

theremino
•the•real•modular•in-out•

System Theremino

Eine Ionenkammer für Radon

deutsche Übersetzung von Heiner Gerling

Die fertige Ionenkammer



Für diejenigen, die nach Literatur zu diesem Thema suchen, lauten die Suchbegriffe: **"Diffusions-Ionenkammer für die kontinuierliche Messung von Radon, durch Zählung, gemäß der CR-Methode der EPA"**

Dieses Dokument behandelt die Eigenschaften von Ionenkammern im Allgemeinen und die Messung der Radonaktivität. Details zum mechanischen und elektronischen Aufbau, technische Eigenschaften und ausführliche Informationen zu Radon finden Sie in den beigefügten Dokumenten:

Eine Ionenkammer für Radon (dieses Dokument im PDF-Format):

Radon_IonChamber_ITA
Radon_IonChamber_ENG
Radon_IonChamber_ESP
Radon_IonChamber_FR
Radon_IonChamber_DEU

Mechanik:

Radon_IonChamberConstruction_ITA
Radon_IonChamberConstruction_ENG
Radon_IonChamberConstruction_FR
Radon_IonChamberConstruction_DEU

Elektronik:

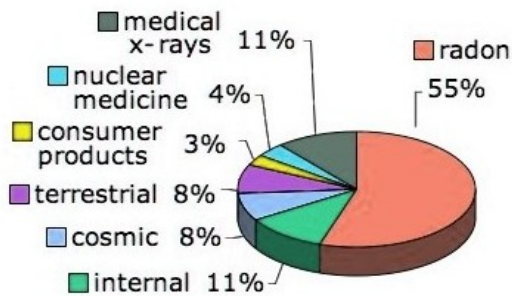
Radon_IonChamberElectronics_ITA
Radon_IonChamberElectronics_ENG
Radon_IonChamberElectronics_FR
Radon_IonChamberElectronics_DEU

Informationen zu Radon:

Radon_Info_ITA
Radon_Info_ENG
Radon_Info_DEU

Zunächst einmal: Warum Radon messen?

In den letzten Jahren hat man herausgefunden, dass Radon viel gefährlicher ist als bisher angenommen und als Ursache für Lungenkrebs die gleiche Bedeutung hat wie das Zigarettenrauchen.



In der Vergangenheit gab es viel Besorgnis über Röntgenstrahlen (X-Strahlen), aber diese und alle anderen Strahlungsquellen zusammengenommen erreichen nicht einmal die Hälfte der Strahlung, die wir im Durchschnitt erhalten, alles andere hängt mit Radon zusammen.

Die Gefährlichkeit von Radon beruht darauf, dass es sich um ein farb- und geruchloses, chemisch nicht reaktives Gas handelt, das in allen Häusern versteckt vorhanden ist und oft sehr konzentriert ist, sogar bis zum Hundertfachen des als gefährlich geltenden Grenzwertes.

In einem guten Prozentsatz der Wohnungen (eine von zehn) und in einigen Räumen (vor allem im Erdgeschoss) erreicht die Radonkonzentration 10000 Bq/m³ (400 pCi/l 270 pCi/l). Wer sein ganzes Leben lang in diesen Räumen lebt und raucht, hat (aufgrund der synergistischen Wirkung von Rauch und Radon) eine sehr hohe Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken.

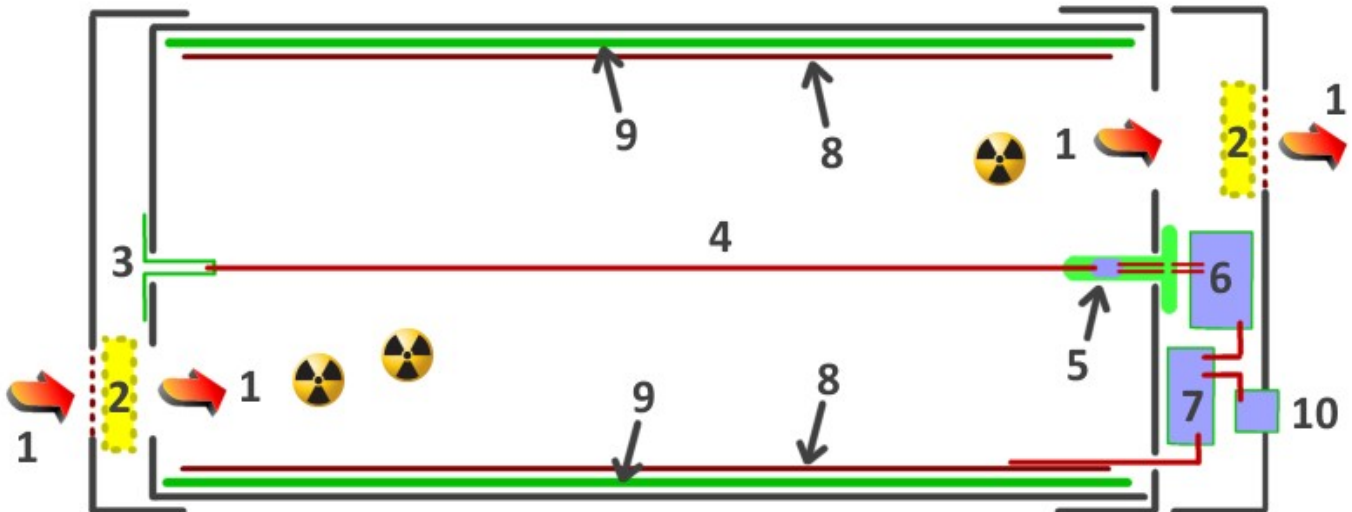
Wenn man diese Gefahr kennt, gibt es Lösungen, wie z.B. die Änderung der Raumaufteilung oder eine stärkere Belüftung der Räume, oder die Beseitigung des Radons, bevor es sich in andere Räume ausbreitet, mit einem Staubsauger im Keller. Selbst wenn Sie weiterhin rauchen, aber Radon eliminieren, wird das Risiko nicht nur halbiert, sondern um 90 % reduziert.

Es gibt seit vielen Jahren Dokumente, die vernachlässigt werden, die vor dieser Gefahr warnen, aber in letzter Zeit mehren sich die Statistiken über Radon und es gibt keine Zweifel mehr an seiner Gefährlichkeit.

- <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>
- https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/radon_node.html
- <http://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/radon.htm>
- <http://www.wantchinatimes.com/news-subclass-cnt.aspx?id=20111211000031&cid=1105>
- <http://www.independent.co.uk/life-style/health-and-families/features/radon-gas-the-silent-killer-in-the-countryside-2047987.html>
- <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/01/24/AR2007012400505.html>
- <https://www.gov.uk/government/collections/radon>

Diese Dokumente erklären die Gefahr von Radon viel besser, als wir es hier tun können. Unser Beitrag wird hauptsächlich darin bestehen, die Messungen mit einem "Do-it-yourself"-Messgerät zu erleichtern, das mit preiswerten, in jedem Baumarkt erhältlichen Materialien gebaut werden kann. Ein tragbares Gerät, das, wenn es einmal gebaut ist, nicht nur alle Räume im Haus messen kann, sondern auch an Freunde ausgeliehen werden kann und Hunderte von Tests kostenlos durchführen kann. Leider kosten die "offiziellen" Tests sehr viel (über 50 Euro pro Test) und werden nur an öffentlichen Orten wie Schulen durchgeführt. Aber selten, und nur auf Anfrage, in Privathaushalten.

Schema der Ionenkammer



Die Ionenkammer besteht aus einem Zylinder mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 20 cm, mit einem Gesamtvolumen von einem Liter, und drei Deckeln, die die elektronischen Komponenten vor elektrischem Rauschen und Staub schützen. Der Zylinder und die Deckel (**schwarze Linien**) bestehen aus **verzinntem Blech** und sind alle elektrisch und mechanisch durch verzinnte Kupferdrähte miteinander verbunden.

Außenluft und radioaktive Isotope gelangen durch Diffusion und Konvektion (**1 rote Pfeile**) durch zwei 25-mm-Löcher mit Messinggittern gegen elektrische Störungen und Staubfilter (**2 gelb**) in die Kammer.

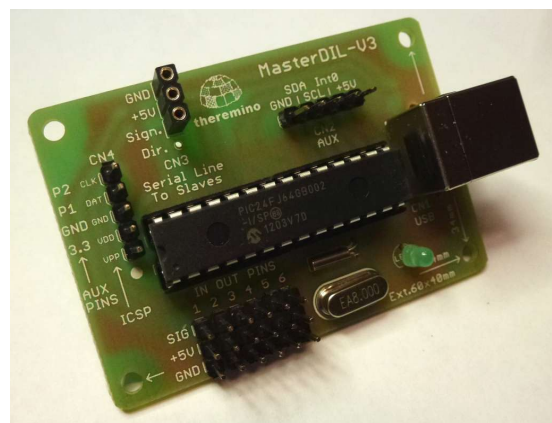
Das Innere des Zylinders ist mit einer Elektrode aus Aluminium- (oder Kupfer-) Klebeband (**8 rot**) ausgekleidet, die durch eine isolierende Kunststofffolie (**9 grün**) vom äußeren Zylinder isoliert ist und durch den Hochspannungsgenerator (**7 violett**) mit +400 Volt (positiv) geladen wird.

Eine zentrale Elektrode (**4, rot**) wird zwischen den beiden Enden der Kammer zwischen einem Nylonstab (**3, grün**) und einem rauscharmen FET (**5, violett**) gespannt gehalten. Der FET, der sich zur Minimierung des Rauschens in der Kammer selbst befindet, erzeugt ein robustes Signal, das nicht mehr durch elektrisches Rauschen beeinträchtigt wird.

Der Impulsbreitenverstärker und -diskriminator (**6 violett**) isoliert die von Radon und seinen Abkömmlingen erzeugten Impulse und gibt quadratische Impulse mit konstanter Breite aus, die robust und leicht zu zählen sind.

Der Ausgangsstecker (**10 violett**) kann direkt an einen Standard-PIN des Theremino-Systems angeschlossen werden. Normalerweise wird ein Mastermodul verwendet, das die Ionenkammer mit Strom versorgt und die Zählerstände über USB an die ThereminoGeiger-Software sendet.

Ein einziger Master könnte bis zu sechs Ionenkammern mit Hunderten von Metern langen Verbindungen versorgen und alle Daten gleichzeitig erfassen. Einige der sechs Kammern könnten auch durch Geiger-Sonden für Alpha-, Beta- und Gammastrahlen oder andere Umweltsensoren ersetzt werden.



