Nachweis der Radon-Exhalation an Graniten mit dem Stuttgarter Geigerle

Bernd Laquai, 23.1.2013

Gesundheitliche Risken von Granit als Baustoff

Granit ist ein Gestein, das als Baustoff einerseits wegen seiner Beständigkeit und andererseits wegen seiner dekorativen Wirkung als Baustoff sehr beliebt ist. Deswegen reicht die Anwendung vom Straßenbau über Fußboden- und Wandbeläge bis hin zu Küchenarbeitsplatten. Als Naturstein wird Granit als natürlich und gesund wahrgenommen. In Wirklichkeit muss das aber nicht immer so sein. Granit enthält je nach Herkunft unterschiedliche Spuren an natürlich radioaktiven Stoffen (Radionuklide). Das sind das Kalium-40 Isotop sowie die Radionuklide aus den Zerfallsreihen des Thorium und Uran. Während das Kalium-40 eine schwache Radioaktivität aufweist und beim Zerfall Betastrahlung abgibt, ist die Radioaktivität des natürlichen Thorium und vor allem des natürlichen Uran doch so hoch, dass sie nicht mehr als gesundheitlich unbedenklich angesehen werden kann. Das liegt vor allem daran, dass unter den Zerfallsprodukten das Radionuklid Radon auftaucht, welches gasförmig ist und mit der Atemluft eingeatmet werden kann. Dazu kommt, dass es sich bei der emittierten radioaktiven Strahlung des Radons und seiner Folgeprodukte um eine hoch energetische und biologisch hochwirksame Alphastrahlung handelt, die in den Zellen des empfindlichen Lungengewebes die DNS aufbrechen und die Moleküle im Zellplasma radikalisieren kann. Derartige Strahlenschäden können zur malignen Entartung der Zellen (Krebserkrankung) führen, wenn dem Immunsystem die Reparatur nicht rechtzeitig gelingt oder das Immunsystem nicht über das gezieltes Herbeiführen des Zelltods (Apoptose) die gestörte Zelle aussondern kann.

Um den Bürger vor den Gefahren zu schützen, welche von natürlichen, radioaktiven Baustoffen ausgehen können, hat die EU im Jahr 1999 bereits die Richtlinie 112 geschaffen („Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials“) und den Mitgliedstaaten empfohlen, sie in ein nationales Gesetz umzusetzen. Leider wurde der Empfehlung bisher nur in wenigen Mitgliedstaaten (z.B. Schweden) gefolgt. Ebenso hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Empfehlung abgegeben, die Radonaktivität in der Raumluft von Wohnräumen gesetzlich zu beschränken. Aber auch dieser Empfehlung sind bisher nur wenige Staaten gefolgt (z.B. die Schweiz). Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, sich als Verbraucher mit der Thematik zu befassen und den Radionuklidgehalt beim Baustoffhersteller abzufragen oder in Wohnräumen selbst die Radonkonzentration zu überprüfen.

Um das Thema Radon zu verstehen und sich näher damit zu befassen ist nicht unbedingt eine teure, wissenschaftliche Ausrüstung notwendig. Mit etwas Geschick kann das Verständnis der Thematik auch mit selbstgebauten Geräten erreicht werden. Dies soll hier anhand es „Stuttgarter Geigerle“ PIN-Dioden Zählers gezeigt werden.

Nachweis von Alphastrahlung

Der Nachteil von zählrohrbasierten Geigerzählern ist die Tatsache, dass sie selten alpha-empfindlich sind. Dazu kommt, dass wenn das Fenster eines Geiger-Müller-Zählrohrs sehr dünn gemacht wird um eine Empfindlichkeit für Alpha-Strahlung zu erreichen (Glimmer-

bzw. Mica-Fenster), auch die Empfindlichkeit gegenüber allen anderen Strahlungsarten zunimmt. D.h. ein entsprechender Geiger-Müller Zähler registriert nicht nur die Radioaktivität der Alpha-Strahlung sondern auch alle Gamma-Strahlungsquanten herunter bis zur niedrigsten Energie. Die Folge davon ist, dass die Nullrate relativ hoch ist und schwach radioaktive Alpha-Quellen nur schwer detektiert werden können.

Ein PIN-Dioden Zähler dagegen, der ohne Fenster betrieben wird, ist zwar auch gegen niederenergetische Strahlung empfindlich. Allerdings lässt sich diese relativ leicht über den Komparator anhand der Pulshöhe von der Alphastrahlung abgrenzen. Daher ist ein PIN-Dioden Zähler grundsätzlich gut dafür geeignet, auch Alpha-Quellen mit niedriger Aktivität zu detektieren, ohne dass die Nullrate übermäßig zunimmt. Ein PIN-Dioden Zähler kann so selbst eine schwache Radon-Radioaktivität in der Luft nachzuweisen, wie im Folgenden gezeigt wird.

Radon

Im Hinblick auf die natürliche Strahlenexposition des Menschen gibt es eigentlich nur zwei Radionuklide, die den größten Teil ausmachen. Einmal das Kalium-40 Isotop, welches im natürlichen Kalium enthalten ist und welches über die Nahrung aufgenommen wird. Das andere dominante Radionuklid ist das Radon, welches in den Zerfallsketten des natürlichen Uran und des natürlichen Thorium entsteht. Das radioaktive Edelgas Radon ist gasförmig, geruchs- und geschmacklos und wird völlig unbemerkt mit der Atemluft eingeatmet.

Da der menschliche Körper einen geregelten Kalium-Stoffwechsel hat, reguliert dieser automatisch auch die spezifische Radioaktivität des K-40 Isotops. Das K-40 zerfällt zu 90% ins stabile Calcium und zu 10% in das stabile Argon. Das Immunsystem ist auf diese Exposition eingestellt, so dass das Kalium in der Regel kein Problem darstellt. Anders sieht das aber beim Radon aus. Uran und Thorium sind primordiale Radionuklide, die bei der Erdentstehung in glühender Magma enthalten waren und daher vor allem in tiefem alten Gestein zu finden sind (Plutonite). Wenn dieses Tiefengestein (Grundgebirge), wie in vielen Fällen, sehr tief liegt und von weiteren Gesteinsschichten und dichten Böden bedeckt ist, gelangen nur geringe Konzentrationen des radioaktiven Radongases an die Bodenoberfläche und damit in die Atemluft. In Berg- und Gebirgsregionen jedoch tritt das Grundgebirge oft direkt an die Oberfläche oder ist nur von einer dünnen porösen Bodenschichten bedeckt. Dann gelangt das Radon durch Konvektion und Diffusion durch die dünnen porösen Bodenschichten an die Oberfläche und es entstehen in der Bodenluft relativ hohe Konzentrationen an Radon. Dies ist vor allem in Regionen mit granitigem Gestein im Untergrund der Fall. Weiter sind noch Anomalien an Übergängen von geologischen Schichtungen Ursache für das Austreten von Radon. Hier treten gelegentlich ebenfalls unerwartet hohe Radonaktivitäten in der Bodenluft auf.

An der Bodenoberfläche in der freien Landschaft verdünnt sich das Radon relativ schnell und stellt in der Regel kein weiteres Problem dar. In Deutschland beträgt die normale Radon-spezifische Radioaktivität der Atemluft im Freien etwa 50Bq/m^3. Wenn aber in Gegenden mit hoher Radon-Bodenluftkonzentration Wohnräume ohne besondere Schutzmaßnahmen gebaut werden, dann kann das Gas in Wohnräume eindringen und sich dort aufstauen. Da in solchen Fällen das Radongas in überdurchschnittlicher Konzentration in der Atemluft vorliegt, kommt es zu einer Exposition, die ein deutlich erhöhtes Risiko darstellt. Als

gefährlich werden heute Radonaktivitäten von mehr als 200Bq pro Kubikmeter Atemluft angesehen.

Dabei ist nicht das Radon selbst das Problem. Radon ist ein Edelgas, geht kaum Reaktionen ein und wird nach kurzer Zeit wieder ausgeatmet. Das eigentliche Problem sind die sehr kurzlebigen Zerfallsprodukte, die beim Zerfall des Radon eine elektrische Ladung mitbekommen und sich daher leicht an Aerosole (z.B. Staubpartikel) anheften. Diese werden in der Lunge ausgefiltert, so dass deren gesamte Zerfallsenergie auf dem empfindlichen Lungengewebe abgegeben wird, genau wie die Zerfallsenergie von deren weiteren Folgeprodukte. Dazu kommt, dass Radon, genau wie seine direkten Zerfallsprodukte Alphastrahler sind, und deren Zerfallsenergie und biologische Wirksamkeit ungleich höher ist als die von Beta- und Gammastrahlern.

Zum Thema Radon wurde viel geforscht und unzählige Studien erstellt und mittlerweile ist es daher einigermaßen gesichert, dass bereits bei einer spezifischen Aktivität von 200Bq/m^3 des Radon das Risiko für eine Lungenkrebserkrankung gegenüber dem normalen Risiko sichtbar zunimmt. In Deutschland gibt es derzeit pro Jahr etwa 40000 Lungenkrebserkrankungen, wovon ca. 3000 einer überhöhten Radonexposition zugeschrieben werden. Es gibt in der Zwischenzeit in allen Bundesländern sowie beim Bundesamt für Strahlenschutz umfangreiches Infomaterial zum Thema Radon und zur entsprechenden Vorsorge. Auch in allen andern Industrieländern gibt es diese Informationen. Was aber in wenigen Ländern betrieben wird ist eine aktive Aufklärung. Auch gibt es in nur wenigen Ländern verbindliche Grenzwerte für Wohn- und Aufenthaltsräme. Und nur in ganz wenigen europäischen Ländern muss für die Baugenehmigung eine Radonmessung gemacht werden. Richtlinien dagegen gibt es etliche, unter anderem von der EU, welche aber den Mitgliedsländern lediglich eine freiwillige Umsetzung in nationale Gesetze vorsehen.

Hintergrund für die zögerliche Haltung von amtlicher Seite her ist meist der Wertverfall von Immobilien, wenn bekannt wird, dass die Bodenluft das radioaktive Radon-Gas in höherer Konzentration enthält oder ein Gebäude aufwendig saniert werden müsste. Genauso könnten hohe Kosten auf die Städte und Kommunen zukommen, wenn auch öffentliche Gebäude wie Schulen und Kindergärten Radon-saniert werden müssten. Der Tourismus könnte ebenfalls darunter leiden, wenn eine Region zum Radon-Risiko-Gebiet erklärt wird, mit sichtbaren Konsequenzen in der Gebäudetechnik. Deswegen spricht man auch eher vom Radon-Potential eines Gebiets oder von Radon-Vorsorgegebieten als von Risiko-Gebieten. Viele Immobilienbesitzer scheuen sich meist vor Messungen, da bei Kenntnis des Werts, dieser beim Verkauf der Immobilie angegeben werden müsste.

In den meisten Fällen ist jedoch der Aufwand für eine Entschärfung des Problems relativ gering, es reicht meist eine einfache Wohnraumbelüftung, vor allem bei energiesanierten Gebäuden mit dichter Gebäudehülle. Von daher ist es in vielen Fällen wünschenswert sich mit einer Messung Gewissheit zu verschaffen. Dazu gibt es in der Zwischenzeit kostengünstige genormte Messverfahren (Kernspurexposimeter oder Aktivkohle-Radonsammler) die von professionellen Labors ausgewertet werden.

Auch die Exhalation von Radon aus Baustoffen kann zum Problem werden. Das ist das Thema der EU-Richtlinie 112 der zum Schutz vor ionisierender Strahlung radioaktiver Baustoffe.

Auch hier wären etliche Industriebetriebe betroffen, die ihre Baumaterialien nicht mehr verkaufen könnten. Besonders betroffen sind Natursteine, vor allem Granite. Granite können in Einzelfällen hohe Urankonzentrationen erreichen, was auch in die Nähe der nicht mehr zulässigen chemischen Toxizität kommt, weil Uran auch ein giftiges Schwermetall ist. Da das Uran aber auf natürliche Weise im dem entsprechenden Granit vorkommt, wird entsprechendes Baumaterial oft als urgesunder Naturstein verkauft.

Im folgenden wird gezeigt, wie man mit dem Stuttgarter Geigerle das Radon und damit auch den Urangehalt in einer speziellen Messkammer an bestimmten Baustoffen nachweisen kann. Solche Messungen in einer Messkammer, die lediglich dem Nachweis dienen, können aber eine genormte Messung in Wohnräumen und deren Auswertung mittels geeichter Analysegeräte durch ein professionelles Labors auf keinen Fall ersetzen.

Umbau des Stuttgarter Geigerle zum Radon-empfindlichen Detektor

Grundsätzlich gibt es zwei Radon-Isotope, die in risikoreichen Konzentrationen auftreten können, das Radon-222, welches in der Uran-Zerfallsreihe aus dem Radium-226 durch Alphazerfall entsteht und das Radon-220 (auch Thoron genannt), welches aus dem Radium-224 entsteht und welches in der Thorium-Zerfallsreihe auftaucht. Da das Radon-222 in natürlicher Umgebung zu 90% vorkommt, bezieht man sich in den meisten Fällen bei Radon auf das Radon-222 Isotop. Dieses Isotop zerfällt weiter in Polonium-218, wobei ebenfalls Alpha-Strahlung emittiert wird. Da die Halbwertszeit von Radon 3.82 Tage beträgt, die von Polonium-218 aber nur 3 Minuten, kann man zunächst davon ausgehen, dass die Po-218 Aktivität der des Radon entspricht und annähernd ein radioaktives Gleichgewicht besteht. Da sowohl das Radon selbst, wie auch sein unmittelbares Tochternuklid Po-218 Alphastrahler sind, sollte ein entsprechender Detektor gegen Alphastrahlung empfindlich sein. Auf den Alpha-Zerfall des Polonium-218 in Blei-214 folgen zwei Beta-Zerfälle in Bismut-214 und Polonium-214, gefolgt von einem weiteren Alpha-Zerfall in das langlebige Blei-210. Alle diese Zerfälle liegen mit ihren Halbwertszeiten im Minutenbereich, so dass man davon ausgehen kann, dass diese Summen-Energie in kurzem zeitlichen Abstand auf einen Radonzerfall frei wird und die freigesetzte Gesamtenergie durch die Energie der Alpha-Strahlung dominiert wird.

