messwert abgezogen wird. Damit werden dann auch Messungen im Außen-Bereich möglich, wo die Temperatur viel deutlicher schwankt als in Innenräumen. Wegen der Ungenauigkeiten der Kompensation aber auch wegen der Abhängigkeit von anderen Außeneinflüssen, wird die erreichbare Genauigkeit im Außenbereich doch deutlich geringer. Messungen im Außenbereich sind aber insbesondere interessant, wenn der Arduino mit einem Daten Logger ausgestattet wird, und von einer kleinen Photovoltaik-Anlage oder einem Modellbau-Akku her mit Strom versorgt wird z.B. um Böden auf Radon-Exhalation zu untersuchen.

Insgesamt ist es sehr erstaunlich, wie mit derartig einfachen und kostengünstigen Mitteln eine so komplexe Messgröße wie die Radon-Aktivitätskonzentration doch recht brauchbar selbst mit Hobby-Mitteln gemessen werden kann. Auf Grund der kostengünstigen Implementierung könnte eine RikamIno-Installation in bestimmten Fällen sogar eine bessere Lösung darstellen als ein sehr teures Messgerät. Dann nämlich, wenn an Stellen die Diebstahl- und Vandalismus-gefährdet sind oder wenn an sehr vielen Messtellen gemessen werden soll.

Literatur:

/1/ Studnicka, Stepan und Sleg; Low-Cost Radon Detector with Low-Voltage Air-Ionization Chamber; Sensors 2019, 19, 3721; doi:10.3390/s19173721; www.mdpi.com/journal/sensors)

/2/ E. Ettenhuber, R. Lehmann; Übersicht über die Messung von Radon und Radonfolgeprodukten; Loseblattsammlung des Arbeitskreises Uranbergbau und radioaktive Altlasten (AKURA) 1994; Fachverband für Strahlenschutz e.V.

/3/ J. Regner, Wismut GmbH, H 6 Messung der Rn-222-Exhalationsrate mittels Anreicherungsbox
https://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/04_Arbeitsgruppen/07_Natuerliche_Radioaktivitaet/02_Dokumente/Stellungnahmen_Veroeffentlichungen/Radon/H_6_Messung_der_Radonexhalation_diskutierteEndfassung_140912.pdf