Zählen von Zerfällen mit einer Ionenkammer

Es gibt zwei Arten von Ionenkammern, zählende und integrierende. Die in der Literatur üblicherweise betrachteten sind integrierend und messen den durchschnittlichen Strom, der durch viele Zerfallsprozesse entsteht. Integrierkammern sind extrem abhängig von Umgebungsfaktoren wie Feuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck. Deshalb liest man oft irreführende Berichte über die Instabilität und Ungenauigkeit von Ionenkammern. Diese Berichte sind nicht auf unsere Methode anwendbar, die nicht auf der Messung des durchschnittlichen Stroms (Integration), sondern auf der Zählung einzelner Ereignisse basiert.

Die korrekte Definition für die von uns verwendete Methode lautet "Zählende Ionisationskammer" und die Funktionsweise ist ähnlich wie bei einem Geigerrohr, d.h. digitales Zählen. Für eine genaue Definition unserer Technologie lesen Sie bitte Anhang 1 (am Ende dieses Dokuments), der alle von der EPA (Environmental Protection Agency) klassifizierten Methoden auflistet. Unsere Methode ist als "CR" klassifiziert

Da die Zerfälle in einer genauen Zeit und in einem bekannten Volumen gezählt werden, ist die Kalibrierung stabil und leicht wiederholbar.

Diese Technologie ist so einfach wie das Ei des Kolumbus, wurde aber bisher nur selten eingesetzt, weil sie laut Literatur "teure und empfindliche elektronische Schaltungen" erfordert. Das war in der Vergangenheit so, aber heutzutage gibt es FETs mit sehr geringem Stromrauschen und integrierte Operationsschaltungen mit hervorragenden Eigenschaften. Mit diesen Komponenten wird es einfach, einzelne Ereignisse zu isolieren und zu zählen.

Unterschied zwischen "Zählen" und "Durchschnittsstrom messen"

Da es sich bei den zu ermittelnden Daten um eine Anzahl von Auflösungen handelt, gibt es keinen besseren Weg, als diese einzeln zu zählen. Die Alternative, ihre Anzahl durch Messung des Durchschnittsstroms und anschließende Division durch den angenommenen Strom, der bei jedem Zerfall erzeugt wird, zu ermitteln, ist ungenau und wird außerdem durch Variablen wie Feuchtigkeit, Temperatur, Luftdruck und Rauch verfälscht.

Feuchte Luft kann eine höhere Stromstärke erzeugen als die, die wir messen sollten. Andere Umgebungsvariablen sind ebenfalls sehr einflussreich, und der geringste Rauch in der Luft reicht aus, um den gemessenen Strom stark zu reduzieren.

Schließlich ändert sich die Anzahl der ionisierten Atome (und damit der erzeugte Strom) je nachdem, ob der Zerfall in der Nähe einer Wand oder in der Mitte der Kammer stattfindet, und auch je nach der zufälligen Richtung des Betateilchens, das die Ionisierung verursacht. Wenn das Teilchen in der Nähe einer Wand entsteht und sich zum Zentrum hin bewegt, entwickelt es seine gesamte Energie und erzeugt die maximale Anzahl ionisierter Atome. Bewegt es sich dagegen in die entgegengesetzte Richtung, stößt es sofort an die Wand der Kammer und erzeugt nur wenige ionisierte Atome und damit einen sehr geringen elektrischen Strom. Verschiedene Zersetzungsereignisse können daher in unterschiedlicher Weise zum durchschnittlichen Strom beitragen, wobei die Unterschiede zwischen den einzelnen Ereignissen bis zu zehnmal größer sein können.

Wie es möglich ist, mit Integrationskammern präzise Messungen durchzuführen, ist ein Rätsel. Im Ernst, es ist sehr schwierig, alles zu kompensieren, und man sollte auch nach Rauch suchen (aber das macht niemand).

Patente für Ionenkammern

Glücklicherweise sind Ionenkammern, die Impulse zählen, seit langem "bekannte Kunst". Die ersten bekannten (aber nicht patentierten) Versionen stammen aus dem Jahr 1954, und es gibt auch die Patente 4,827,224 und 4,859,854 von Carl J. Kershner und Edward T. Burgess vom Mai und August 1989 (die heute - im Jahr 2013 - seit 4 Jahren abgelaufen sind) Um die Patente zu konsultieren, empfehlen wir das ausgezeichnete Google Patents. Sowohl in Italien als auch in den USA haben Patente eine Laufzeit von 20 Jahren, und wenn sie abgelaufen sind, ist das Verfahren öffentlich und nicht mehr patentierbar. Damit sind die Ionenkammern (sowohl Zählung als auch Integration) nun frei nutzbar.

Soll eine Kalibrierung durchgeführt werden?

Die Zählung ist nicht von der Luftfeuchtigkeit und dem Luftdruck abhängig, sondern nur von dem tatsächlichen Volumen der aktiven Zone, das wiederum nur von den geometrischen Abmessungen abhängt. Alle diese Faktoren ändern sich nicht von einer Probe zur anderen, so dass eine individuelle Kalibrierung nicht erforderlich ist.

Wenn Sie die von uns angegebenen exakten Maße einhalten, reicht es aus, einen Kalibrierungskoeffizienten einzustellen, um eine Genauigkeit zu erreichen, die sogar besser als +/- 20% ist. Um auf der sicheren Seite zu sein, geben wir eine Genauigkeit von +/- 50% an und beschränken uns auf Messungen in der Größenordnung, wie in der folgenden Tabelle dargestellt:

pCi/Liter	Bq/m ³	Impulse/Minute	Impulse/Sekunde	Ergebnis
0.01	0.4	0.02	-	Sie sind in einem versiegelten Tank
0.1	3.7	0.2	-	seien Sie beruhigt
1	37	2	0.03	häufig prüfen
10	370	22	0.3	Seien Sie besorgt
100	3700	220	3	unternehmen Sie etwas
1000	37000	2200	33	schwer vorstellbar

Es macht wenig aus, ob Sie 0,33 oder 1,22 statt 0,88 pCi/Liter messen. Für das Risiko einer biologischen Schädigung ändert es kaum etwas. Aber wir müssen sicher sein, dass wir es nicht mit 50 pCi/Liter oder, noch schlimmer, mit 500 zu tun haben. Unsere Kammer kann diese Sicherheit auch ohne Kalibrierung bieten. Und da die Messung und Berechnung einfach sind, ist es schwierig, grobe Fehler zu machen, die gefährlich sein könnten.

Abmessungen der Ionenkammer

Warum sollte man eine Ein-Liter-Ionenkammer bauen? Sie könnten auch eine 4 x 4 cm große Kammer mit einer Höhe von 1 cm herstellen, die einfacher zu bauen und weniger empfindlich gegenüber Vibrationen wäre. Alle kommerziellen Gerätehersteller mit Preisen unter 2000 \$ stellen Kammern von einigen zehn Kubikzentimetern her. Leider sinkt jedoch bei kleinen Kammern die Messgenauigkeit, und es wird notwendig, zu lange Zeiten zu verwenden.

Bei einem Zeitrahmen von einem oder zwei Tagen wird es schwierig, alle Räume eines Hauses zu messen, mit Dunstabzugshauben zu experimentieren oder zu sehen, was passiert, wenn die Fenster geöffnet werden. Die Durchführung einer angemessenen Anzahl von Tests würde einen Monat dauern, und Sie wären jeden Tag damit beschäftigt. Aber mit einem kurzen Zeitrahmen ist es möglich, viele Tests am selben Tag durchzuführen und sogar Änderungen am Abluftsystem vorzunehmen und deren Auswirkungen sofort zu sehen. Wir haben daher versucht, die Messzeit so weit wie möglich zu verkürzen, indem wir das Volumen so weit wie möglich erhöht haben.

Das Empfindlichkeitsverhältnis zwischen großen und kleinen Kammern ist größer als das Verhältnis zwischen den beiden Volumina, da in kleinen Räumen der Anteil des aktiven Volumens geringer ist. Die freie Weglänge von Alphastrahlen in der Luft beträgt etwa 4 Zoll, und wenn die Kammer diese Größe erreicht, befindet sich der größte Teil ihres Volumens in der Nähe der Wände, was verhindert, dass die Zerfallsprodukte ihre gesamte Energie in Ionen umwandeln.

Die Tabellen auf der nächsten Seite zeigen die Ergebnisse in Bezug auf die Leistung.

Effekte aufgrund der Ionenkammergröße

Um die Auswirkungen aufgrund der Größe der Kammer zu zeigen, vergleichen wir die Eigenschaften mit dem ausgezeichneten Gerät Rstone, das an der Universität & INFN von Pisa entwickelt wurde und eine der neuesten Techniken verwendet: "Festkörperdetektion in Diffusionskammer" und mit der sehr bekannten Safety Siren Pro3.

Eigenschaften aufgrund der Größe der Kammer

	Größe der Kammer	Sensibilität (cpm/pCi/l)	Sensibilität (Counts/Std. bei 100 Bq/m ³)	Hintergrundfehler	Anmerkungen
Safety Syren Pro3 (1)	20 cm ³	0.03	2.5	(Hinweis 1)	In 2 Stunden haben Sie eine zuverlässige Messung für gefährliche Werte > 400 Bq/m ³
Rstone (2)	50 cm ³	0.06	5	1.2 Bq/m ³ 0.03 pCi/l	In 1 Stunde haben Sie eine zuverlässige Messung für gefährliche Werte > 400 Bq/m ³
Theremino Ion Chamber (3)	1000 cm ³	2	160	0.4 Bq/m ³ 0.01 pCi/l	In 1 Stunde haben Sie eine zuverlässige Messung auch der Hintergrundstrahlung < 10 Bq/m ³

Zeit, die benötigt wird, um eine einigermaßen stabile Messung zu erhalten (Welligkeit weniger als 20 %)

	Safety Syren Pro3 (1)	Rstone (2)	Theremino Ion Chamber (3)	Anmerkungen
10 000 Bq/m³	12 - 24 Min.	6 - 12 Min.	3 - 6 Sekunden	In Haushalten nie gemessene Pegel
1000 Bq/m³	2 - 4 Stunden	1 - 2 Stunden	40 - 80 Sekunden	Diese Pegel sind sehr selten
500 Bq/m³	4 - 8 Stunden	2 - 4 Stunden	1 - 2 Minuten	Nur in seltenen Fällen
100 Bq/m³	20 - 40 Std.	10 - 20 Std.	6 - 12 Minuten	Dies sind die Pegel, die Sie normalerweise antreffen
10 Bq/m³	8 - 16 Tage	4 - 8 Tage	1 - 2 Stunden	