Da Radon gasförmig ist, muss es zur Messung in einem Volumen eingeschlossen werden in dem sich auch der Detektor befindet. Es bietet sich nun an, für die Messung eine lichtdichte Kammer zu verwenden und darin auch den PIN-Dioden Detektor unterzubringen. Damit ist es dann nicht mehr notwendig, dass die PIN-Diode selbst gegen Licht geschützt werden muss.

Das heißt man kann statt der BPW34 im Plastikgehäuse eine PIN-Diode im TO-39 Metall-Gehäuse als Detektor nehmen und das Glasfenster entfernen um die Diode alpha-empfindlich zu machen. Man muss es also nicht durch ein anderes lichtdichtes und alphadurchlässiges Fenster wieder verschließen, solange die Messkammer selbst während der Messung lichtdicht bleibt.

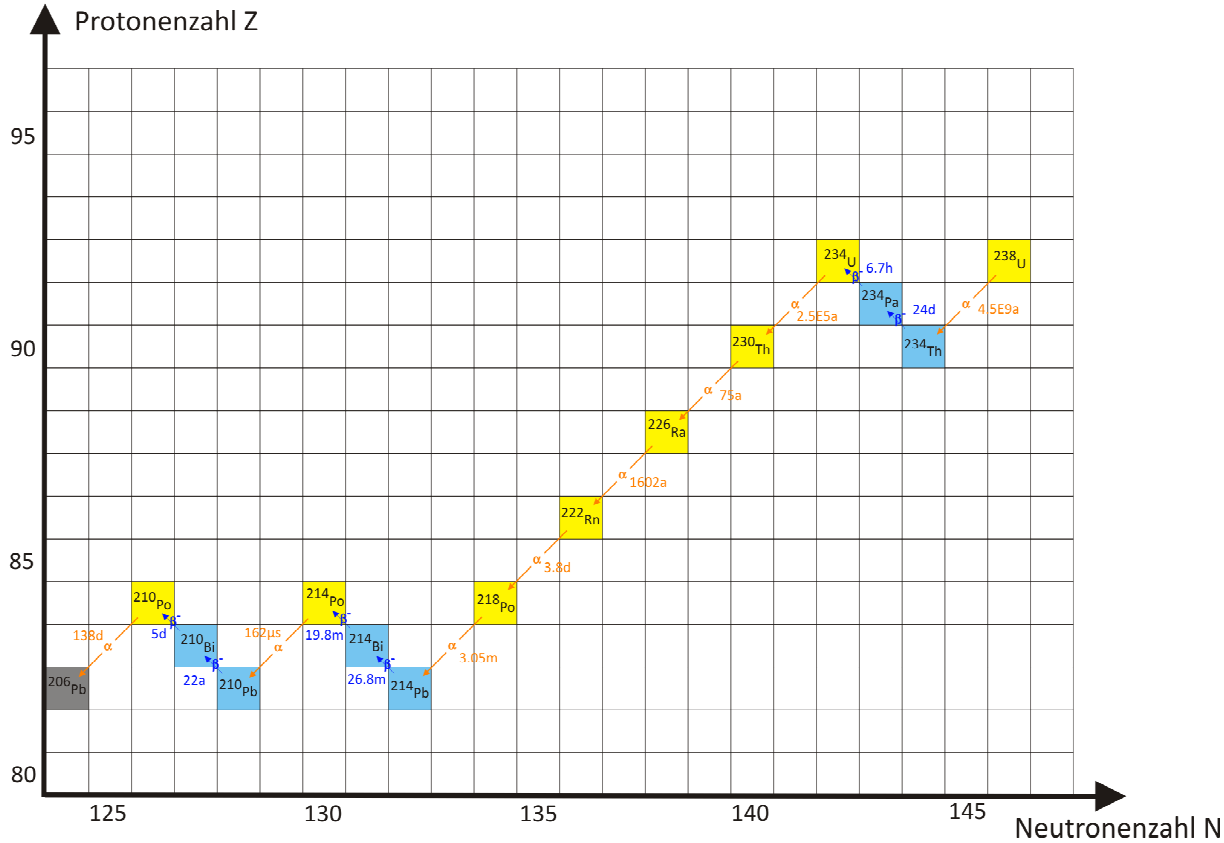

Abb. 1: Zerfallsreihe des Uran (nur dominante Zerfälle)

Als PIN-Diode im TO-39 Gehäuse haben sich zwei Typen als sehr sensitive Detektoren bewährt, einmal der Typ S1223 von Hamamatsu bzw. der Typ BPX61 von Osram. Beide sind ziemlich gleichwertig und kosten zwischen 10-15 Euro pro Stück.

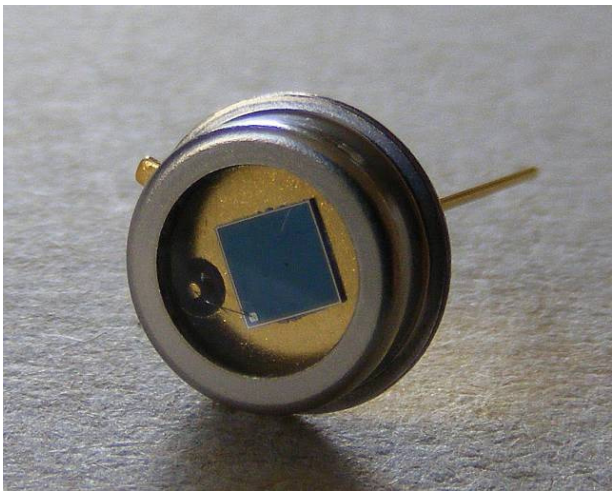

Abb. 2: BPX61 PIN-Photodiode im TO39 Gehäuse mit Glasfenster

Um nun das Stuttgarter Geigerle umzurüsten werden 3 Photodioden im TO-39 Gehäuse so präpariert, dass der Halbleiterchip offen liegt. Die beim Aufschleifen des Fensters auf den Chip fallenden Metallspäne können mit trockener Druckluft grob entfernt werden, stören aber ansonsten nicht, da der Chip noch durch eine dünne isolierende SiO_2 Schicht passiviert

ist. Dann werden die drei bisher verwendeten BPW34 Dioden im Plastikgehäuse gegen die präparierten geöffneten PIN-Dioden im Metallgehäuse ausgetauscht.

Falls die rot/grün LED beim Stuttgarter Geigerle und das zugehörige JK-Flip-Flop mit in das Detektor Gehäuse eingebaut wurden, empfiehlt es sich die LED dadurch zu deaktivieren, dass man das JK-Flip-Flop aus dem IC Sockel entfernt oder den gemeinsame Masseanschluss an der LED ablötet. Auch die Abdeckung der LEDs mit einem lichtdichten Klebeband ist möglich. Das Licht der LED könnte sonst die Funktion der Photodioden stören. Da die Zählraten sehr gering sind, ist die optische Anzeige über die LED für eine Radonmessung ohnehin ohne Nutzen.

Abb. 3: S1223 Photodiode im geöffneten TO-39 Gehäuse

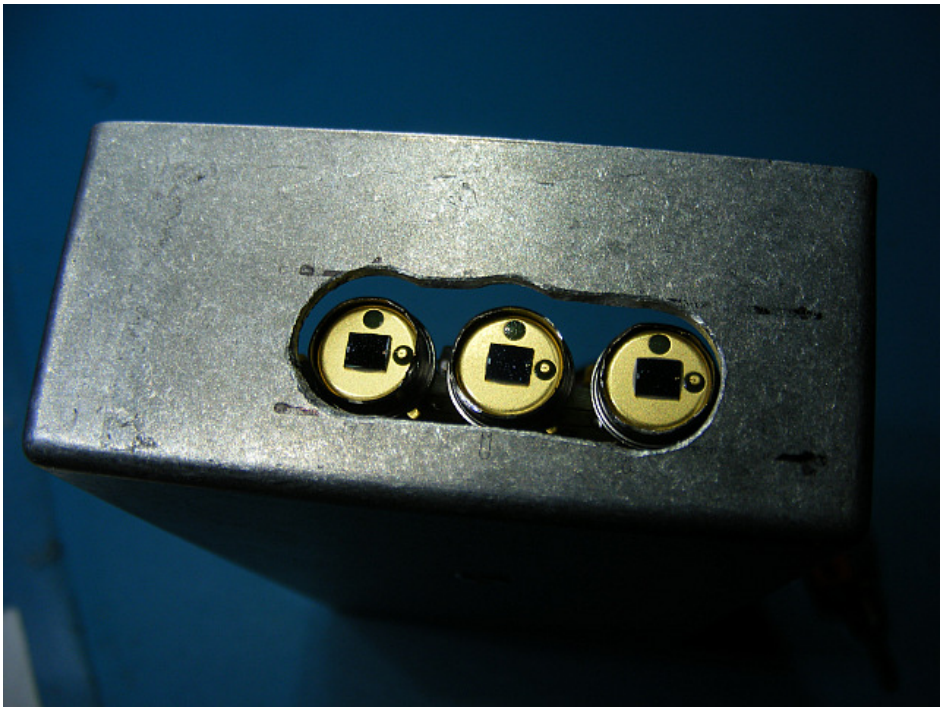

Abb. 4: Die drei geöffneten PIN-Dioden montiert im Detektor-Gehäuse

Um die Einstreuung von Störfeldern zu verhindern ist es aber nötig, die geöffneten PIN-Dioden im Detektor-Gehäuse durch ein Metallnetz abzuschirmen, welches elektrisch mit der Gehäusemasse verbunden sein sollte. Bewährt hat sich dafür eine Spritzschutzabdeckung für Bratfett in Pfannen. Ein derartiger Spritzschutz ist günstig zu haben und besteht aus einem dünnen Aluminiumnetz, welches sich leicht entsprechend zuschneiden lässt.

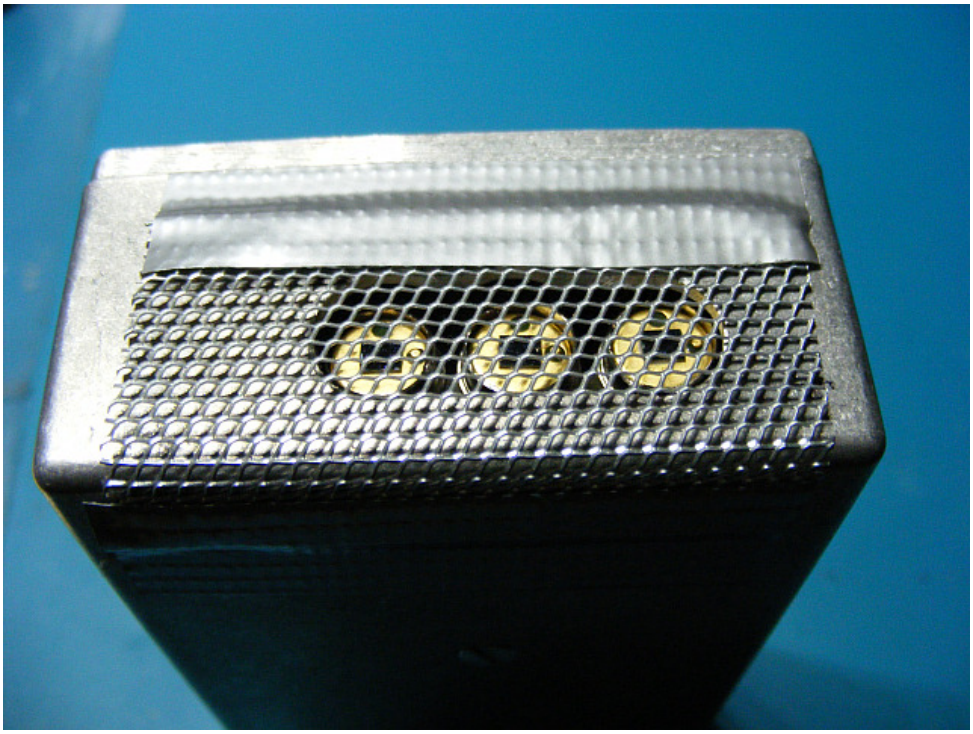

Abb. 5: Mit einem Aluminiumnetz abgedeckte PIN-Dioden im Detektorgehäuse

Ansonsten empfiehlt es sich für die Stromversorgung noch ein stabilisiertes und störspannungsfreies Netzteil zu benutzen, da eine Messung sich über mehrer Wochen hinziehen kann, während der eine Batterie zu viel an Spannung verlieren könnte. Dazu kann auf den existierenden Batterieclip ein zweiter aufgeclippt werden, an den ein Kabel in der richtigen Polarität angelötet werden kann (die Rolle der roten und schwarzen Leitermarkierung vertauschen sich dadurch!). Dieses Kabel muss zunächst aus dem Detektor-Gehäuse geführt werden (Deckel nur lose aufschrauben) und dann aus der Messkammer, wobei hier die Kabeldurchführung gasdicht abgedichtet werden muss. Dazu kann ein stabiles Klebeband dienen.

Abb. 6 zeigt nochmals die Grundschaltung des Stuttgarter Geigerle, jetzt allerdings mit Photodioden im TO-39 Gehäuse. Der Schaltungsteil für die optische LED Anzeige im Detektorgehäuse wurde gegenüber dem Original entfernt, da er hier eher störend wäre und zu einem höheren Stromverbrauch beitragen würde. In Abb. 7 ist die Platine in dem geöffneten Gerät gezeigt, hier allerdings noch mit dem ursprünglichen Schaltungsteil für die LED-Anzeige.