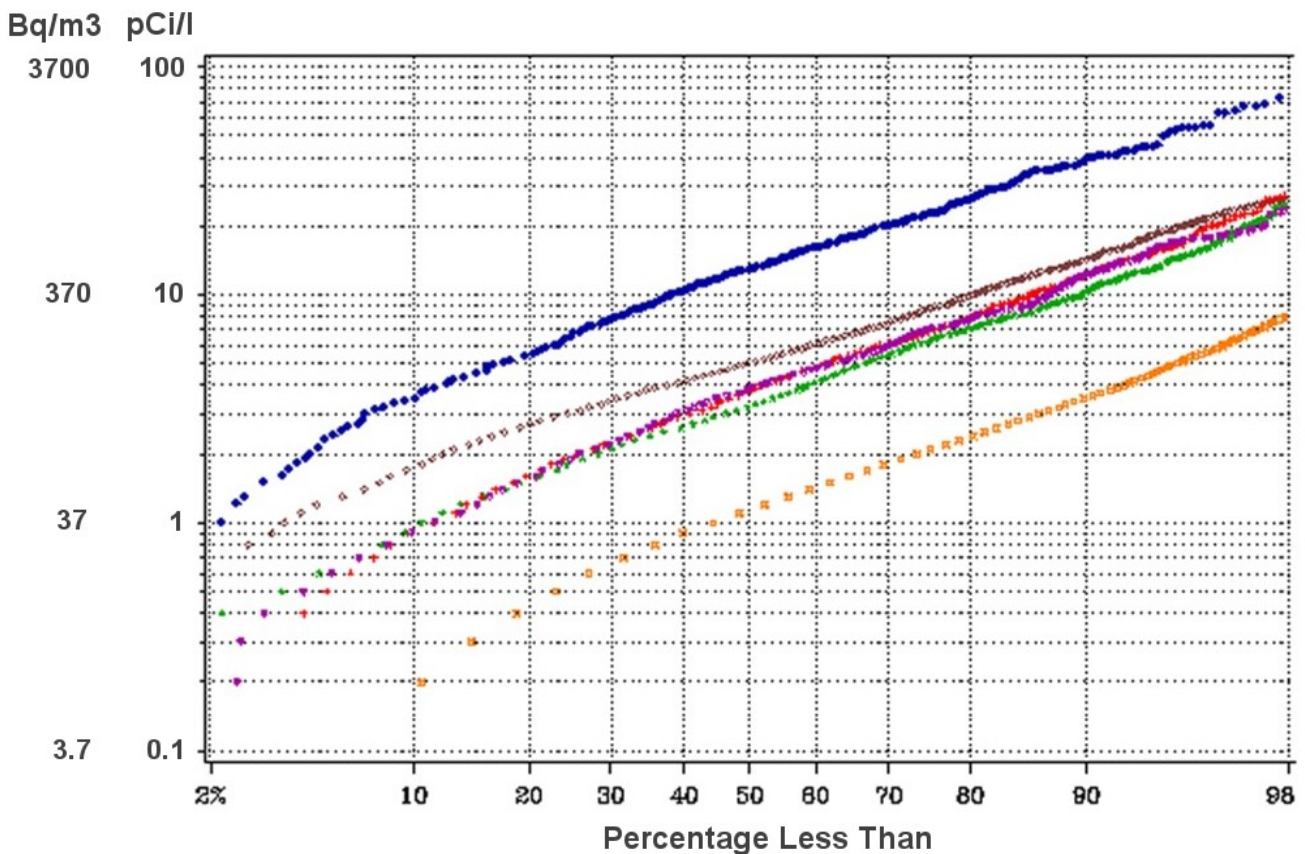
(1) Gemäß den im Benutzerhandbuch der Safety Siren Pro3 veröffentlichten Daten. Hintergrundzählungen sind weder im Handbuch noch in den im Internet verfügbaren Dokumenten angegeben.

(2) Gemäß den im Dokument "Natürliche Radioaktivität: Aktuelle Messtechniken und Entwicklungsperspektiven (Teil III) - G. Batignani, Universität & INFN Pisa" veröffentlichten Daten zu RStone und gemäß den im "Flyer RStone" veröffentlichten Eigenschaften.

(3) Das Verhältnis zwischen den Empfindlichkeiten und damit zwischen den Zeiten ist viel größer als das 20-fache, das man aus dem Verhältnis der beiden Volumina erwarten könnte, weil in einer kleinen Kammer die aktive Fläche aufgrund der vielen Ionisationen, die in der Nähe der Wände auftreten, proportional kleiner ist.

Welches sind die zu messenden Mindest- und Höchstwerte?

Dieses Bild zeigt Daten, die im Rahmen einer umfangreichen Probenahmekampagne in den USA in einer großen Anzahl von Wohnhäusern, Lagerhäusern und Schulen gesammelt wurden (Schulen sind gelb, Kindergärten grün, Lagerhäuser blau und Wohnhäuser braun, rot und violett). Viele Studien in der ganzen Welt haben die gleichen Ergebnisse geliefert, aber dieses Diagramm zeigt besser als die meisten anderen die Mindest- und Höchstwerte, die bei Messungen auftreten können.



In einer Stichprobe von Tausenden von Fällen lag keiner der Messwerte unter den klassischen 0,2 pCi/Liter (8 Bq/m³), die im Freien gemessen werden, oder überstieg 70 pCi/Liter (2600 Bq/m³).

Wir können also mit Sicherheit sagen, dass der Bereich der zu messenden Werte zwischen 0,1 pCi/Liter (4 Bq/m³) und 100 pCi/Liter (3700 Bq/m³) liegt.

Unsere Ionenkammer misst von 0,01 pCi/l (0,4 Bq/m³) bis 2800 pCi/l (100.000 Bq/m³), d.h. von einem Zehntel des erforderlichen Minimums bis zum etwa Dreißigfachen des Maximums.

Funktions- und Zuverlässigkeitsüberprüfungen

Ein einfacher Funktionstest wird durchgeführt, indem die Ionenkammer im Freien oder in einem gut belüfteten Raum aufgestellt wird. Unter diesen Bedingungen sollten etwa 10 Bq/m^3 ($0,3 \text{ pCi/l}$) gemessen werden. Dabei handelt es sich nicht um eine Kalibrierung. Es spielt keine Rolle, ob die tatsächlich gemessene Konzentration $10,2$ oder $15,9$ oder 7 Bq/m^3 beträgt, es reicht aus, eine sichtbar gute Kurve ohne störungsbedingte Sprünge zu erhalten, um zu überprüfen, dass die Elektronik regelmäßig zählt und dass der Hintergrund niedrig genug ist, um die Messungen nicht zu beeinflussen. In den EPA-Leitlinien ist festgelegt, dass der Hintergrundwert weniger als 40 Bq/m^3 (1 pCi/Liter) betragen muss, was leicht zu erreichen ist. Unsere Ionenkammer im Freien misst normalerweise etwa 10 Bq/m^3 (etwa $0,3 \text{ pCi/Liter}$).

Hintergrundimpulse

Die EPA-Richtlinien besagen, dass die Hintergrundimpulse weniger als 40 Bq/m^3 (etwa 1 pCi/Liter) betragen sollten. Diese Überprüfung ist auch wichtig, um sicherzustellen, dass es nicht zu falschen Zählungen durch elektrische oder mechanische Störungen kommt.

Um die durch Radon verursachten Impulse zu eliminieren, sollte die Kammer abgedichtet sein und das Radon darin auf ein ausreichend niedriges Niveau abklingen. Leider ist es jedoch sehr schwierig, die Kammer abzudichten, da Radon fast alle Materialien durchdringt; sie sollte in einem großen Aluminiumzylinder mit einem Aluminiumschraubverschluss abgedichtet werden, und der Drahtauslassanschluss sollte sorgfältig gepflegt werden. Selbst die kleinste Fuge in Harz oder Kunststoff könnte während der 15 Tage oder mehr, die es dauert, bis sie ausreichend zerfallen ist, Radon eindringen lassen.

Zum Glück gibt es noch eine andere Methode, die darin besteht, eine Luftreserve im Zylinder eines normalen Kompressors aufzubewahren, ohne den Kompressor etwa einen Monat lang einzuschalten. Da Radon in 3,8 Tagen zerfällt und seine Abkömmlinge eine viel kürzere Zeit haben, sinkt die Radioaktivität innerhalb eines Monats auf ein Zweihundertfünfzigstel der ursprünglichen Radioaktivität, ein Wert, der praktisch nicht messbar ist. Die EPA nennt dies in ihren Anmerkungen "gealterte Luft". Mit dieser Luft ist es einfach, die Kammer zu reinigen und sie während der gesamten Messung mit einem Luftzug sauber zu halten.

Vorläufige Tests zeigen, dass mit einer gut gebauten Kammer Zählungen von weniger als einem Impuls pro Stunde erreicht werden können, was weniger als $0,4 \text{ Bq/m}^3$ (weniger als ein Hundertstel eines pCi/Liter) bedeutet.

Luft- und Radonzirkulation

Der Betrieb der Ionisationskammer basiert auf der Annahme, dass die Luft in der Kammer eine repräsentative Probe der Luft in der zu überwachenden Umgebung ist. Radon diffundiert sehr leicht durch Luft, Wasser und auch durch viele feste Materialien, so dass es durch Diffusion leicht in die Kammer eindringt und die internen und externen Konzentrationen schnell ins Gleichgewicht bringt.

Natürlich folgen die Konzentrationsänderungen im Inneren den Konzentrationsänderungen in der äußeren Umgebung nur mit einer gewissen Verzögerung. Unsere Tests haben gezeigt, dass **die Verzögerungszeit vernachlässigbar ist** und bei einigen zehn Minuten liegt, **selbst wenn die Kammer kleine Öffnungen hat, die durch Staubfilter abgedeckt sind.**

Ein ausreichend schneller Luftwechsel allein durch Diffusion ermöglicht es, ohne Luftpumpe zu arbeiten. Die Pumpe würde zu mehreren Problemen führen, von denen das wichtigste die schnelle Ansammlung von Staub in den Filtern wäre. Dies wäre nicht nur kostspielig in der Wartung, sondern würde auch automatische Messungen über einen längeren Zeitraum unmöglich machen.

Ionen oder Elektronen?

Zählkammern werden wiederum in zwei Untertypen unterteilt, je nachdem, ob die von Elektronen oder Ionen erzeugten elektrischen Impulse verstärkt werden.

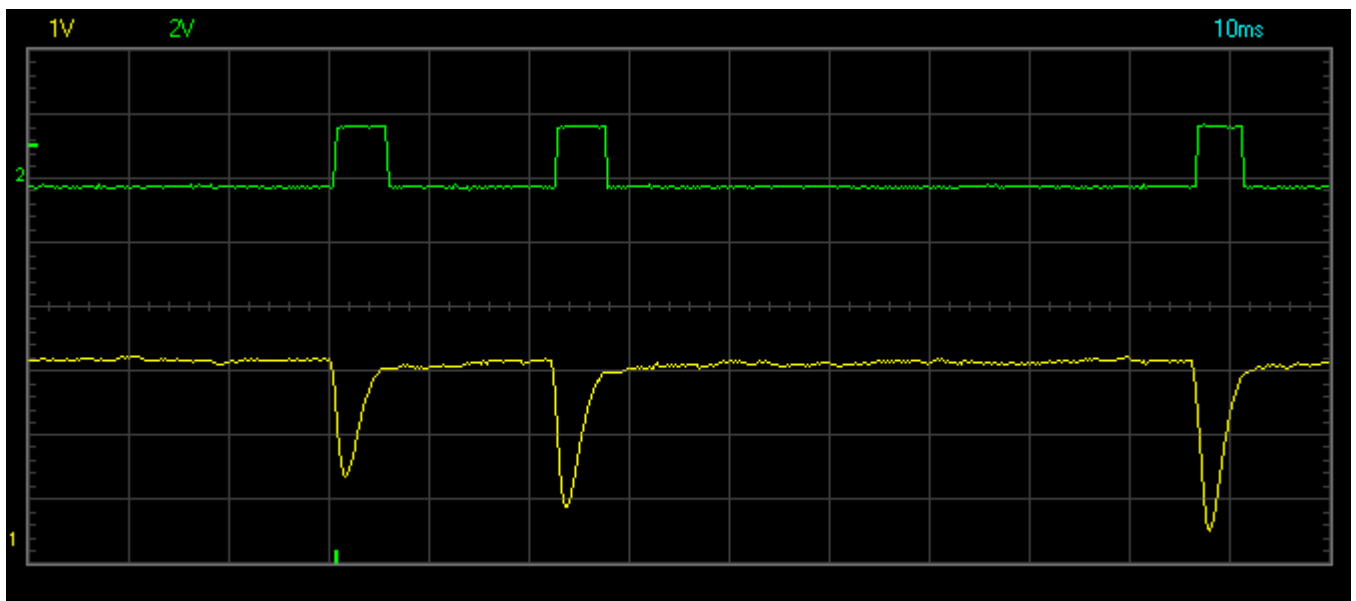
Zunächst dachten wir, dass die Wahl zwischen Ionen und Elektronen von der Polarität abhängt, und folgten dieser Überlegung: Wenn die Außenseite negativ ist, dann ist die Mittelelektrode positiv und fängt Elektronen ein. Wäre sie dagegen negativ, würde sie Ionen einfangen. Da wir aber den elektrischen Strom als "Potentialdifferenz" messen, könnte man auf den ersten Blick meinen, dass es keinen Unterschied zwischen der Verstärkung des Ionenstroms und des elektronischen Stroms gibt.

Aber es sollte einen Unterschied geben: Elektronen sind winzig und bewegen sich schneller als große, schwere Ionen, so dass die von Elektronen erzeugten elektrischen Impulse kurz sind (einige Mikrosekunden), während die von Ionen tausendmal länger sind (einige Millisekunden).

Wir rüsteten uns also mit positiven und negativen Hochspannungsgeneratoren aus, um die Polarität schnell zu ändern und die Vor- und Nachteile der Verstärkung von ionischem oder elektronischem Strom zu testen.

Und hier haben wir eine interessante Entdeckung gemacht: Es ist sehr schwierig, den von den Elektronen erzeugten Strom zu verstärken; man muss eine Bandbreite von vielen MHz verstärken (was an sich schon schwierig ist), aber, was noch schlimmer ist, das Rauschen der elektronischen Komponenten nimmt mit zunehmender Bandbreite zu, was es fast unmöglich macht, die von den Elektronen erzeugten Impulse vom Hintergrundrauschen der Eingangsschaltung (in unserem Fall ein sehr rauscharmer FET) zu unterscheiden.

Anschließend begrenzten wir die Bandbreite auf einige hundert Hz und optimierten die Verstärkerschaltung, um ein maximales Signal-Rausch-Verhältnis für die von den Ionen erzeugten Pulse zu erhalten. Damit haben wir ein Signal-Rausch-Verhältnis von etwa 40 dB (100-fach) erreicht, was es uns ermöglicht, die von den Zerfallsprozessen erzeugten Impulse absolut zuverlässig vom Rauschen zu trennen. Bei Elektronen müsste die Bandbreite 10 MHz betragen, und das Verhältnis würde auf einige dB sinken, und es wäre sehr schwierig, die Impulse vom Rauschen zu trennen.



Beachten Sie die Sauberkeit der gelben Impulse (einige Volt) im Verhältnis zum Hintergrundrauschen (einige zehn Millivolt). Die grünen Impulse sind der auf 5 Millisekunden normierte quadrierte Ausgang mit Schmitt-Triggern, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Verringert das Zählen von Ionen die maximale Zählfrequenz?

Das ist wahr. Theoretisch könnten Elektronen bis zu einigen MHz verwendet werden, d. h. bis zu etwa **22 Millionen Pikocurie** pro Liter, aber wenn wir Ionen zählen, können wir **nur bis zu 100 Hz** gehen, was etwa **2800 Pikocurie** pro Liter entspricht (was etwa **103600 Becquerel pro Kubikmeter** entspricht).

Da wir aber nur bis zu 100 pCi/l zählen müssen haben wir einen Spielraum von Faktor achtundzwanzig.

Bei Annäherung an die maximale Zählfrequenz nimmt die Anzahl der verlorenen Impulse allmählich zu, aber dieser Effekt kann durch die Einstellung des "BKG"-Parameters der Zählsoftware (Theremino_Geiger) kompensiert werden, die eine statistische Berechnung vornimmt und die Linearität des oberen Teils der Skala nahezu perfekt wiederherstellt.

Polarität der Spannung

Hat man sich entschlossen, den Ionenstrom zu verstärken, so ist es theoretisch am besten, die Ionen an der Mittelelektrode zu sammeln. Also hohe positive Spannung an der Außenseite der Kammer und negative Mittelelektrode, um die positiven Ionen anzuziehen.

Aber weil wir genau sind, wollten wir nachsehen und haben eine weitere interessante Entdeckung gemacht:

Wenn man den Ionenstrom mit der für Impulse von Millisekunden optimierten Bandbreite verstärkt, gibt es keinen Unterschied zwischen den beiden Polaritäten (oder nur so klein, dass er irrelevant ist).

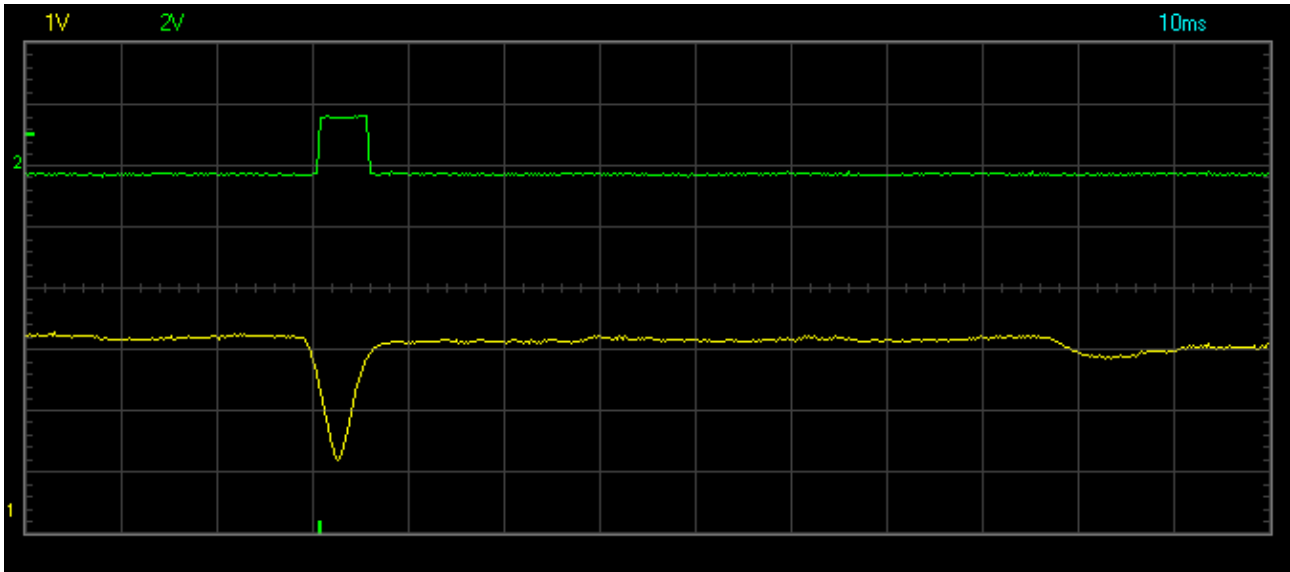
Wahrscheinlich gibt es keinen Unterschied, denn wir messen nicht den Strom, sondern die durch den Strom erzeugte "Potenzialdifferenz"; wenn jemand eine bessere Erklärung hat, lassen Sie es uns bitte wissen.

Fazit: Da theoretische Überlegungen dafür sprechen und es auch einfacher ist, Stromversorgungen mit hoher positiver Spannung herzustellen, haben wir uns entschieden, **den Außenmantel mit positiver Spannung zu versorgen.**

Ein weiterer Vorteil der Verwendung positiver Spannung ist, dass sich der FET nach dem Einschalten der Elektronik in viel kürzerer Zeit (einige Sekunden) stabilisiert. Das liegt daran, dass die Sperrschicht bei positiver Spannung die Gate-Spannung auf weniger als ein Volt begrenzt. Bei negativer Hochspannung hingegen fällt das Gate, da es keine Begrenzung gibt, auf minus 30 Volt und mehr ab, und es dauert fast eine Minute, bis der Leckstrom es wieder auf null Spannung bringt.

Energie-Diskriminierung

In unserer Implementierung enthält die Verstärkerschaltung einen zeitgesteuerten Schmitt-Trigger, der nicht nur eine durch Rauschen verursachte Doppelzählung verhindert, sondern auch eine Mindestspannungsschwelle festlegt, unter der die Impulse nicht gezählt werden.