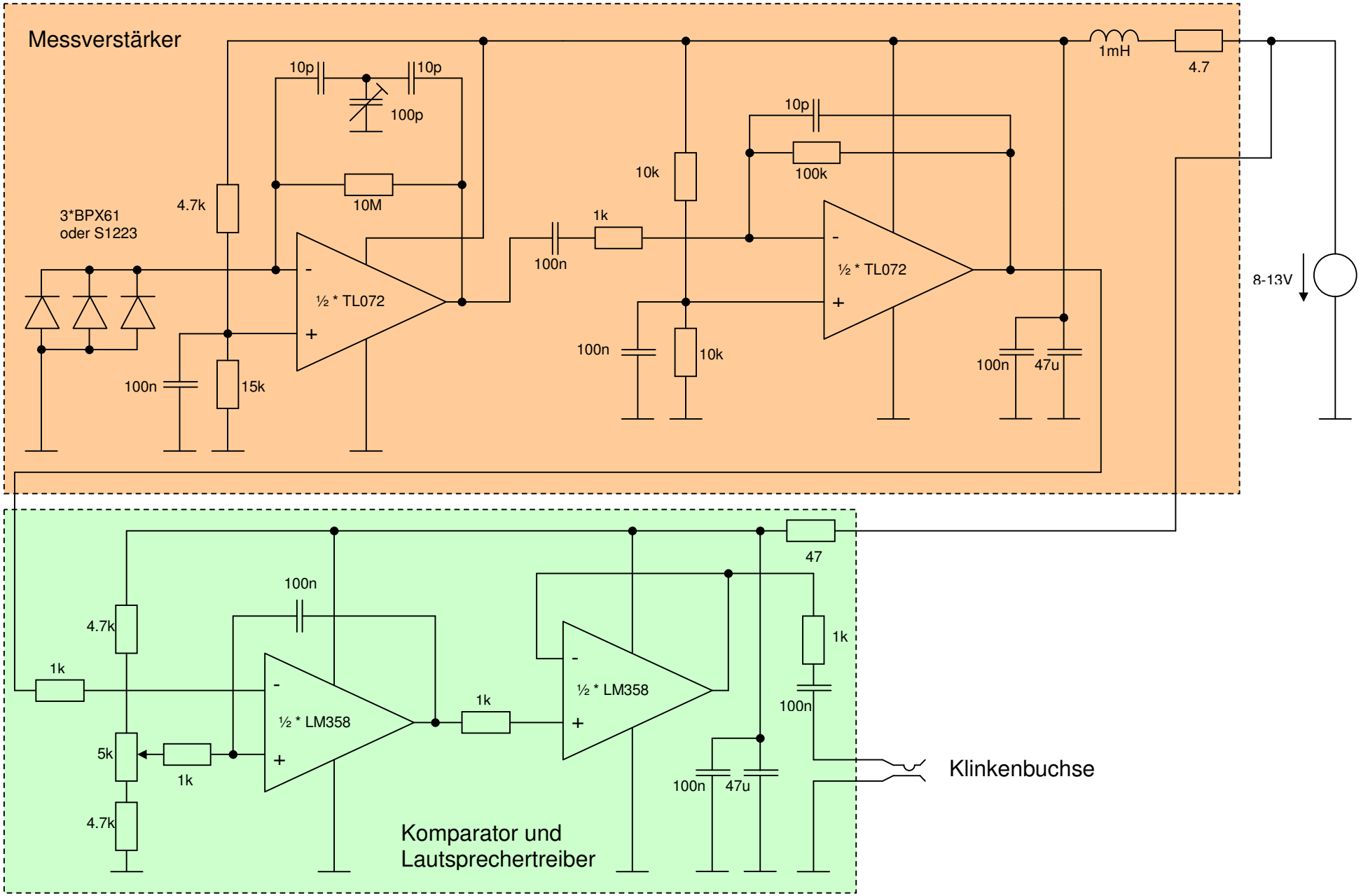

Abb. 6: Stuttgarter Geigerle Grundschaltung für den Einsatz als Radon-Detektor

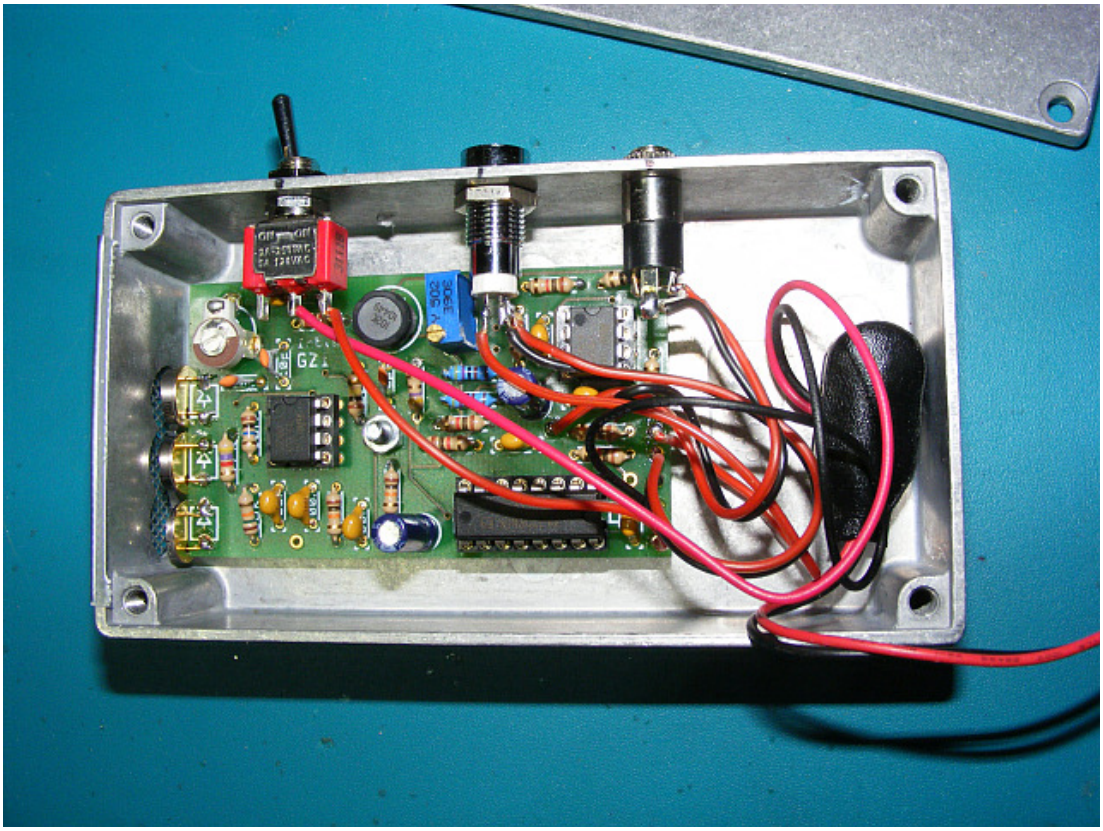

Abb. 7: Geöffnetes Detektorgehäuse

Mikrocontroller-Interface für die Messwerterfassung

Bei Radonmessungen muss berücksichtigt werden, dass für den Menschen relevante Konzentrationen sehr klein sein können, da die Auswirkungen von Expositionen direkt im Bronchialgewebe erst beim permanentem Einatmen entsprechend dramatisch sind. Daher ist natürlich auch ein Ziel, den Detektor so empfindlich wie möglich zu machen. Das aber bedeutet bei gegebener Detektorfläche, dass die Messzeiten sehr, sehr lange werden können. Derzeit geht man davon aus, dass spezifische Radonaktivitäten von mehr als 200Bq/m^3 Luft (mit Tochternukliden) das Risiko für stochastische Gesundheitsschäden signifikant erhöhen (WHO). Um bei solchen Aktivitäten noch eine einigermaßen sicher bestimmbare Zählrate zu erhalten, muss das Zählintervall bei Verwendung von drei PIN-Dioden größer als 6 Stunden sein. Dazu kommt, dass wenn man die Sicherheit haben will, dass es sich bei der gemessenen Aktivität tatsächlich um Radon handelt, wenigstens die Halbwertszeit von 3,8Tagen abgewartet werden muss. Daher ist eine manuelle Messwerterfassung nicht mehr sinnvoll.

Als einfachste Lösung für eine Messwerterfassung bietet sich ein Mikrocontroller an. Während der Messung zählt der Mikrocontroller die detektierten Impulse über ein vorgegebenes Zeitintervall und speichert den Zählerstand für jedes Zählintervall in einem Messwertspeicher ab. Im Auslesemodus liest der Mikrocontroller den Speicher aus und überträgt die Messwerte zur weiteren Analyse in den PC.

Da das Auftreten von Zählimpulsen nicht vorhersehbar ist, bietet sich zum Zählen die Verwendung der Interrupt-Steuerung im Mikrocontroller an. Die Interrupt-Steuerung bewirkt eine Programmverzweigung in eine spezielle Interrupt-Behandlungsroutine, sobald

ein Signalwechsel am Interrupt-Eingang d.h. ein sogenannter Interrupt-Request detektiert wird. Der Signalwechsel am Interrupt-Eingang sollte aber möglichst den Versorgungsspannungs-Bereich des Mikrocontrollers komplett überstreichen, damit eine sicheres Erkennen des Ereignisses gewährleistet ist. Die meisten modernen Mikrocontroller arbeiten aber mit Versorgungsspannungen von 5V oder 3.3V. Wenn nun so wenig wie möglich Modifikationen am ursprünglichen Geigerle-Detektor gemacht werden sollen, so bietet sich an, das Ausganssignal an der Ohrhörer Klinkenbuchse in ein Digitalsignal umzuwandeln, so dass es direkt als Interrupt-Signal verwendet werden kann. Ein solches Mikrocontroller-Interface kann man meistens leicht mit Hilfe einer Steckplatine direkt in ein kommerziell erhältliches Mikrocontroller-System integrieren.

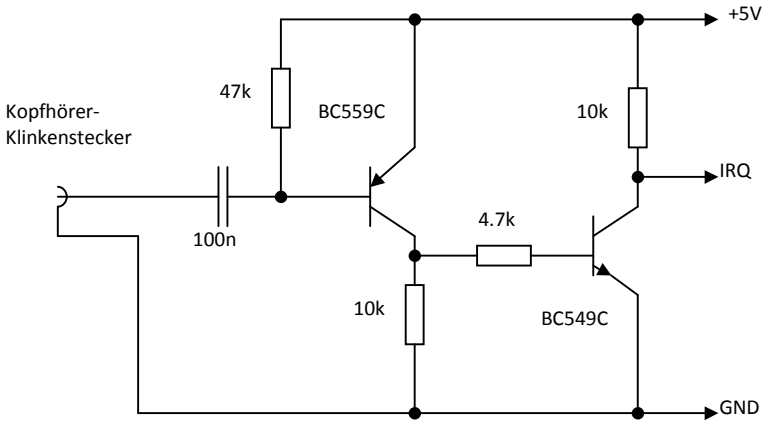

Abb. 8a: Schaltplan Mikrocontroller Interface

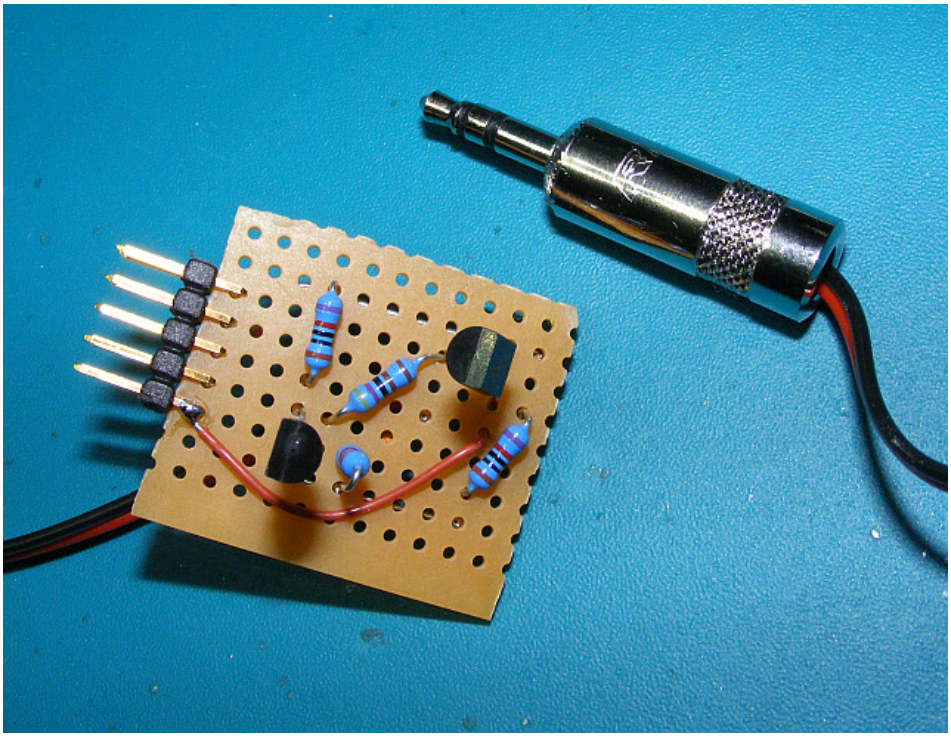

Abb. 8b: Platine für das Mikrocontroller Interface

Das Eingangssignal, welches ein negativer Puls ist, wird zunächst kapazitiv angekoppelt, wobei die Größe der Kapazität die Stärke der Basisstromänderung am ersten PNP-Transistor einstellt. Im Ruhezustand ist die Basis-Emitter Spannung 0 und der PNP-Transistor sperrt. Im

Falle eines negativen Pulses fließt ein Basisstrom, der einen verstärkten Kollektorstrom durch den 10kOhm Widerstand zur Folge hat. Damit steigt die Spannung am Kollektor an, was wiederum einen Basisstrom im NPN-Transistor zur Folge hat, der normalerweise gesperrt ist. Der NPN-Transistor verstärkt diesen bereits verstärkten Basisstrom nochmals, so dass nun der NPN-Transistor voll durchschaltet und in die Sättigung geht. Damit bewegt sich die Kollektorspannung am NPN Transistor von +5V auf nahe 0V und erzeugt damit eine steile, fallende Flanke am Interrupt-Eingang und löst den Interrupt-Request aus.

Diese Schaltung kann bequem auf eine Lochraster-Platine aufgelötet werden, welche mit einem Pfostenstecker versehen werden kann und als Applikationsboard in einem Mikrocontroller-System verwendet werden kann.