Die obere Kurve ist das vom Impulsdiskriminator-Trigger erzeugte Rechtecksignal.

Die untere Kurve zeigt das Signal vor dem Trigger. Auf der linken Seite ist ein vom Radon erzeugter Impuls zu sehen und auf der rechten Seite ein (oder möglicherweise zwei nahe beieinander liegende) Impulse, die mit einer Amplitude von weniger als 500 mV nicht gezählt werden.

Der Schwellenwert liegt ungefähr bei 500 mV

Die Alphazerfälle von Radon und seinen Töchtern (5 bis 8 MeV) erzeugen Pulse mit einer Amplitude von 1 bis 3 Volt.

Beta- und Gamma-Zerfälle erzeugen sehr kleine Impulse mit einer Amplitude von weniger als 0,1 Volt

Betazerfall und Gammazerfall haben nicht nur eine maximale Energie von weniger als 1 MeV, sondern erzeugen auch 100 Mal weniger Ionen-Elektronen-Paare als Alphazerfall.

Selbst Ionen in der Luft werden nicht gezählt, da es sich immer entweder um einzelne Ionen oder um Ansammlungen einer geringen Anzahl von Ionen handelt und die erzeugte Spannung minimal ist. Ein Alphazerfall von Radon erzeugt etwa hunderttausend Ionen-Elektronen-Paare und erzeugt somit Signale, die mindestens tausendmal größer sind.

Selbst wenn man einen Ozongenerator direkt neben der Messkammer aufstellen würde, würden sich die Werte nicht erhöhen, da die Ionen und freien Elektronen nicht durch das engmaschige, geerdete Messgitter in die Kammer gelangen können.

Unterscheidung von Radon und seinen Töchtern

Um die Nachkommen von Radon selbst zu unterscheiden, sollten die beiden Staubfilter mit einer dünnen, transparenten Polyethylenschicht (Plastikbeutel) versehen werden. Das Polyethylen lässt das Radon durch, nicht aber seine Nachkommen. Da Radon jedoch langsam durch das Polyethylen diffundiert, ist die Stabilisierungszeit der Kammer bei diesen Filtern viel länger als die normale halbe Stunde.

Es mag nicht sehr intuitiv erscheinen, aber selbst wenn Sie Filter einbauen, die die Radontöchter abhalten, müssen Sie den Kalibrierungskoeffizienten nicht ändern. Dies liegt daran, dass das eindringende Radon bald einen Gleichgewichtszustand zwischen der Produktion von Nachkommen und deren Zerfall entwickelt.

Einige Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Konzentration von Radon und seinen Nachkommen unter bestimmten Bedingungen aufgrund der unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten, die durch ihr unterschiedliches Atomgewicht bedingt sind, abnormal sein kann. Dies geschieht nur, wenn die Luft vollkommen ruhig ist. In einem realen, bewohnten Haus überwiegt der konvektive Transport gegenüber dem diffusiven, und die Messfehler aufgrund des fehlenden Gleichgewichts zwischen Radon und seinen Töchtern sind minimal und liegen weit unter den von uns angestrebten +/- 30%.

Wir sind nicht an einer Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit interessiert. Eine Messung, die einen ganzen Tag in Anspruch nimmt, beschränkt sich auf einen einzigen Wert am Tag. Diese einzelne Messung könnte auch auf 10% genau sein, aber es reicht, eine Tür zu öffnen oder in einen anderen Raum zu gehen, um völlig andere Werte zu messen, bis zu +/- 300%. Unserer Meinung nach ist es daher besser, sich mit +/- 30 Prozent zu begnügen, aber viele Messungen unter verschiedenen Bedingungen, bei offenen und geschlossenen Fenstern, in verschiedenen Räumen usw. durchzuführen.

Die von Radon erzeugten Zerfälle haben eine sehr ähnliche Energie wie die seiner Töchter (5,5, 6 und 8 MeV), was bedeutet, dass die Töchter ungefähr den gleichen biologischen Schaden anrichten wie die Radon-Zerfälle. Daraus ergibt sich, dass es richtig ist, das Gemisch aus Luft, Radon und Abkömmlingen so zu messen, wie es in der Umwelt vorhanden ist, ohne die Anteile der Komponenten durch Filter zu verändern. Die Vorschriften verlangen jedoch, dass der Wert als Aktivität pro Volumeneinheit ausgedrückt wird, d. h. als unscharfe Sammlung der direkt oder indirekt auf Radon zurückzuführenden Zerfälle.

Das Gleichgewicht zwischen Radon und Töchtern

Das Verhältnis der Konzentration von Radon und seinen Töchtern wird normalerweise wie folgt ausgedrückt:

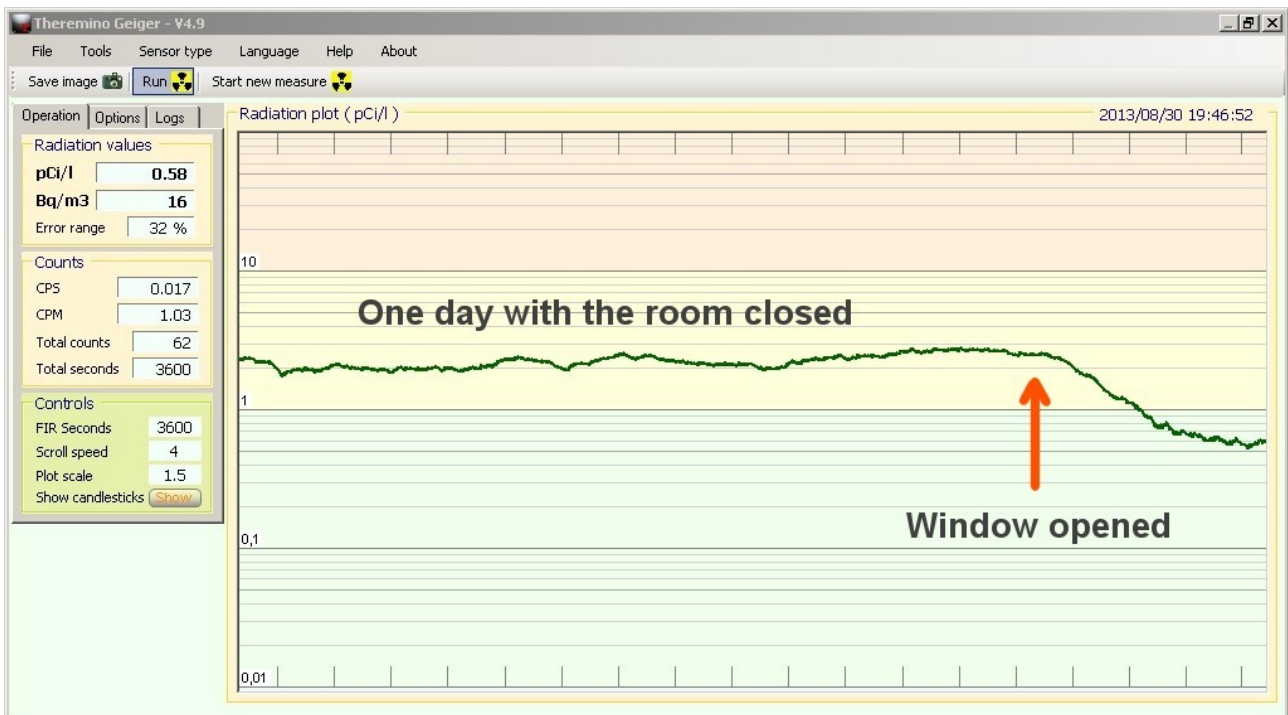
F = Radonkonzentration im Gleichgewicht / effektive Radonkonzentration in der Luft

F (in Innenräumen) beträgt normalerweise 0,4 bis 0,5

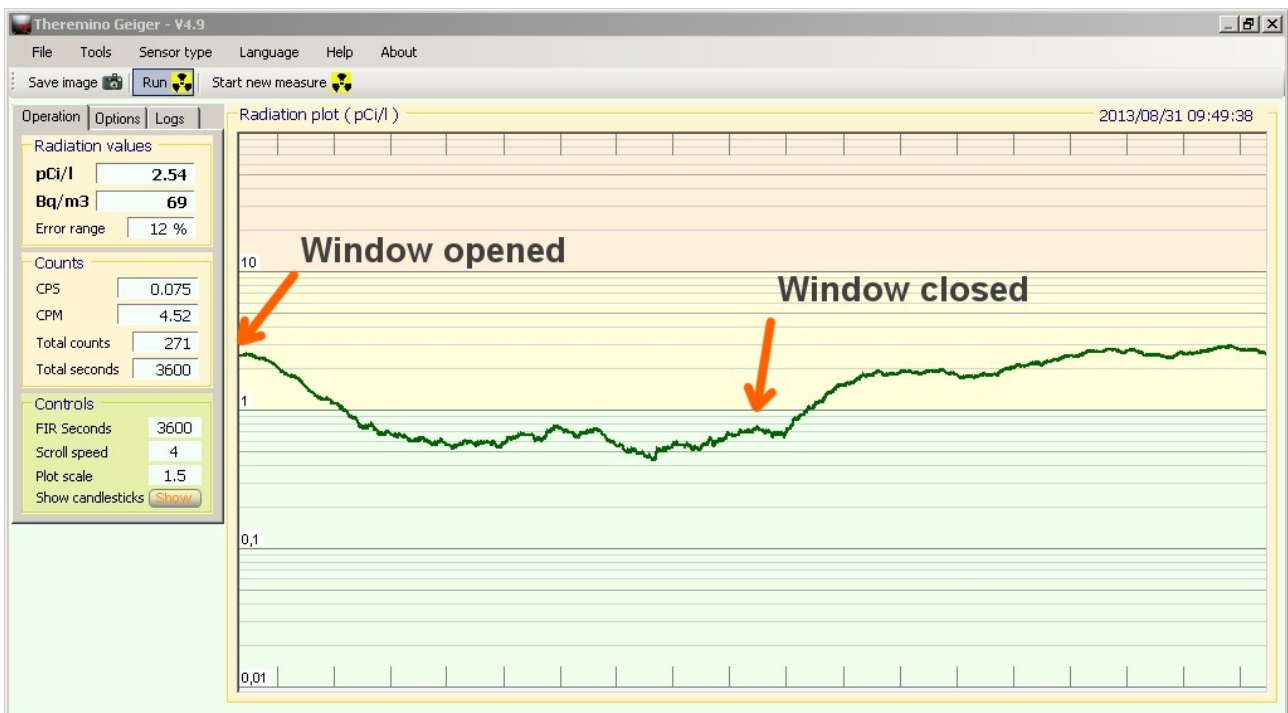
Nur in speziellen Umgebungen (z. B. im Bergbau) weicht dieser Wert erheblich vom Normalwert ab.

Eine Ionenkammer ohne Filter für die Töchter des Radons wird durch den F -Wert beeinflusst, aber in den Umgebungen, die uns interessieren, ist dieser Einfluss minimal.

Messdiagramme



Dieses Diagramm zeigt einen ganz normalen Raum, der einen Tag lang geschlossen war und sich bei fast 3 pCi/l (ca. 100 Bq/m³) stabilisiert hat. Auf der rechten Seite ist zu sehen, dass die Konzentration zu sinken begann, sobald das Fenster geöffnet wurde, und innerhalb weniger Stunden auf ca. 0,5 pCi/l (ca. 20 Bq/m³) sank, was etwas mehr als die normale Außenluftkonzentration ist.



Hier ist zu erkennen, dass die Konzentration durch das Schließen des Fensters wieder ansteigt, allerdings langsamer, da sich der gesamte Raum erst nach und nach mit Radon füllen muss.

Messdiagramm von gewerblichen Geräten

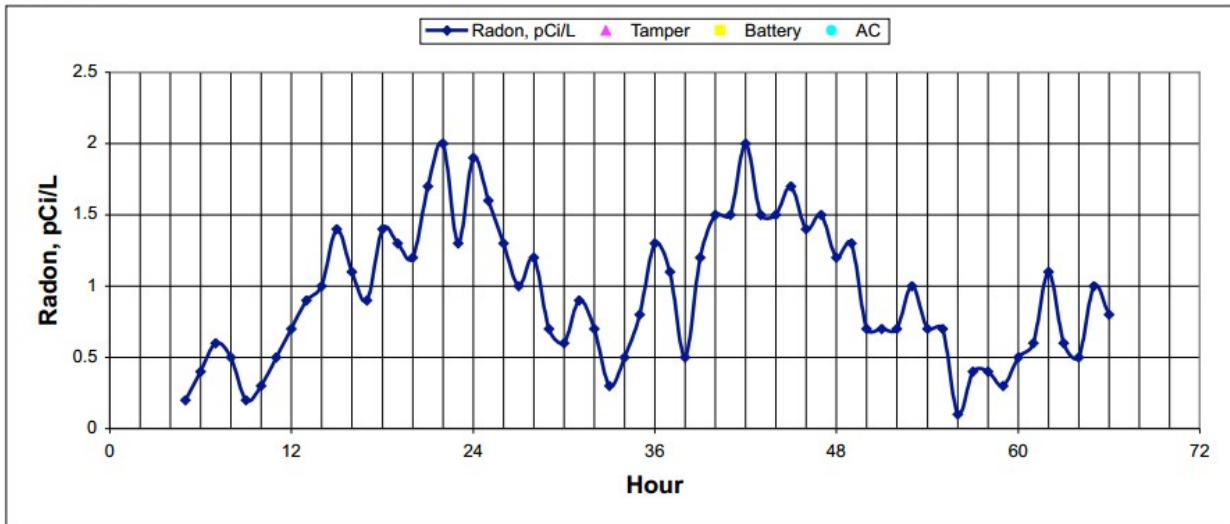
Diese Diagramme vermitteln eine Vorstellung davon, welche Werte zu erwarten sind und welche Schwankungen der Radonkonzentration im Laufe der Zeit normal sind.

RS300 Radon Test

Serial #01394
Calib. #31022
TestID #30008

Address
Location Living Room
Technician DeWitt Kimball

Average Radon Level, pCi/L: 0.9



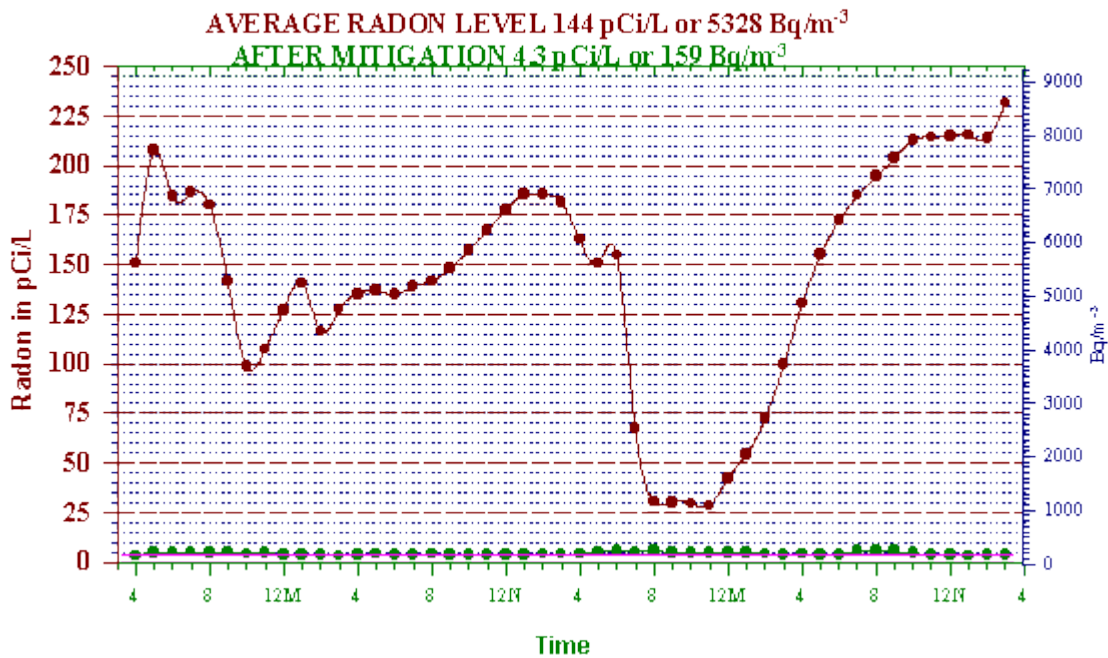
Wie Sie in diesem Diagramm sehen können, ist es ganz normal, dass es im Laufe des Tages auch sehr große Schwankungen gibt. Innerhalb weniger Stunden kann der Wert von einem Maximum von 2 pCi/l (74 Bq/m^3) auf ein Minimum von 0,1 pCi/l ($3,7 \text{ Bq/m}^3$) schwanken, wobei das Verhältnis zwischen dem Minimum und dem Maximum das 20fache beträgt. Das verwendete Gerät ist ziemlich teuer (ca. 200 \$) und schnell genug, da es sich um ein kommerzielles Gerät handelt. Kommerzielle Geräte übertragen in der Regel stündlich Daten, unsere Grafiken sind dagegen eine pro Sekunde.

Diese Schwankungen sind auf Temperaturschwankungen zurückzuführen, die wiederum zu Druckschwankungen zwischen den verschiedenen Teilen des Hauses führen. Auch Wind und Menschen, die sich bewegen, tragen dazu bei, dass sich Radon, das normalerweise am Boden stagniert, mit den oberen Luftschichten vermischt. Auch das Öffnen und Schließen von Türen und Fenstern ist nicht zu vernachlässigen. Ein Diagramm wie dieses lässt ohne weitere Angaben leicht vermuten, dass es Personenbewegungen und andere Störfaktoren gegeben hat.

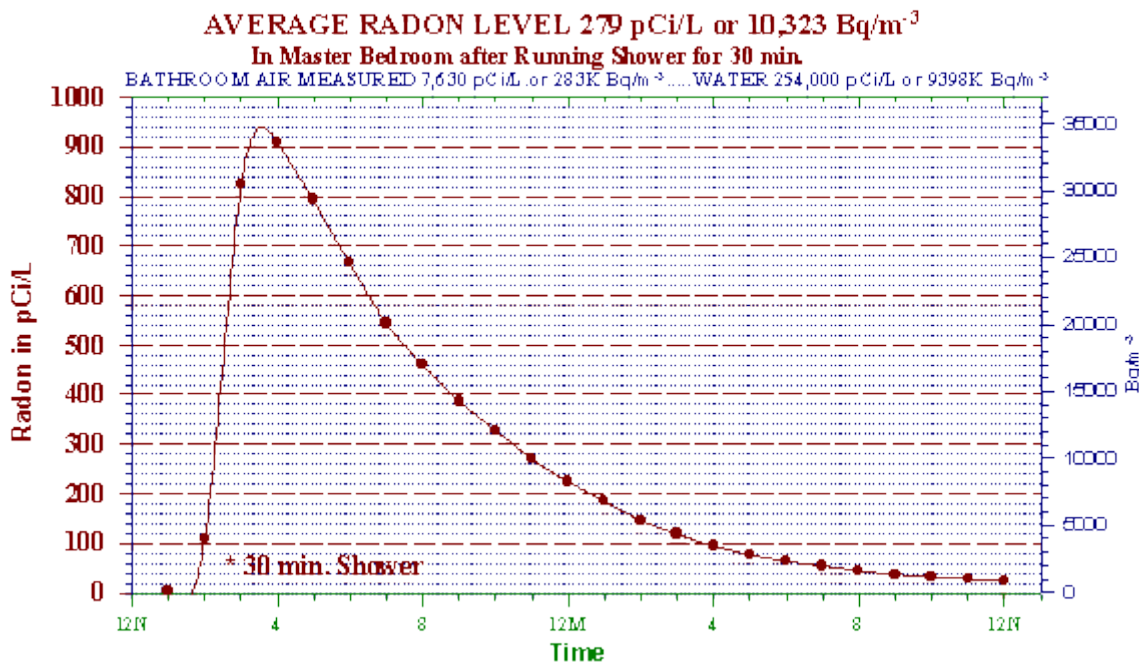
Zum Vergleich sehen Sie hier ein Diagramm eines Raums, der fast einen Tag lang geschlossen war.

Beachten Sie die Stabilität der Messung über die Zeit; die verbleibenden Wellen sind eher auf die Zufälligkeit der Zerfallsprozesse als auf Veränderungen der Radonkonzentration zurückzuführen.