Das Mikrocontroller-System

Mikrocontroller gibt es wie Sand am Meer und oft ist es schwer die Vorteile einer Architektur zu erkennen. Auf der andern Seite sind die Investitionen in die Infrastruktur, vor allem in die Entwicklungsumgebung inklusive der Gewöhnung an die Programmiersprache oft sehr hoch. Deswegen kann man erkennen, dass Entwickler, welche sich an ein System gewöhnt haben, dieses so schnell nicht verlassen, auch wenn sich ein Problem auf einem anderen Controller besser lösen ließe. Maßgebend für die Festlegung auf ein System ist heute aber oft die Verfügbarkeit von bereits fertig entwickelten Komponenten, sei es Hardware oder Software. In dem Zusammenhang sind daher offene System (Open Source) meist zu bevorzugen, da eine ganze Community an Entwicklern zu allen möglichen Applikationen bereits fertige Lösungen anbieten. Was die Hardware anbelangt gibt es dann bereits auch fertig bestückte und getestete Platinen zu sehr günstigen Preisen. Dies ist Beispielsweise beim Arduino–System der Fall.

Allerdings garantiert eine offene Plattform nicht unbedingt, dass man in kürzester Zeit eine Lösung bekommt, die man auch didaktisch gut weitervermitteln kann. Grund dafür ist gerade die unüberschaubare Vielfalt an Möglichkeiten, die man damit hat.

Die Firma Conrad bietet ein Mikrocontroller-System unter dem Namen C-Control an, das dagegen relativ leicht überschaubar ist, mit einfachsten Mitteln programmierbar ist und mit einigen vorgefertigten Hardware-Basis-Komponenten geliefert wird. Wenn man daher mehr zielorientiert schnell eine einfache Lösung erreichen will und die Anwendung nicht zu komplex ist, bietet sich dieses Mikrocontroller-System geradezu an. Die Anforderungen der Applikation sind in diesem Fall auch nicht gerade hoch. Man muss lediglich die in relativ großem zeitlichen Abstand auftretende Impulse zählen. Dann brauch man noch einen Echtzeit-Timer, der das Zeitintervall definiert und die Möglichkeit den internen nicht-flüchtigen Speicher (Flash-Memory bzw. EEPROM) zu beschreiben und wieder auszulesen. Ein Display als Statusrückmeldung und die Datenschnittstelle zum PC sind ebenfalls in vielen Mikrocontroller-Systemen zu finden. All das bietet die C-Control Plattform ebenfalls zu einem vertretbaren Preis. Aus diesem Grund wurde dieses System für die erste Implementierung des Radon-Detektors gewählt.

Das C-Control I M2.0 Plattform basiert auf einem Freescale HC908 8-bit Mikrocontroller, der mit 8MHz getaktet wird. Zum Mikrocontroller Steckmodul gibt es ein Applikation-Board, auf dem alle nötigen Basis-Komponenten angebracht sind, dazu gehört die Stromversorgung, ein

LCD-Display, ein Piezo-Lautsprecher, ein Tastenfeld und eine RS-232 Schnittstelle zum Programmieren und zur Datenübertragung. Auf dem Modul befinden sich Steckleisten in die das Mikrocontroller-Modul eingesteckt wird. Die Steckleisten links und rechts des in der Mitte angeordneten Mikrocontroller-Moduls bieten aber auch Platz für fertig käufliche oder selbstgebaute Zusatzmodule.

Als Software wird eine Entwicklungsumgebung mit dem Namen Workbench++ geliefert, welche die Entwicklung der Software unter einem sehr einfachen BASIC-Dialekt ermöglicht. Die Entwicklungsumgebung bietet einen Compiler, welcher einen Token-Code erzeugt, der in den Programmspeicher (Flash-Memory) im Mikrocontrollers übertragen wird. Zur Laufzeit interpretiert das vorgeladene Betriebssystem den Token Code. Im Betriebssystem gibt es etliche vordefinierte Funktionen zum Beispiel eine Uhr, die zu Programmbeginn und während der Programmausführung initialisiert werden kann und so eine einfache Echtzeitsynchronisation ermöglicht. Ein großer Nachteil des Systems muss aber auch erwähnt werden: Das vorgeladene Betriebssystem des Controllers ist proprietär und gestattet nicht das Einbinden eigener Assembler Routinen. Damit bleibt dem Anwender die schnelle Abarbeitung zeitkritischer Aufgaben im Falle hoher Zählraten versperrt.

Als zusätzliche Hardware-Komponenten wurde hier nur die Interface-Platine und ein Taster verwendet. Die Interface-Platine ist so aufgebaut, dass sie über die +5V Spannungsversorgung des Application-Board gespeist wird, die an den Stiftleisten verfügbar ist, genauso wie die Masseverbindung (GND) des Boards. Gleichzeitig wird der IRQ Interrupt Eingang über diese Stiftleiste kontaktiert. Der Taster wird anstelle des Tastenfelds benutzt um zwischen Mess-Modus und dem Auslesemodus zu unterscheiden. Das Tastenfeld hätte die Verwendung eines AD-Wandlerkanals erfordert, was der Einfachheit halber in diesem Beispiel vermieden wurde. Der Taster legt also lediglich einen Port des Mikrocontrollers auf Masse, der über einen Pullup-Widerstand ansonsten auf 5V liegt. Daran erkennt der Controller, dass der Messmodus gewünscht ist und läßt dann das Überschreiben des internen Messwertspeichers zu. Wird der Taster während des Programmstarts nicht gedrückt, werden die intern gespeicherten Messwerte ausgelesen und auf die RS232 Schnittstelle gegeben um sie mit einem Terminalprogram (in der Workbench++ Software integriert) auffangen und auf dem PC anzeigen oder abspeichern zu können. Das Display auf dem Application-Board wurde dazu benutzt, in der ersten Zeile einen Index für den letzten abgespeicherten Messwert anzuzeigen und in der zweiten Zeile den Messwert selbst, der dem Zählerstand im letzten Zeitintervalls entspricht. Dies dient lediglich dazu während der Messung eine gewisse Statusmeldung zurückzugeben.

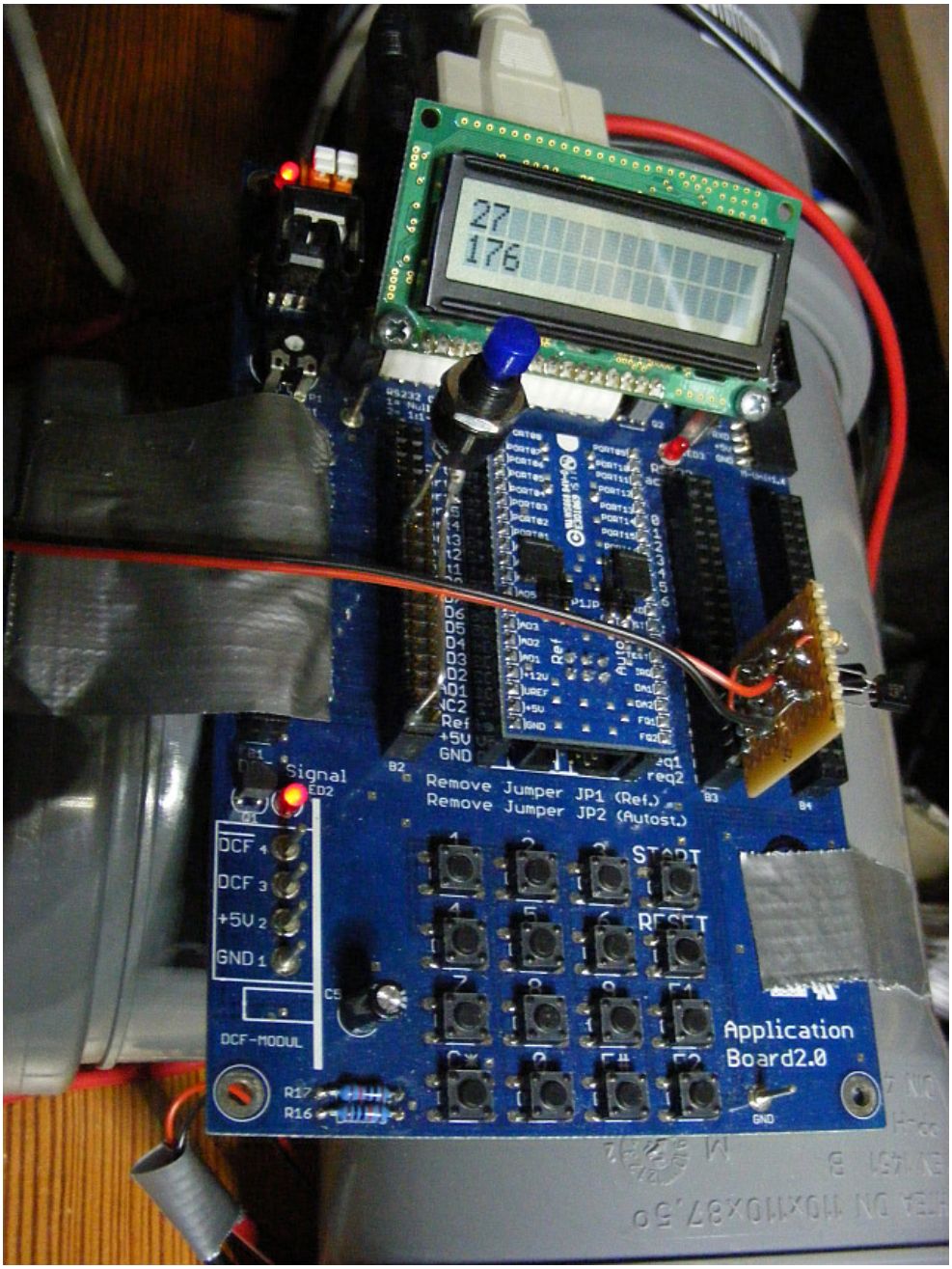

Abb. 9: C-Control Mikrocontrollersystem mit aufgesteckter Interface Platine

Software für die Messwerterfassung

Die Software für die Messwerterfassung gliedert sich in zwei Teile, das Hauptprogramm und die Interruptroutine. Im Hauptprogramm wird entschieden ob gemessen wird oder der interne Messwertspeicher ausgelesen wird. Wenn über eine lange Zeit viele Messwerte abgespeichert wurden, dann ist es ärgerlich, wenn aus Versehen der Messwertspeicher überschrieben wird. Deswegen ist die Modusauswahl so gewählt, dass man zum Messen zusätzlich den Taster drücken muss. Wenn der Taster nicht gedrückt wird, wird der belegte Messwertspeicher ausgelesen.

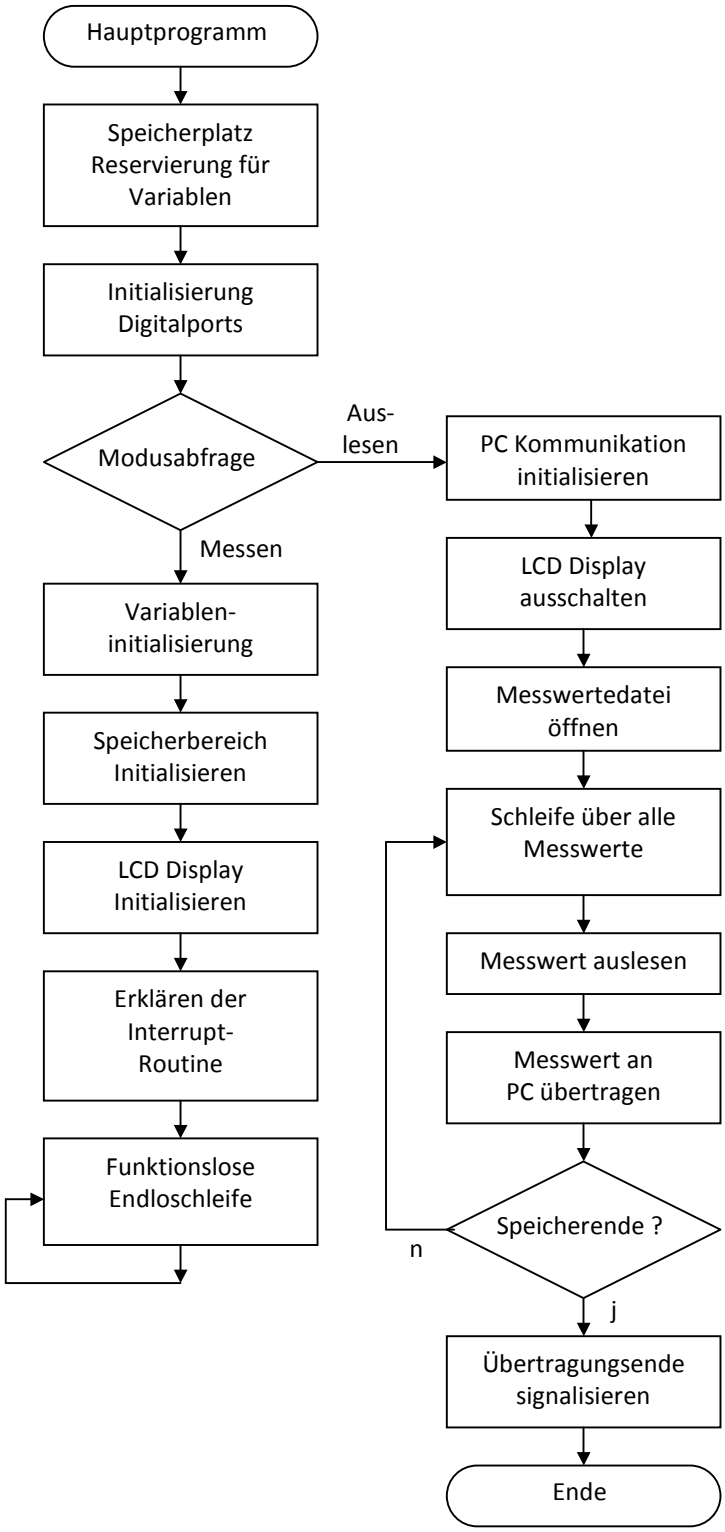

Abb. 10a: Flussdiagramm der Messwerterfassung - Hauptprogramm

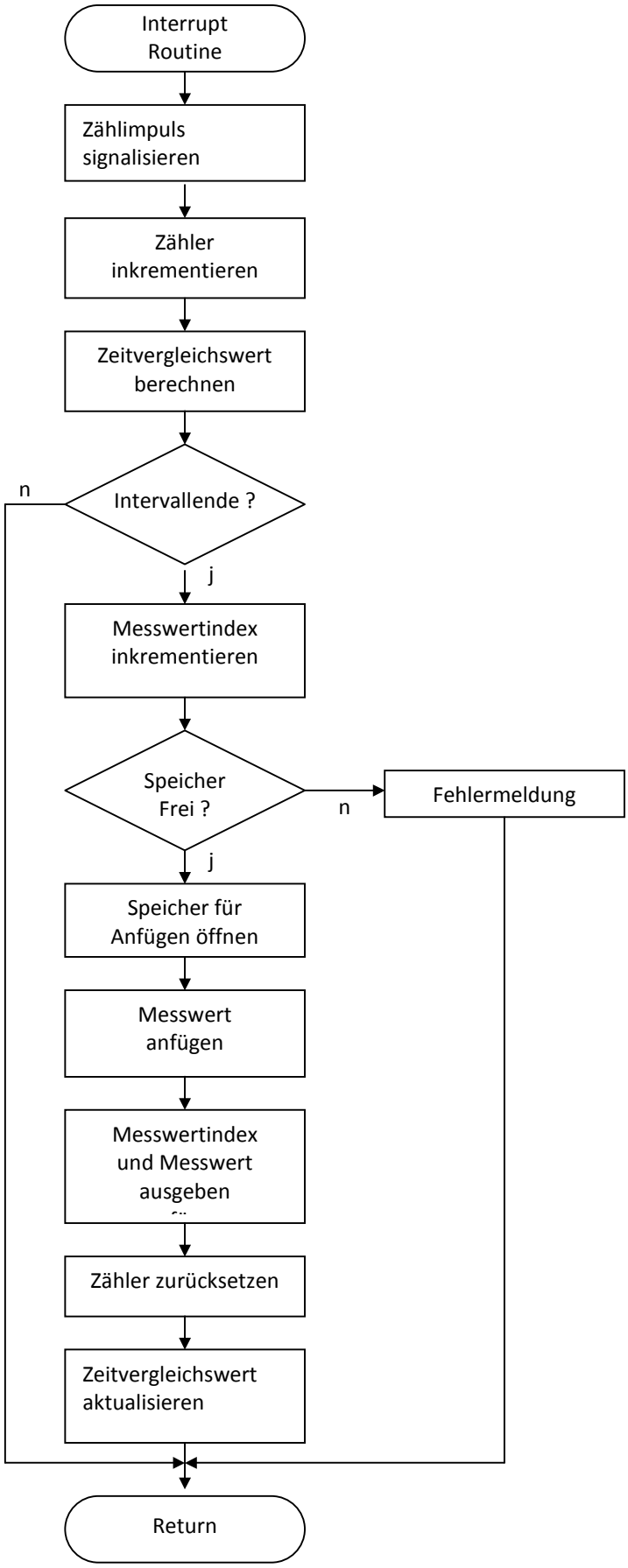

Abb. 10b: Flussdiagramm der Messwerterfassung - Interruptroutine

Wird der Messmodus gewählt, wird der Speicher neu initialisiert, so dass alte Messwerte überschrieben werden. Danach wird die Interrupt Routine aufgesetzt und das Hauptprogramm geht in eine Endlosschleife, die keinerlei Funktion ausführt. Das bedeutet, dass nun auf Zählimpulse gewartet wird, die einen Interrupt-Request auslösen, der sofort bedient wird.

Der eigentliche Zählvorgang und das Abspeichern der Zählerstände für jedes Zeitintervall erfolgt in der Interrupt Routine. Sobald ein Zählimpuls eintrifft verzweigt die Programmausführung in die Interrupt Routine und der Zählimpuls wird durch einen kurzen Signalton signalisiert und dabei der Zähler um eins inkrementiert. Danach wird aus dem Wert der im Uhrenregister steht und die Stunde angibt ein Vergleichswert berechnet. Dabei wird eine Ganzzahl-Division durch das Zeitintervall berechnet. Die Ganzzahl-Arithmetik führt dazu, dass immer nur Vielfache des Zeitintervallwerts entstehen können. Innerhalb eines Zeitintervalls entsteht also immer der selbe Ergebniswert solange das Zeitintervall noch nicht abgelaufen ist. Erst wenn das Zeitintervall überschritten ist, entsteht ein Ergebnis das um 1 größer ist als das vorige. Daran erkennt der Controller das Intervallende, prüft ob noch Platz im Speicher frei ist und schreibt dann den Zählwert weg. Dabei wird auch der Index inkrementiert, der anzeigt wie viele Messwerte bereits abgespeichert wurden. Danach wird der Zähler auf Null zurückgesetzt. Damit kann dann ein neues Zeitintervall beginnen.

Diese Programmstruktur setzt aber voraus, dass innerhalb eines Zeitintervalls genug Zählimpulse eintreffen, da ja auch immer nur dann die Prüfung erfolgt ob das Zeitintervall bereits abgelaufen ist. D.h. das Zeitintervall sollte mindestens so gross gewählt werden, dass mehr als 100 Impulse als Nullrate eintreffen. Sonst kann es vorkommen, dass das Zeitintervall um deutlich mehr als 1/100 verlängert wird um festzustellen, dass es zu Ende ist.

Hintergrund für diese Strategie ist, dass im Hauptprogramm möglichst wenig Aktivität herrscht, die das Registrieren der Zählimpulse verzögern könnte oder dazu führt, dass ein Interrupt nicht behandelt wird, weil bereits einer ansteht. An dieser Stelle wird auch der Nachteil sichtbar, dass infolge des nicht offengelegten Betriebssystems nicht klar ist, wie genau Interrupts intern behandelt werden. Die Ergebnisse aber haben gezeigt, dass bei genügend Zählimpulsen je Intervall das Ergebnis zufriedenstellend genau ist.

Aufbau einer Messkammer

Die erste Konzeption einer Messkammer sah vor, dass Granitsteine in die Kammer gegeben werden sollten, die dort durch Exhalation nach einer gewissen Zeit eine gewisse Radonkonzentration erzeugen. Danach sollten die Steine entnommen werden können ohne eine große Änderung an der Gaskonzentration zu bewirken. Danach sollte die Präsenz von Radon an der Zerfallskurve nachgewiesen werden. Zusätzlich sollte der Abstand des Detektors von der Radonquelle ausreichend groß sein um eine direkte Einwirkung der Probe auf den Detektor zu verhindern.

Um die Dichtigkeit der Kammer zu gewährleisten wurde ein Kanalrohrsystem der Firma Marley gewählt, das aus verschiedenen Rohrelementen mit stabilen Dichtlippen besteht. Zunächst wurde das Kanalrohrsystem KG (orange) verwendet, für das ein

Reinigungsrohrelement KGRG verfügbar ist, welches einen abnehmbaren, mit Gummidichtungen versehen Deckel hat. Als Rohrdurchmesser wurde 125mm gewählt.

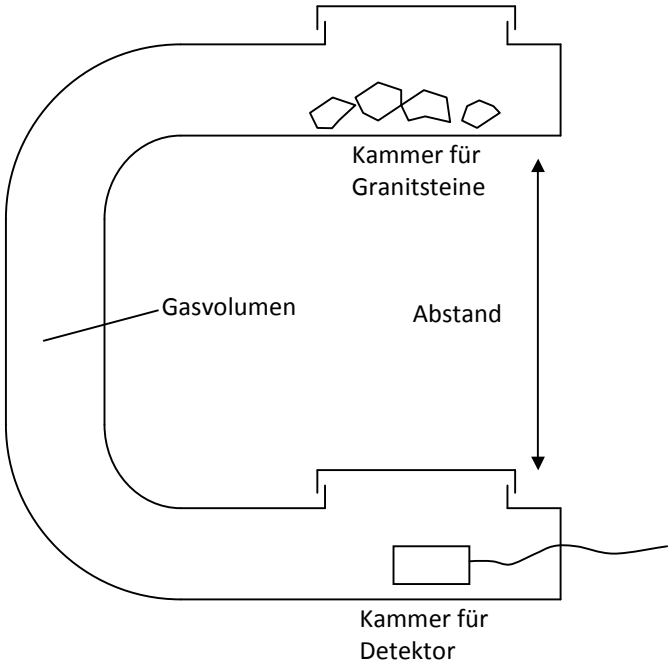

Abb. 11: Messkammer mit Marley KG Kanalrohren

Nach der in Betriebnahme stellte sich aber schnell heraus, dass die orangefarbenen KG Kanalrohre nicht ganz lichtdicht sind. Deswegen musste über die Messkammer noch eine doppelte Aluminiumdecke (Rettungsfolie) zur besseren Lichtabschirmung gelegt werden. Diese Messkammer wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts am Jugendforschungszentrum in Nagold aufgebaut.

Abb. 12: Messkammer mit Marley KG Kanalrohrsystem

Abb. 13: Mit Granitsteinen aus dem Schwarzwald befüllte Kammer

Abb. 14: Detektorkammer und Mikrocontroller zur Messwerteerfassung

Abb. 15: Mit zusätzlicher Lichtschutzfolie abgedeckte KG Messkammer

Nachdem die ersten Messungen bereits relativ hohe Radonkonzentrationen ergaben und die korrekte Funktion der Messkammer sichergestellt war, wurde eine weitere Kammer aus HT Innenentwässerungsrohren (grau, Ø110mm) nach dem selben Schema gebaut, allerdings mit geringerem Kammervolumen (15 Liter). Als Zugang zum Beladen wurde hier ein HTRE Reinigungsrohr mit rundem gedichtetem Schraubdeckel benutzt. Dieser Zugang ist nicht ganz so groß und komfortabel wie beim KG System, aber ausreichend. Die grauen HT Rohre erwiesen sich als völlig lichtdicht, so dass kein weiterer Lichtschutz nötig war.

Abb. 16: Messkammer Typ I aus Marley HT Entwässerungsrohren

Auch diese Messkammer ließ sich schnell in Betrieb nehmen und funktionierte wie erwartet. Während des Versuchsprogramms stellte sich jedoch heraus, dass das Konzept, die Existenz des Radons nach Erreichen einer sichtbaren Konzentration nur an der Zerfallskurve nachzuweisen, unnötig lange Messzeiten erfordert. Es ließ sich nämlich sehr deutlich zeigen, dass der Aufbau der Radon-Aktivität (der sogenannte „Pile-Up“) in der Kammer sehr präzise mit der Zerfallskonstante des Radons abläuft und auch in der Theorie mit einer konstanten Radiumkonzentration (Gleichgewichtsannahme) zusammenpasst. Es konnte weder ein Einfluss durch zeitlich verzögerte Exhalation auf Grund langsamer Diffusions- und Konvektionsvorgänge noch ein Einfluss des sogenannten „Plate-Out“ (Abscheiden eines Teils der elektrisch geladenen Radon-Zerfallsprodukte an der Kammerwand) auf die Messkurve erkannt werden.

Das aber führte zu einem neuen Konzept für eine Messkammer, das nicht mehr davon ausgeht, dass die Radonquelle mit nur geringem Gasverlust für die Beobachtung des Zerfalls benötigt wird. Vielmehr wird lediglich der Anstieg der Aktivität beobachtet und daraus die Zerfallskonstante und die Endaktivität ermittelt. Eine derartige Messung läuft deutlich

schneller ab und kommt mit einer Messdauer von etwa der doppelten Halbwertszeit (1 Woche) aus.

Ferner wurde festgestellt, dass die direkte Strahlungsbeeinflussung des Detektors durch die Proben, im Falle von Granit als Baumaterial, relativ gering ist und daher kein allzu großer Abstand einzuhalten ist. Damit konnte die Kammer deutlich verkleinert werden, was wegen des geringeren Kammervolumens die Empfindlichkeit der Messung steigert.

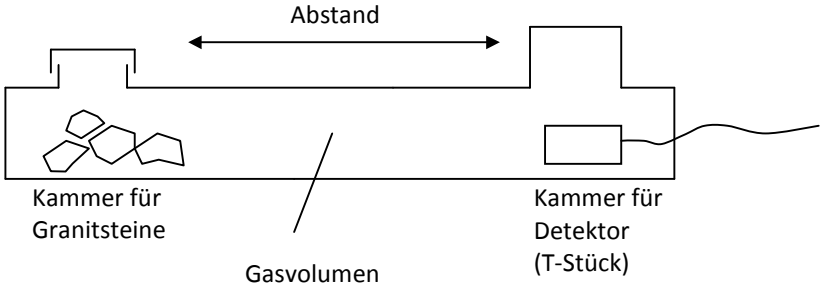

Abb. 17: Konzept für die Messkammer Typ II

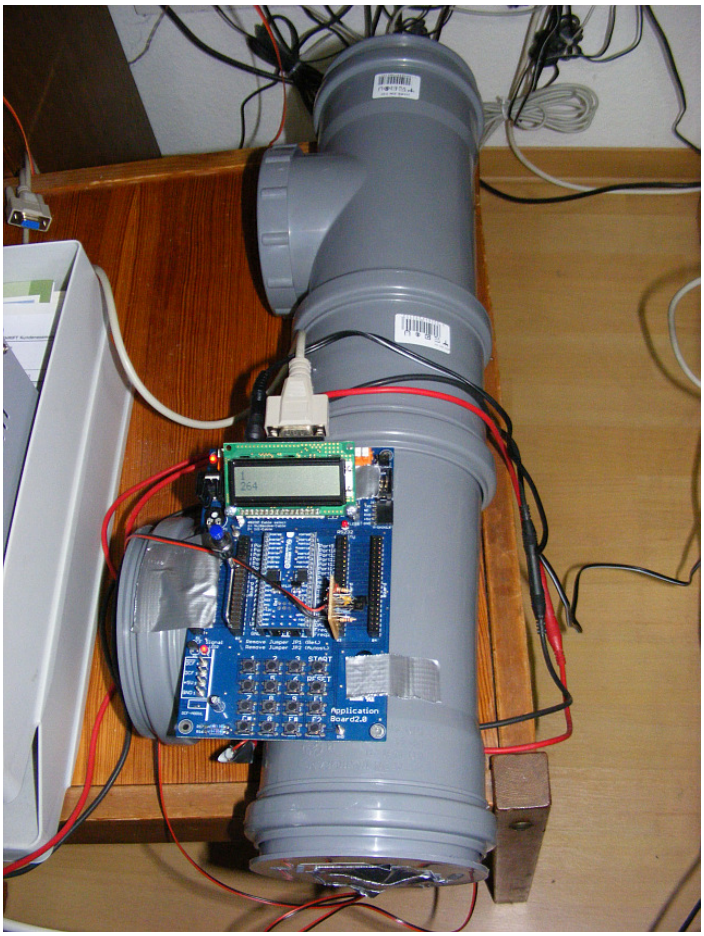

Abb. 18: Messkammer Typ II aus Marley HT Entwässerungsrohren

Auch die Messkammer vom Typ II (Volumen 5 Liter) funktionierte insbesondere bei kleinen Granitmengen mit schwacher Aktivität hervorragend.