Dieses Bild ist ein gutes Beispiel dafür, was im Falle einer echten Gefahr zu erwarten ist. Das Diagramm wurde von einem amerikanischen Unternehmen erstellt, das auf Anfrage Maßnahmen durchführt, und bezieht sich auf ein Haus, das eine "Entschärfung" benötigte. Vor dem Eingriff lag der Wert beim Zwanzigfachen der 400 Bq/m³, die die EPA für ältere Häuser als Höchstwert ansieht. Nach dem Eingriff ist der Radonwert auf etwa 200 Bq/ m³ (etwa 5 pCi/l) gesunken, ein Wert, der vollkommen sicher ist.



Hier haben wir eine wirklich kuriose Grafik, die zeigt, wie sich Radon oft auf unerwartete Weise verhält. In einem Badezimmer (klein und komplett geschlossen), hat das bloße Betätigen der Dusche für dreißig Minuten die Konzentration auf unglaubliche Werte ansteigen lassen. Das passiert nur, wenn man Wasser aus einem Brunnen benutzt, das sollte mit Wasser aus der Wasserversorgung nicht passieren.

Eigenschaften

Eigenschaften der Theremino Ionenkammer

Detektor	Impuls-Ionisationskammer
Probenahme	passive Diffusion
Messbereich	von 0.5 bis 74000 Bq/m ³ (0.01 bis 2000 pCi/l)
Empfindlichkeit	0.05 cpm/Bq/mc (2.0 cpm/pCi/l)
Genauigkeit	+/-50% (Kalibrierung nicht erforderlich)
Kammervolumen	1000 ccm
Speicher	unbegrenzt und in einstellbaren Intervallen
Kosten	etwa 30 Euro (Selbstbau)



Merkmale eines professionellen Geräts - Der Monitor CRM 510

Detektor	Impuls-Ionisationskammer
Probenahme	passive Diffusion
Messbereich	von 36 bis 7400 Bq/m ³ (1 bis 200 pCi/l)
Empfindlichkeit	0.008 cpm/Bq/mc (0.3 cpm/pCi/l)
Genauigkeit	+/-10% (erfordert häufige Kalibrierung)
Kammervolumen	circa 150 ccm
Speicher	100 einstündige Intervalle (4 Tage)
Kosten	etwa 4000 Dollar (mit Zubehör)



Merkmale eines bekannten Geräts - II Safety Syren Pro3

Detektor	Impuls-Ionisationskammer
Probenahme	passive Diffusion
Messbereich	von 5 bis 37000 Bq/m ³ (0.1 bis 999.9 pCi/l)
Empfindlichkeit	0.0008 cpm/Bq/mc (0.03 cpm/pCi/l)
Genauigkeit	+/-20% (werkseitig kalibriert)
Kammervolumen	circa 20 ccm
Speicher	5 Jahre
Kosten	etwa 130 Dollar



Die bekanntesten Messgeräte (in der Reihenfolge ihrer Empfindlichkeit)

Gerät	Prinzip der Detektion	Empfindlichkeit (cpm/pCi/l)	Kosten (etwa)
Safety Syren Pro3	Impuls Ionis.	0.03	\$ 130
Rsens-Rstone	Festkörper	0.06	\$ 1500
Passive-Sun Nuclear	Festkörper	0.17	\$ 925
Passive RS500	Festkörper	0.30	\$ 2145
Passive Femto CRM-510	Impuls Ionis.	0.30	\$ 3000
Passive-Radon Scout	Festkörper	0.31	\$ 1000
Passive-E-Smart	Current Ioniz.	1.2	\$ 2000
Active Radonics	Szintill. Cell	2.0	\$ 8000
Theremino IonChamber	Impuls Ionis.	2.0	\$ (*)
Passive Alpha Guard	Impuls Ionis.	2.8	\$ 6000
Active DurrIDGE	Festkörper	2.8	\$ 4500
Active Pylon AB-5	Szintill. Cell	5.7	\$ 3500
Active DOE	Szintill. Cell	8.4	\$ 3000
Active Eberline	Szintill. Cell	24.0	\$ 6000

Die Szintillationszellentypen bieten keine kontinuierliche Messung. Vor der Verwendung müssen Sie einen Filter mit Staub beladen, diesen messen, den Filter bei jeder Messung wechseln und eine Pumpe mit einem kalibrierten Luftstrom und konstanter Zeit verwenden.

(*) Der Preis ist nicht vergleichbar, da Theremino ein "Do-it-yourself"-Gerät ist, während es sich bei den anderen um fertige Geräte mit Gehäuse und Zubehör handelt.

Anhang 1 - Von der EPA gelistete Methoden

Die EPA (Environmental Protection Agency) listet 15 Methoden zur Radonmessung auf und kürzt sie mit zweistelligen Akronymen ab.

Die ersten dreizehn sind diskontinuierliche Methoden und bestehen aus zwei getrennten Erhebungs- und Messphasen. Diese Methoden sind teuer und unzuverlässig, erfordern erfahrenes Personal und schwer zu befolgende Verfahren. Sie sind aber sehr beliebt, denn früher waren die Messgeräte so groß und teuer, dass man versuchte, sie im Labor zu behalten und nur die Proben zu transportieren.



AC - Activated Charcoal Absorption - Absorption mit Aktivkohle

LS - Charcoal Liquid Scintillation - Flüssige Kohle und Szintillation

AT - Alpha Track Detection (filtered) - Alphaspurenerkennung (gefiltert)

UT - Unfiltered Track Detection - Alphaspurendetektion (ungefiltert)

EL - Electret Ion Chamber (Long-Term) - Ionenkammer mit Elektret (lange Zeit)

ES - Electret Ion Chamber (Short-Term) - Ionenkammer mit Elektret (Kurzzeit)

GC - Grab Radon/Activated Charcoal - Radonabscheidung und Aktivkohle

GB - Grab Radon/Pump-Collapsible Bag - Cattura del Radon e Sacco-pompa pieghevole

GS - Grab Radon/Scintillation Cell - Cattura del Radon e cellula e Scintillazione

SC - Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cell - Integrazione di tre giorni e cellula e Scintillazione

PB - Pump-Collapsible Bag (1-day) - Sacco-pompa pieghevole (1 giorno)

GW - Grab Working Level - Cattura e lavorazione temporizzate

RP - Radon Progeny Integrating Sampling Unit - Unità integrata per il campionamento dei discendenti del Radon

Die letzten beiden Methoden (CW und CR) ermöglichen eine kontinuierliche Messung von Radon.

CW - Continuous Working Level Monitoring (24-hrs) - Kontinuierliche "Working Level" Überwachung (24-Stunden)

Diese Methode basiert auf einer Pumpe, die Staub in einem Filter sammelt und als "kontinuierlich" eingestuft wird, obwohl sie höchstens 24 oder 48 Stunden in Betrieb ist. Vor jeder Messung (in der Regel 24 Stunden) muss der Filter gewechselt, das Ansprechverhalten mit einer Probenquelle kalibriert und die Durchflussmenge der Pumpe gemessen werden. Für diese Vorgänge müssen Sie über Folgendes verfügen: Ersatzfilter - Alpha-Partikel-Testquelle - Luftstrommessgerät. Geräte dieser Art kosten Tausende von Euro, und auch die Kosten für die Filter sind nicht zu vernachlässigen.



CR - Continuous Radon Monitoring - Kontinuierliche Radonüberwachung

Die CR-Methode umfasst unsere Ionenkammer und einige komplexere Varianten mit einer Luftpumpe und/oder Szintillationszelle. Auf den folgenden Seiten finden Sie eine kurze Erläuterung der einzelnen Methoden. Beachten Sie die Einfachheit der CR-Methode im Vergleich zu allen anderen Methoden.



Diskontinuierliche Methoden zur Radonmessung

AC - Activated Charcoal Absorption - Absorption mit Aktivkohle

Bei dieser Methode wird ein luftdichter Behälter mit Aktivkohle in dem zu beprobenden Gebiet geöffnet, und das Radon in der Luft wird von den Aktivkohlegranulaten absorbiert. Am Ende des Probenahmezeitraums wird der Behälter versiegelt und kann zur Analyse an ein Labor geschickt werden. Der Gammazerfall des von der Holzkohle adsorbierten Radons wird mit einem Szintillationsdetektor gezählt, und anhand von Kalibrierungsdaten wird die Radonkonzentration an der Probenahmestelle errechnet. Die Kohledetektoren werden 2 bis 7 Tage lang ausgesetzt. Da Kohle Radon absorbiert, aber auch freisetzen kann, liefert die Methode keine echte integrierte Messung über die Expositionszeit. Die Verwendung einer Diffusionssperre über der Aktivkohle reduziert die Auswirkungen von Zugluft und hoher Luftfeuchtigkeit.

LS - Charcoal Liquid Scintillation - Flüssige Kohle und Szintillation

Bei dieser Methode wird eine kleine Ampulle mit Aktivkohle verwendet, um Radonproben zu entnehmen. Nach einer Expositionszeit von 2 bis 7 Tagen (je nach Ausführung) wird das Fläschchen versiegelt und zur Analyse an ein Labor geschickt. Die Adsorption von Radon an die Aktivkohle ist dieselbe wie bei der AC-Methode, die Analyse erfolgt jedoch durch Behandlung der Kohle mit einer Szintillationsflüssigkeit und anschließender Analyse der Flüssigkeit mit einem Szintillationszähler. Die Radonkonzentration an der Probenstelle wird durch Zählen der Impulse pro Minute bestimmt, die Umrechnung erfolgt anhand von Tabellen.

AT - Alpha Track Detection (filtered) - Alphaspurenerkennung (gefiltert)

Der Detektor besteht aus einem kleinen Stück Kunststoff oder einer speziellen Folie in einem kleinen Behälter. Die zu messende Luft diffundiert durch einen Filter, der ein Loch im Behälter abdeckt. Wenn Alphateilchen von Radon und seinen Zerfallsprodukten auf den Detektor treffen, verursachen sie Schäden in Form von Spuren. Am Ende des Tests wird der Behälter versiegelt und zur Ablesung an ein Labor geschickt. Der Kunststoffdetektor (oder die Folie) wird behandelt, um die Spuren hervorzuheben, und dann werden die Spuren in einem vorher festgelegten Bereich mit Hilfe eines Mikroskops gezählt. Anhand der Anzahl der Spuren wird die Radonkonzentration an dem untersuchten Ort berechnet. Die Expositionszeit von Alphaspurendetektoren beträgt in der Regel 3 bis 12 Monate. Diese Detektoren sind echte Integrationsgeräte und können daher bei der Messung hoher Radonkonzentrationen für kürzere Zeit ausgesetzt werden.