Ergebnisse der Radon Exhalations-Messungen an Graniten von ehemaligen Bergbau-Abraumhalden im Schwarzwald

Um die erste Kammer in Betrieb zu nehmen, wurde gezielt nach Graniten gesucht, die mit Sicherheit einen gewissen Urangehalt haben. Dazu wurde speziell an alten Abraumhalden in der Nähe ehemaliger Bergbaugruben im Schwarzwald gesucht. Im Schwarzwald wurde nur in Menzenschwand nennenswert Uran abgebaut. Daher lassen sich dort auch Granitsteine mit deutlichen Uraneinlagerungen finden. Ebenso ließen sich in der Umgebung von Wittichen bei Alpirsbach Granite mit Uraneinlagerungen finden, obwohl dort vor etwa 100 Jahren hauptsächlich Erze zur Gewinnung von Glas- und Keramikfarben abgebaut wurden. Jedoch wurden später am Abraum Uraneinlagerungen gefunden.

An derartigem Granitgestein erkennt man den Urangehalt an der Fluoreszenz des Uranglimmers. Die Radioaktivität des Uranglimmers ruft bei Steinen von solchen Abraumhalden eine Ortsdosisleistung von etwa 1-5µSv/h hervor.

Abb. 19a: Granitstein aus Menzenschwand/Schwarzwald

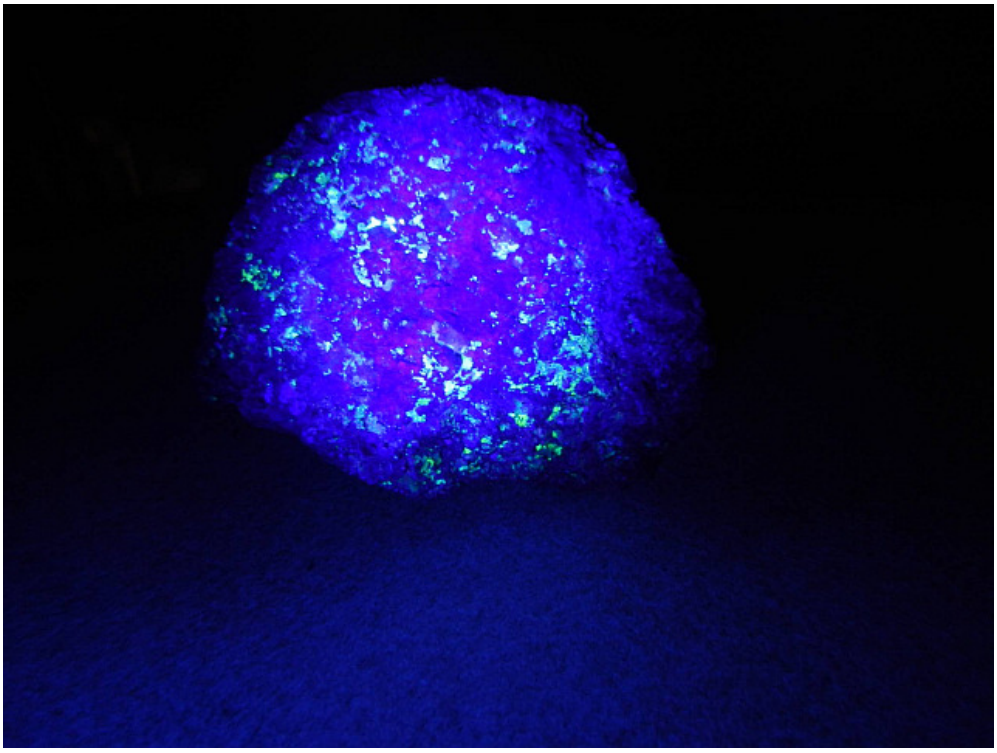

Abb. 19b: Granitstein aus Menzenschwand/Schwarzwald im UV Licht. Deutlich ist der grünlich fluoreszierende Uranglimmer erkennbar.

Das erste Messergebnis an einem einzelnen Stein mit etwa 1µSv/h Dosisleistung aus Menzenschwand war bereits beeindruckend. Einmal konnte man sehr deutlich einen exponentiellen Anstieg erkennen. Die Zeitkonstante stimmt ziemlich präzise mit der Halbwertszeit des Radons überein. Daraus lässt sich die Gültigkeit des Modells für den Aktivitätsanstieg gut zeigen. Das Modell setzt voraus, dass das Mutternuklid Radium-226 während dieses Zeitraums konstant ist und daher der Radon-Aktivitätsanstieg mit der Halbwertszeit des Radons bis zu einer Aktivität die dem Mutternuklid entspricht erfolgt:

$$A_{Rn}(t) = A_{Ra}(1 - e^{-\lambda_{Rn} t})$$

Hierin ist A_{Ra} eine die als konstant angenommene Aktivität des Mutternuklids Radium-266, $A_{Rn}(t)$ die zeitlich variable Aktivität des Radons und λ_{Rn} die Zerfallskonstante des Radons.

Nach der Entnahme des Steins nach zwei Wochen kann man einen kleinen Einbruch der Aktivität durch das Öffnen der Probenkammer erkennen, danach erfolgt der Zerfall in der dritten Woche geringfügig schneller als nach der Theorie erwartet aber mit einer Zeitkonstante, welche noch hinreichend nahe an der Radon Halbwertszeit liegt.

Die zweite Messung wurde an einem Stein aus Wittichen mit deutlich geringerer Aktivität (ca. 0.3µSv/h Dosisleistung) gemacht. Man kann einen vergleichbaren Verlauf mit einer geringeren Endaktivität und etwas größeren Schwankungen bei geringeren Zählraten erkennen.

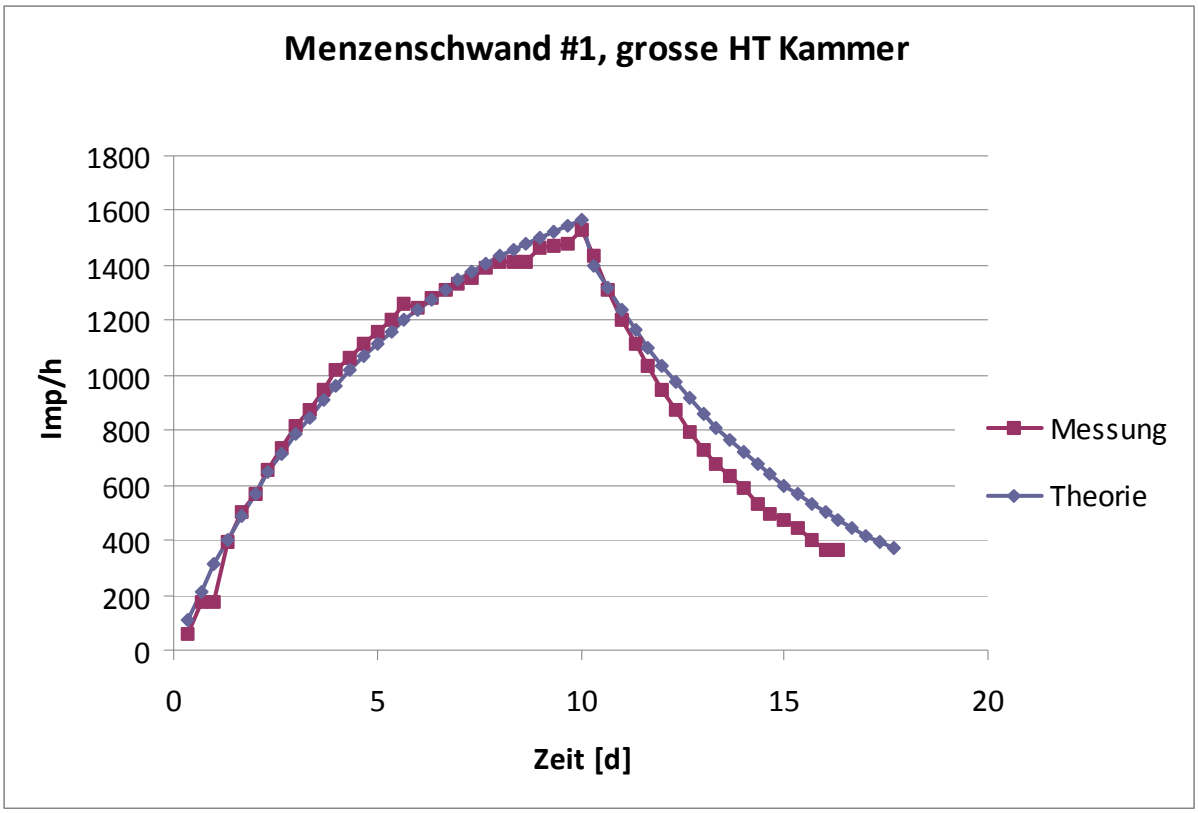

Abb. 20: Radon-Aktivitätsverlauf, stark aktiver Granitstein aus Menzenschwand als Quelle

Der Versuch, die spezifische Radon-Aktivität mit einem kalibrierten Radon Monitor vom Typ Sirad MR-106N der Firma Sinmor von Beginn an nachzumessen scheiterte zunächst, da dieser nach kürzester Zeit einen Alarm auslöste und danach in den unkalibrierten Messbereich überging. Deswegen wurde ein gewisser Zerfall abgewartet, bevor die Messung neu gestartet wurde, so dass sichergestellt war, dass die Messwerte auch glaubwürdig sind. Dem Diagramm in Abb. 22 kann man entnehmen, dass bereits durch den einzelnen schwach aktiven Stein in der Kammer Aktivitäten von deutlich über 10000 Bq/m^3 auftreten, sogar lange nachdem der Zerfall bereits eingesetzt hatte. Dieses Ergebnis war ziemlich unerwartet. Dennoch bestätigt auch der Verlauf der Zerfallsaktivität, so wie ihn der kommerzielle Radon-Monitor sieht, die prinzipielle Korrektheit der Messung und die korrekte Funktion des umgebauten Stuttgarter Geigerle zum Radon-Detektor.

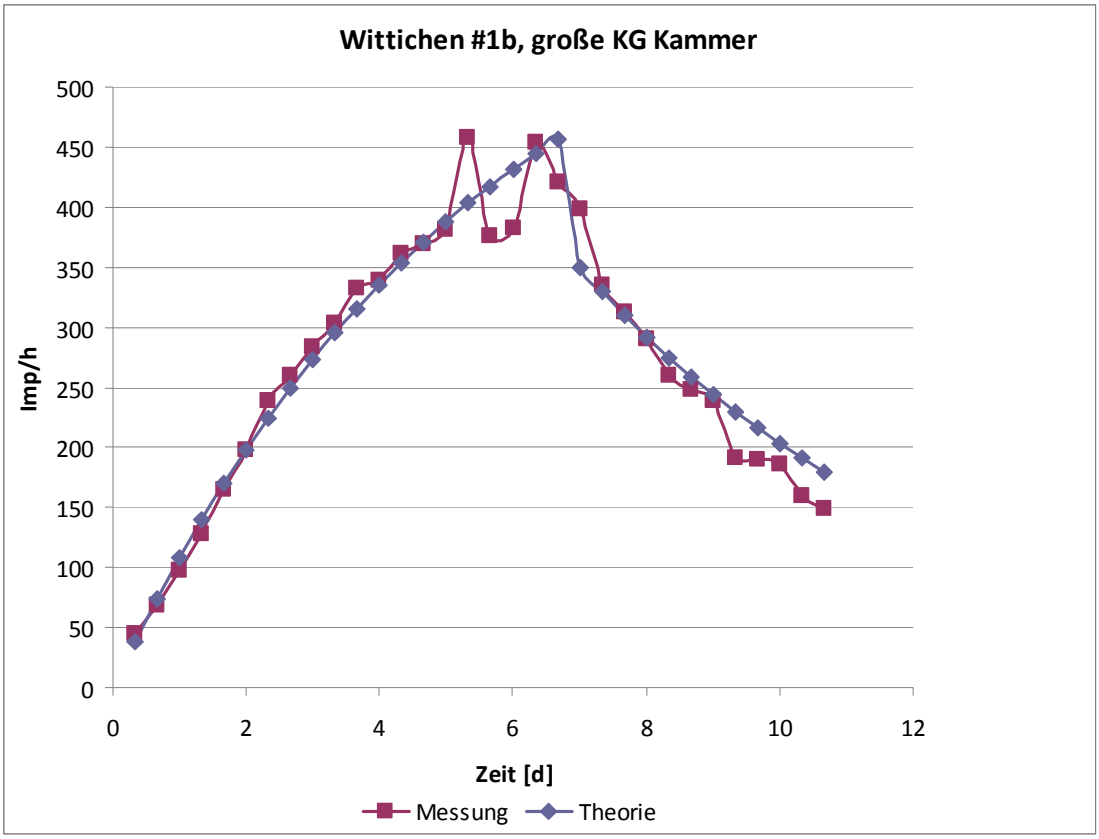

Abb. 21: Radon-Aktivitätsverlauf, schwach aktiver Granitstein aus Wittichen als Quelle

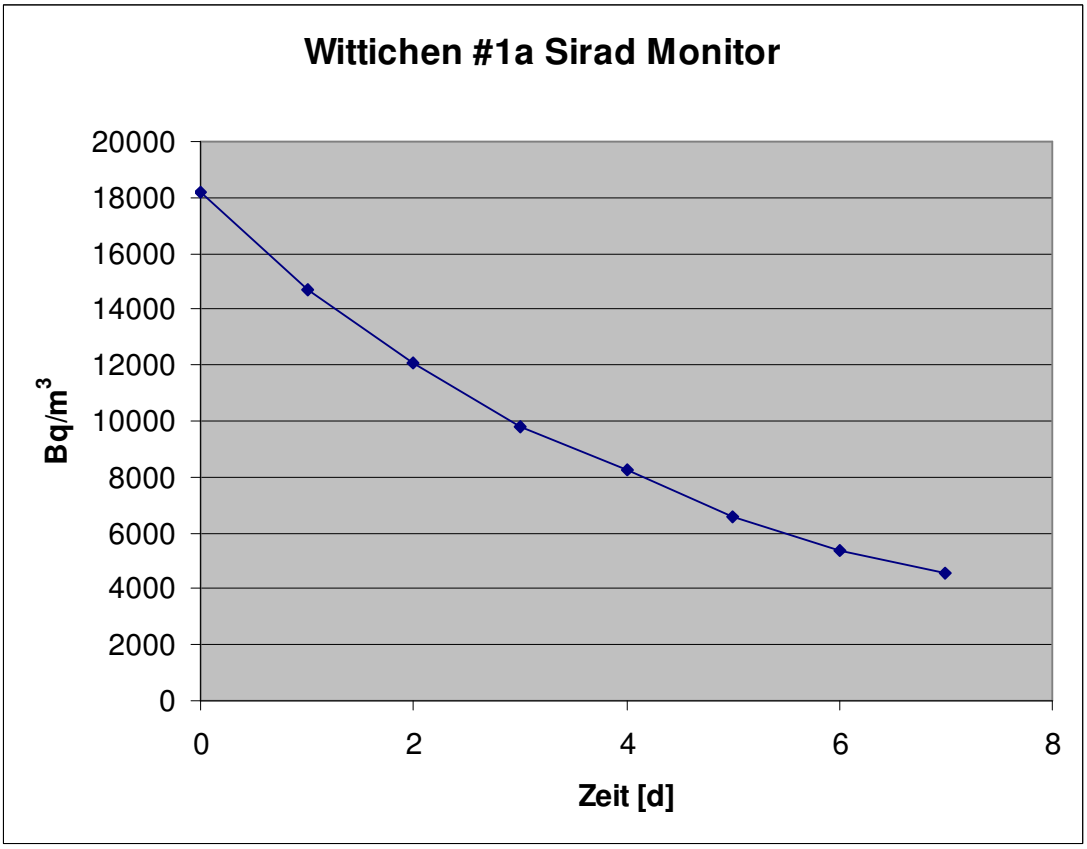

Abb. 22: Zerfallsmessung mit dem kommerziellen Radon-Monitor an einem Granitstein aus Wittichen

Messergebnisse der Radon Exhalations-Messungen an Granit-Baumaterial

Aus den Messungen an Graniten ehemaliger Abraumhalden des Bergbaus im Schwarzwald wird offensichtlich, dass die Radon-Exhalation immense Werte annehmen kann, die weit über Richtwerten liegen, welche für Wohnräume als riskant angesehen werden (200Bq/m^2). Zudem zeigt sich, dass der Nachweis mit dem „Stuttgarter Geigerle“ relativ einfach möglich ist. Daher wurde im Weiteren der Versuch unternommen mit dem umgebauten Stuttgarter Geigerle Radon Exhalations-Messungen auch an Granit durchzuführen, welcher als normales Baumaterial verkauft wird.

Für die Messungen wurde eine Bodenplatte aus Granit verwendet, deren Herkunft aber nicht mehr ganz zweifelsfrei festgestellt werden kann. Der Färbung und Textur nach (gelblich mit mittelgroßen Flussspat Einlagerungen) könnte es sich hier um gelben Flossenbürger Granit handeln.

Abb. 23: Stück einer sehr dekorativen, unpolierten Granit Bodenplatte

Da nicht klar war, welcher Kammer-Typ die besseren Ergebnisse liefern würde, wurden sowohl die kleine wie die große Kammer mit Granit beladen und in beiden Kammern gemessen. Die kleine Kammer enthielt etwa 1kg, die große etwa 1.5kg Granit-Bruchstücke. In der großen Kammer wurde zusätzlich der Sirad Radon Monitor untergebracht.

Die Messung erstreckte sich über zwei Wochen und erreicht somit mehr als 90% der theoretischen Radium Gleichgewichtsaktivität, wenn man unterstellt, dass ein vollständiges Gleichgewicht erreicht wird. Es wurde lediglich der Anstieg der Aktivitätskonzentration gemessen, da hier bereits die Zerfallskonstante des Radon nachgeprüft werden kann.

Abb. 24: Bruchstücke der Granit Bodenplatte (Gewicht ca. 1.6kg)

Die Messung mit dem Stuttgarter Geigerle lieferten in beiden Kammern sehr ähnliche Resultate. Infolge der deutlich geringeren Radon-Aktivität gegenüber dem Granit der Bergbauhalden ist allerdings der theoretischen Exponentialfunktion-Funktion ein deutliches Rauschen überlagert. Zudem muss jetzt auch die Nullrate berücksichtigt werden, die zusätzlich davon abhängig ist, welche Komparatorschwelle am Detektor eingestellt wird. Dennoch lässt sich ganz deutlich die Zerfallskonstante des Radon erkennen. Man könnte aber meinen, dass die tatsächlichen Messwerte schneller in eine Sättigung übergehen, als die Exponentialfunktion es theoretisch vorgeben würde. Als mögliche Ursache könnte die Dichtigkeit der Kammern bzw. ein Anhaften der elektrisch geladenen Zerfallsprodukte an der Kammerwand (Plate-Out) sein, was bei niedrigen Radon-Konzentrationen natürlich stärker spürbar wird.

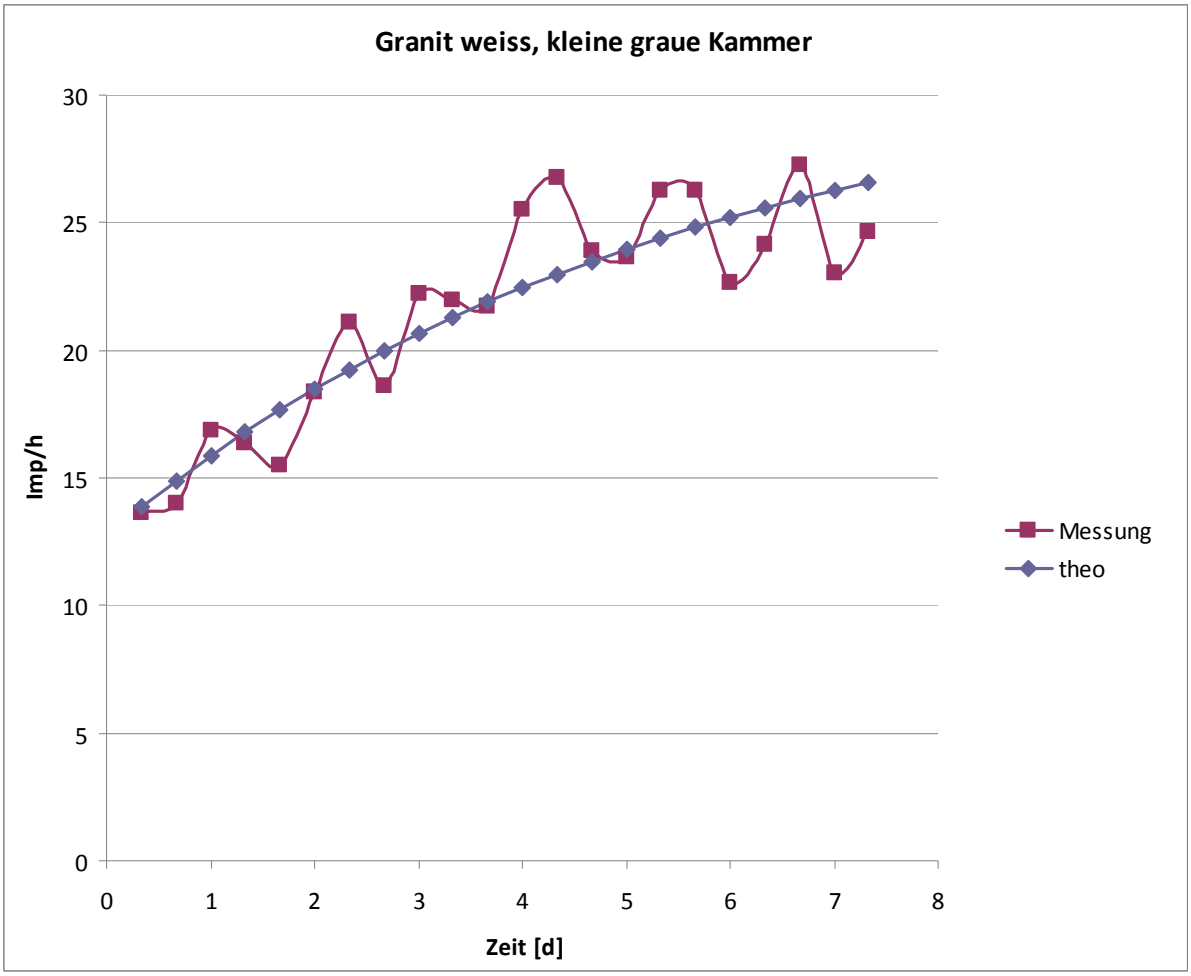

Abb. 25: Radon-Aktivitätsanstieg in der 5Liter Kammer durch 1.6kg Granit einer Bodenplatte im Vergleich zu einer Kurvenanpassung gemäß der Theorie (LMS-fit).

Dieser Eindruck verstärkt sich bei den Ergebnissen der Messung in der großen Kammer, in der zeitgleich mit dem Radon Monitor Sirad MR-106N der Firma Sinmor gemessen wurde. Allerdings arbeitet der Radon-Monitor den Herstellerangaben nach nach dem elektrostatischen Abscheideverfahren, bei dem hauptsächlich die elektrisch geladenen Zerfallsprodukte des Radons zum Ergebnis beitragen und nicht das Radon selbst. Eine derartige Unterscheidung wird mit dem PIN-Dioden Detektor des Stuttgarter Geigerle nicht gemacht. Der Radon-Monitor geht bei der Messung bereits von einem unvollständigen radioaktiven Gleichgewicht aus, was durch einen angenommenen Gleichgewichtsfaktor von nur 0.5 zwischen dem Radon und seinen Zerfallsprodukten ausgedrückt wird. Das Gerät zeigt daher die äquivalente Gleichgewichtsaktivität für das Radon pro Volumeneinheit an (equivalent equilibrium volume activity, EEVA) und nicht die Radonaktivität selbst. Die entsprechende Messkurve des Radon-Monitors zeigt eine Sättigung, die früher eintritt als es ein exponentieller Zusammenhang erwarten ließe.

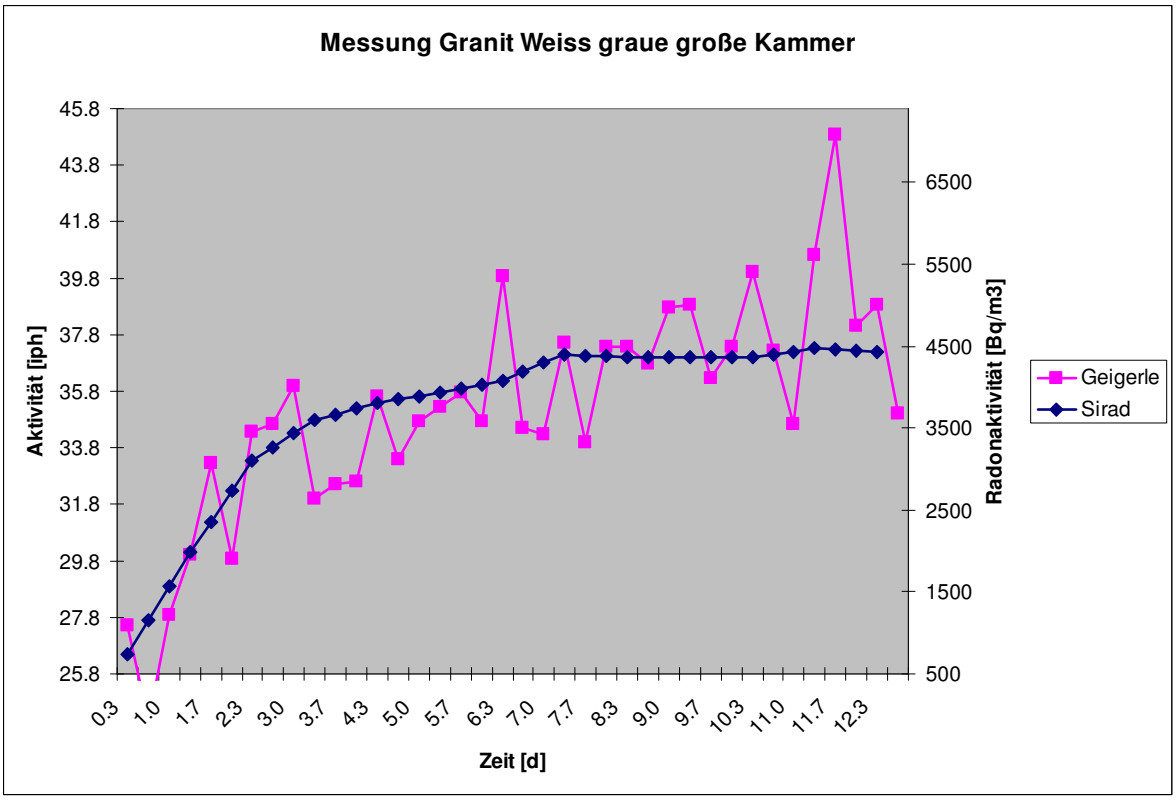

Abb. 26: Radon-Aktivitätsanstieg in der 15Liter Kammer durch 2.3kg Granit einer Bodenplatte im Vergleich zur Messung mit einem kommerziellen Radon-Monitor

Diese parallele Messung der Radon-äquivalenten Gleichgewichtsaktivität läßt nun aber einen Rückschluß auf die Empfindlichkeit des Stuttgarter Geigerle als Radon-Detektor zu. In der großen Kammer lag die Komparatorschwelle auf etwa 150mV und führte zu einer Nullrate von 25.9iph. Aus dem Aktivitätsanstieg wurde mit Hilfe einer Kurvenanpassung (LMS-fit) eine zusätzliche Radonaktivität von 14.8iph ermittelt. Bezieht man nun die Radonaktivität auf das Kammervolumen und das Granitgewicht (die Granit-Oberfläche wäre sinnvoller, ist aber schwerer zu bestimmen), ergibt sich daraus eine spezifische Radonaktivität von 96iph*Liter Kammervolumen/kg Granit. Mit dem Radon-Monitor wurde nach Eintreten der Sättigung eine Aktivität von 4430Bq/m^3 gemessen. Dem entsprechen 9245 Bq/m^3*Liter Kammervolumen/kg Granit. Durch Vergleich kann man also grob sagen, dass 1 iph des Geigerle etwa 100Bq/m^3 an Radonaktivität entsprechen. Aus dem Rauschen der Messkurve des Geigerle kann man allerding erkennen, dass mindestens etwa 500Bq/m^3 an Radonaktivität vorliegen muss, damit sich der Aktivitätsanstieg aus dem Rauschen abhebt.