UT - Unfiltered Track Detection - Alphaspurenerkennung (ungefiltert)

Dieser Detektor arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie der AT-Detektor, mit dem Unterschied, dass kein Filter zur Entfernung von Radon-Zerfallsprodukten vorhanden ist. Ohne Filter hängt die gemessene Radon-Zerfallsproduktkonzentration des Detektors vom Gleichgewichtsverhältnis der in dem zu prüfenden Bereich vorhandenen Radon-Zerfallsprodukte ab und nicht einfach von der Radonkonzentration. Ungefilterte Detektoren mit Zellulosenitratfilm weisen eine Energieabhängigkeit auf. Dieses Phänomen verringert die Abhängigkeit des Kalibrierungsfaktors vom Gleichgewichtsverhältnis, gleicht sie aber nicht vollständig aus. Aus diesem Grund empfiehlt das EPA, diese Geräte nicht zu verwenden, wenn der Gleichgewichtsanteil kleiner als 0,35 oder größer als 0,60 ist, ohne den Kalibrierungsfaktor anzupassen. Das EPA führt derzeit eine weitere Bewertung dieses Geräts durch, um die Auswirkungen des Gleichgewichtsanteils und anderer Faktoren auf die Leistung genauer zu bestimmen. Diese Bewertungen werden zu einer Entscheidung darüber führen, ob das derzeitige Protokoll feiner abgestimmt oder die Methode von der Methodenliste gestrichen werden soll.

EL - Electret Ion Chamber (Long-Term) - Elektret-Ionenkammer (Langzeit)

Bei dieser Methode befindet sich eine elektrostatisch aufgeladene Detektorscheibe (Elektret) in einem kleinen Behälter (Lithiumkammer). Während des Messzeitraums diffundiert Radon durch eine mit einem Filter abgedeckte Öffnung in die Kammer. Die Ionisierung, die durch den Zerfall von Radon und seinen Folgeprodukten entsteht, verringert die Spannung am Elektret. Ein Kalibrierungsfaktor setzt den gemessenen Spannungsabfall mit der Radonkonzentration in Beziehung. Je nach Ausführung des Elektrets ist der Detektor für Langzeit- oder Kurzzeitmessungen geeignet. Detektoren dieses Typs können 1 bis 12 Monate ausgesetzt werden.

ES - Electret Ion Chamber (Short-Term) - Elektret-Ionenkammer (Kurzzeit)

Das Verfahren ist genau dasselbe wie bei der vorherigen EL-Methode, aber da Lithium-Elektretkammern echte integrierende Detektoren sind, können sie bei ausreichend hohen Radonwerten in kürzeren Abständen exponiert werden.

GC - Grab Radon/Activated Charcoal – Radonabscheidung an Aktivkohle

Bei dieser Methode nimmt ein geschulter Techniker eine Radonprobe, indem er mit einer Pumpe oder einem Ventilator Luft durch eine mit Aktivkohle gefüllte Patrone saugt. Je nach Aufbau der Patrone und des Luftstroms dauert die Probenahme zwischen 15 Minuten und 1 Stunde. Nach der Probenahme wird die Patrone in einen versiegelten Behälter gelegt und zu einem Analyselabor gebracht, das ungefähr die gleichen Bedingungen wie bei der AC- oder LS-Methode erfüllt.

GB - Grab Radon/Pump-Collapsible Bag - Radonabscheidung mittels Pumpe und Faltbeutel

Bei dieser Methode wird ein für Radon undurchlässiger Probenahmebeutel verwendet. Ein geschulter Techniker füllt den Beutel mit Hilfe einer tragbaren Pumpe mit Luft und transportiert ihn dann zur Analyse ins Labor. Normalerweise wird die Luft aus dem Beutel in eine Szintillationszelle geleitet und die Analyse im GS-Modus durchgeführt.

GS - Grab Radon/Scintillation Cell – Radonabscheidung in Szintillationszelle

Bei dieser Methode saugt ein erfahrener Bediener Luft durch einen Filter, um Radon-Zerfallsprodukte in einer Szintillationszelle zu entfernen. Dazu öffnet er ein Ventil in einer Szintillationszelle, die zuvor mit einer Vakuumpumpe evakuiert wurde, oder er saugt Luft durch die Zelle, bis sich die Luft im Inneren mit der Außenluft im Gleichgewicht befindet, und verschließt sie dann. Zur Analyse der Luftprobe wird das Endfenster der Zelle auf eine Photomultiplier-Röhre gesetzt, um die Szintillationen zu zählen, die entstehen, wenn Alphateilchen des Radon-Zerfalls auf die Zinksulfidbeschichtung der Zelle treffen. Die Zählungen werden mittels einer Berechnung in die Radonkonzentration umgerechnet.

SC - Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cell - Dreitägig integrierende evakuierte Szintillationszelle

Bei dieser Methode wird eine Szintillationszelle mit einem Drosselventil und einem Unterdruckmesser ausgestattet. Vor der Verteilung wird die Szintillationszelle evakuiert. Vor Ort beobachtet ein spezialisierter Techniker die Unterdruckanzeige und öffnet das Ventil. Der Durchfluss durch das Ventil ist recht langsam, so dass eine Probenahmezeit von mehr als 3 Tagen erforderlich ist. Am Ende des Probenahmezeitraums schließt der Techniker das Ventil, notiert den Druckwert und kehrt mit der Zelle ins Labor zurück. Die Analyseverfahren sind ungefähr dieselben wie bei der oben beschriebenen GS-Methode. Bei einer Variante dieser Methode wird das Ventil an einem starren Behälter angebracht und die Luftprobe zur Analyse in eine Szintillationszelle geleitet.

PB - Pump-Collapsible Bag (1-day) - Faltbarer Pumpenbeutel (1 Tag)

Bei dieser Methode wird ein radondichter Probenbeutel über einen Zeitraum von 24 Stunden mit einer Pumpe gefüllt, die so programmiert ist, dass sie während des Probenahmezeitraums in vorgegebenen Abständen kleine Luftmengen abpumpt. Nach der Probenahme sind die Analyseverfahren ähnlich wie bei der GB-Methode.

GW - Grab Working Level - "Working Level"-Erfassung

Bei dieser Methode wird ein bekanntes Luftvolumen durch einen Filter gezogen, der Radon-Zerfallsprodukte auffängt. Die Dauer der Probenahme beträgt in der Regel 5 Minuten. Die Zerfallsprodukte werden mit einem Alphaspektrometer gezählt. Die Zählung muss zeitlich genau nach der Entnahme der Probe erfolgen. Die beiden am häufigsten verwendeten Zählverfahren sind die von Kusnitz und Tsivoglou.

RP - Radon Progeny Integrating Sampling Unit - Radontöchter integrierende Probenahmeinheit

Bei dieser Methode wird mit einer Niedrigstrompumpe kontinuierlich Luft durch einen Filter gesaugt. Je nach verwendetem Detektor wird die von den auf dem Filter eingeschlossenen Zerfallsprodukten emittierte Strahlung auf zwei Thermodosimetern (TLD), einem Alphaspurendetektor oder einem Elektret aufgezeichnet. Die derzeit verfügbaren Geräte benötigen Zugang zu einer Stromversorgung, erfordern aber keinen erfahrenen Bediener. Die Dauer der Probenahme muss mindestens 72 Stunden betragen. Nach der Probenahme wird der Detektor an ein Labor geschickt, das die Alpha- und Elektret-Spurenanalyse nach den für AT-, EL- und ES-Geräte beschriebenen Verfahren durchführt. TLD-Detektoren werden durch Erhitzen und Messung des emittierten Lichts analysiert. Eine Berechnung wandelt die Lichtmessung in Radonkonzentrationen um.

Kontinuierliche Methoden zur Radonmessung

Die EPA (Environmental Protection Agency) listet nur zwei Methoden zur kontinuierlichen Radonmessung auf, CW und CR

CW - Continuous Working Level Monitoring (24-hrs) - Kontinuierlich Kontinuierliche "Working Level" Überwachung (24 Stunden)

Diese Methode umfasst Geräte, die die Messung von Radon-Zerfallsprodukten in Echtzeit aufzeichnen. Die Radon-Zerfallsprodukte werden erfasst, indem kontinuierlich Luft durch einen Filter gepumpt wird. Ein Sperrschichtdetektor oder ein Grenzflächendetektor zählt die Alphateilchen, die von den Radon-Zerfallsprodukten erzeugt werden, während sie in diesem Filter zerfallen. Das Überwachungsgerät enthält in der Regel einen Mikroprozessor, der die Anzahl der Zählungen für vorbestimmte Zeitintervalle speichert, um sie später abzurufen. Die Messzeit für den Messversuch des Programms beträgt etwa 24 Stunden.



Schwächen:

- Hohe Kosten für Messgerät und Zubehör.
- Die Pumpe muss eine konstante Durchflussmenge gewährleisten.
- Die Messung ist auch von der Luftfeuchtigkeit abhängig.
- Durch das ständige Pumpen von Luft sammelt sich schnell Staub an und muss daher regelmäßig gereinigt werden.
- Der Filter sollte vor jeder Messung (spätestens alle 24 bis 48 Stunden) gewechselt werden.
- Die Durchflussrate nimmt allmählich ab, wenn sich Staub ansammelt, so dass sich die Messung mit der Zeit ändert.
- Es ist nicht möglich, in einem definierten Volumen zu messen, so dass die Kalibrierung - bei jeder Messung - mit einer Prüfquelle durchgeführt werden muss.
- Die Ausstattung mit Filtern, Kalibrierquelle und Durchflussmesser machen diese Geräte zusätzlich teuer.
- So sehr man auch von "kontinuierlicher" Messung spricht, in Wirklichkeit muss die Messung periodisch unterbrochen werden, um den Filter zu wechseln.

Und schließlich, wiederum in Anlehnung an die EPA-Notizen, hier die CR-Methode, die unsere Ionenkammer und zwei ähnliche Varianten umfasst.

CR - Continuous Radon Monitoring - Kontinuierliche Radonüberwachung

Diese Geräte messen kontinuierlich die Veränderungen der Radonkonzentration. Luft wird in eine Zählkammer gepumpt **oder diffundiert**, bei der es sich in der Regel um eine Szintillationszelle **oder eine Ionisationskammer** handelt. Elektronische Schaltkreise **zählen die Zersetzen in einem bekannten Volumen** und die Radonkonzentration wird mit einem Koeffizienten berechnet.

Wir haben die Teile fett hervorgehoben, die sich auf unsere Ionenkammer beziehen, die daher als **"Diffusions-Ionenkammer zur kontinuierlichen Messung von Radon durch Zählung nach der CR-Methode"** eingestuft wird.