In der kleinen Kammer wurde Komparatorschwelle des Detektors auf etwa 250mV gelegt, mit dem Hintergedanken niederenergetischen Gamma-Quanten stärker auszublenden. Das führte zu einer niederen Nullrate von 12.8iph. Die Kammer mit 5Liter Volumen wurde mit etwa 1.3kg Granit der Bodenplatte beladen. Aus dem Aktivitätsanstieg wurde mit Hilfe einer Kurvenanpassung eine zusätzliche Radonaktivität von 18.8iph ermittelt. Bezieht man diese Radonaktivität auf das Kammervolumen und das Granitgewicht ergibt sich daraus eine spezifische Radonaktivität von 40iph*Liter Kammervolumen/kg Granit. Der Verlauf der Kurve ist jedoch nur wenig rauschärmer, so dass die niedere Nullrate nicht als allzugroßer Vorteil gewertet werden kann.

Ebenfalls in der kleinen 5 Literkammer wurden 2kg Bruchstücke einer Bodenfliese aus dem Baumarkt gemessen. Die gemessene Gamma-Ortsdosisleistung an der Oberfläche war leicht erhöht gegenüber den Normalwerten der Umgebung (Faktor 2). An diesem Beispiel kann man sehen, dass es auch Baustoffe gibt, deren natürliche Gammastrahlung vorwiegend auf dem Kalium beruht und die so gut wie kein Radon freisetzen. Die Messwerte zeigen lediglich die Nullrate, die man auch mit leerer Kammer messen kann.

Abb. 26: Stein-Bodenfliese aus dem Baumarkt

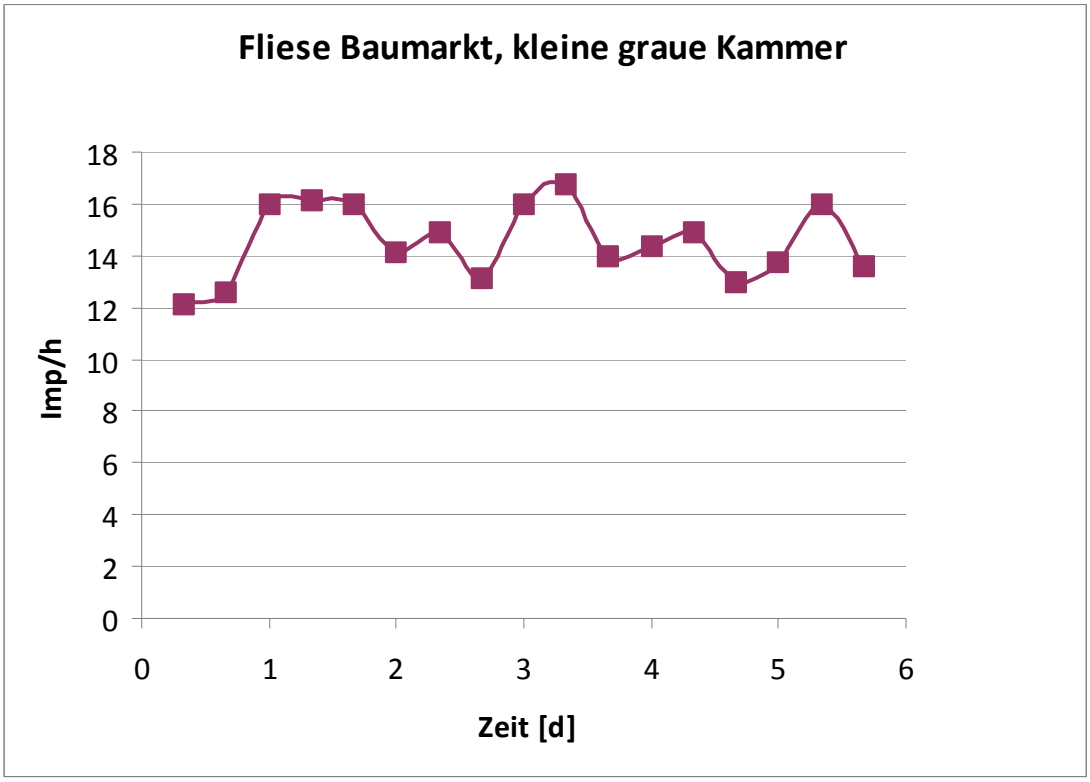

Abb. 27: Messergebnis von der Bodenfliese aus dem Baumarkt

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann man sagen, dass bereits kleine Mengen Granit, wenn sie Spuren von Uran enthalten erhebliche Mengen Radon freisetzen (exhalieren) können. Die messbaren Radonaktivitäten erreichen bei Graniten von Abraumhalden des ehemaligen Bergbaus im Schwarzwald sehr hohe Werte. Die Radonaktivitäten sind aber auch noch bemerkenswert hoch, selbst wenn der Granit regulär als Baumaterial verkauft wird, sofern er aus Gegenden stammt, in denen der Urangehalt des Gesteins geologisch bedingt relativ hoch ist.

Es zeigt sich auch, dass die Radonaktivitäten an entsprechendem Granit-Baumaterial mit dem Stuttgarter Geigerle mit relativ geringem Aufwand und geringen Kosten eindeutig nachgewiesen werden können. Das exahlierte Radon kann dann an einer sehr kleinen Menge Granit gut detektiert werden, wenn auch das Luftvolumen entsprechen klein gemacht wird und ein gewisser Abstand zum Detektor eingehalten wird.

Ein ebenfalls wichtiges Ergebnis ist, dass bereits der Konzentrationsanstieg mit der Radonhalbwertszeit abläuft und daher eine Messkammer nicht unbedingt so konzipiert werden muss, dass man die Probe mit möglichst wenig Gasverlust entnehmen können muss und zuerst den Konzentrationsanstieg abwarten muss bevor man die Zerfallskonstante bestimmt.

Ein Vergleich mit einem kommerziellen Radonmonitor zeigt, dass man Aktivitäten, die über den Radon-Richtwerten für Wohnräume liegen, ohne Weiteres detektieren kann. Als Basis für Entscheidungen, welche die Gesundheit betreffen oder hohe Sanierungskosten erzeugen, dürfen aus solchen Messungen mit dem Stuttgarter Geigerle aber nicht getroffen werden. Eine entsprechende Analyse und Beratung durch einen professionellen Spezialisten ist in derartigen Fällen immer dringend anzuraten.

Literatur

/1/ Radioaktivität in Baustoffen - Neue Anforderungen an Planer
Gellermann, Rainer; Schulz, Hartmut;
Artikel aus der Zeitschrift: Beratende Ingenieure, Jg.: 34, Nr.9, 2004, Seite 26-31
http://www.baufachinformation.de/zeitschriftenartikel.jsp?z=2004099009505

/2/ Kate Murphy
What's Lurking in Your Countertop?
The New York Times, July 24, 2008
http://www.nytimes.com/2008/07/24/garden/24granite.html?pagewanted=all&_r=0

/3/ H. von Philipsborn, R. Geipel, G. Just
Radon Exhalation aus Baustoffen - ein Beitrag zur Metrologie im Strahlenschutz
Vortrag am 12. Statusgespräch des BMU Forschung zum Problemkreis Radon
http://radioaktivitaet-zum-anfassen.com/app/download/5778805643/Radon-Exhalation-aus-Baustoffen.pdf

/4/ S. Fares, A. Ashour, M. El-Ashry and M. Abd El-Rahma
Gamma Radiation Hazards and Risks Associated with Wastes from Granite Rock Cutting and Polishing Industries in Egypt
http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Yarb/2012_1/1_53_13.pdf

/5/ Joachim Kemski, Ralf Klingel
Die terrestrische Strahlung durch natürlich radioaktive Elemente in Gesteine und Böden
http://www.kemski-bonn.de/downloads/TerrStr.pdf

/6/ Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs (Bericht I)
BMU – 2007 - 697
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs697_01.pdf

/7/ Radiation protection 112
Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials
European Commission
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/112.pdf

/8/ WHO Handbook on Indoor Radon
whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf

/9/ Sources and Effects of Ionizing Radiation
UNSCEAR 2000 Report Vol. I
http://www.unscear.org/docs/reports/gareport.pdf

/10/ Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon (90/143/Euratom)
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/legislation/90143_en.pdf

Ein Teil der Forschungsarbeiten und Messungen wurde im Rahmen des Regionalwettbewerbs “Jugend Forscht” am Jugendforschungszentrum Schwarzwald-Schönbuch e. V. in Nagold (JFZ) durchgeführt. In diesem Rahmen entstand der Bericht:
/11/ Jasha Grüner, Johannes Vitzthum
Bestimmung der Radonentwicklung aus den Graniten im Schwarzwald
Jugendforschungszentrum Nagold, 12. Januar 2013

Anhang

Quellcode für Messwerteerfassung mit dem C-Control Mikrocontroller

```
'//////////////////////////////////////
'
'  Basic++
'  Controller:    C-Control I Unit M2.0
'                 Station2
'  Beschreibung:    Zählt Geigerle Impulse innerhalb eines vorgegebenen
'                   Zeitintervalls und schreibt sie ins EEPROM. Dazu muss
'                   Port 1 auf GND liegen.
'                   Das Zeitintervall ergibt sich aus dem Wert von INTERVAL
'                   multipliziert mit der verwendeten Zeiteinheit der Uhr
'                   (SECOND, MINUTE, HOUR, ...)  .
'                   ACHTUNG Es muss genug Impulse
'                   in INTERVAL Zeiteinheiten geben, sonst ungenau
'                   Ist Port 1 Open, werden die Werte aus dem EEPROM
'                   ausgelesen
'                   und auf die RS232 Schnittstelle ausgegeben
'
'//////////////////////////////////////

OPTION CC2.0
DEFINE ZAHL AS WORD                     'Zahl der Impulse
DEFINE CMP AS BYTE                      'Zeitvergleichswert
DEFINE LAST AS BYTE                     'letzter Zeitwert
DEFINE INTERVAL AS BYTE                 'Zeitintervall
DEFINE FCNT AS WORD                     'Anzahl der Speichereinträge
DEFINE SCHALTER1 PORT[1]                'Taster für Moduswahl
CONFIG.INIT
CONFIG.PUT 00001000b                    'Setze Pullups im Config Register
CONFIG.OFF

IF (SCHALTER1 = OFF) THEN               'entscheiden ob auslesen oder
                                        'schreiben
                                        'Port 1 = Gnd: Schreiben
   OPEN FOR WRITE                       'Filepointer zurücksetzen
   CLOSE
   LCD.INIT                             'LCD initialisieren
   LCD.CLEAR
   LCD.PRINT "WAIT..."                  'Warten solange noch kein Messwert
   HOUR = 0                             'Uhr initialisieren
   LAST = 0
   INTERVAL = 8                 'Fileeintrag alle INTERVAL Zeiteinheiten;
                                'Zeiteinheit: HOUR...
   ZAHL = 0                     'Zaehler für Impulse
   FCNT = 0                     'Zaehler für Speichereinträge
   INTERRUPT IMPULS             'Warte auf Interrupts
   DO                           'Endlosschleife, warten auf IRQ
   LOOP

ELSE
     PRINT "xxx"                'Übertragungsbeginn
     PRINT "START"
     PAUSE 50                   'Zur Sicherheit etwas warten
     OPEN FOR READ              'Lese Speicher aus
     LCD.OFF                    'Ausgabe ins Terminal Window
     DO                         'Schleife über Messwerte
       FINPUT ZAHL              'Messwert lesen
       PRINT ZAHL               'ins Terminal Window schreiben
```

```
     LOOP UNTIL EOF = TRUE    'bis Speicherende erreicht
     BEEP 20,20,1             'Ende der Übertragung
END IF
END


#IMPULS                       'Die Interrupt Routine
BEEP 10,3,1                   'kurzer Ton bei Zählimpuls
CMP = HOUR/INTERVAL           'Ganzahldivision ohne Rest
ZAHL = ZAHL + 1               'Impulszähler inkrementieren
IF CMP <> LAST THEN           'Wenn Zeitintervallende
   FCNT = FCNT + 1            'dann Speicherindex hochzählen
   IF FILEFREE > 5 THEN       'und schreiben wenn noch Platz
      OPEN FOR APPEND         'Speicher zum Anhängen öffnen
      FPRINT ZAHL             'Messwert schreiben
      CLOSE
      LCD.CLEAR               'neue Anzeige
      LCD.POS 1,1             'erste Zeile
      LCD.PRINT FCNT          'Speicherindex ausgeben
      LCD.POS 2,1             'zweite Zeile
      LCD.PRINT ZAHL          'Messwert ausgeben
      ZAHL = 0                'Impulszähler zurücksetzen
      LAST = CMP              'merke letzten Zeitvergleichswert
   ELSE
       LCD.CLEAR
       LCD.PRINT "Overflow"   'Fehlermeldung wenn kein Speicher frei
   END IF
END IF
RETURN INTERRUPT
```