Das Szinti-Geigerle – Ein ohne Hochspannung betriebener, für Gammastrahlung empfindlicher PIN-Dioden Detektor mit aufgesetztem Szintillator-Kristall

Bernd Laquai, 30.12.15

Auch wenn der klassische PIN-Dioden Zähler den großen Vorteil hat, relativ einfach aufgebaut sein und ausschließlich mit Niederspannung betrieben zu werden, so hat er doch zwei deutliche Nachteile: die geringe Zählrate und die schlechte Gamma-Empfindlichkeit. Die geringe Zählrate rührt daher, dass die Größe der aktiven Fläche (eine BPW34 Diode hat beispielsweise nur 7.5mm^2) relativ klein im Gegensatz zur Zylinderfläche eines Geiger-Müller Zählrohrs ist. Die schlechte Gamma-Empfindlichkeit hat ihre Ursache darin, dass eine PIN-Diode ein flächiger Detektor ist, dessen aktive Schicht nur wenige 100 um dick ist. Gammaquanten haben eine geringe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit Materie und sind nur locker ionisierend, daher fliegen die meisten Quanten durch die dünne aktive Schicht einfach hindurch ohne Ladungsträger zu generieren. Daher sind PIN-Dioden im transparenten Plastikgehäuse wie z.B. die BPW34 eigentlich nur für Betastrahlung wirklich empfindlich.

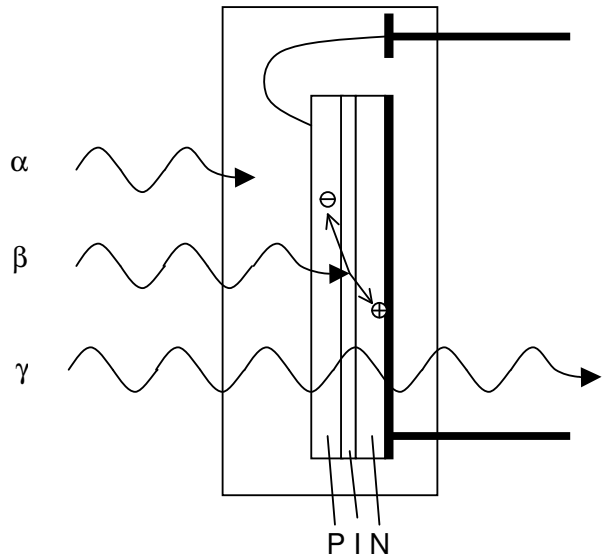

Abb. 1: Wechselwirkung der unterschiedlichen Strahlenquanten in einer PIN-Diode mit Plastikgehäuse (schematisch): Die Alpha-Strahlung wird bereits im transparenten Plastikgehäuse vollständig absorbiert, die Beta-Strahlung erreicht die aktive (I)-Zone und kann Ladungsträger generieren, die Gamma-Strahlung wird ohne Wechselwirkung transmittiert

Will man dagegen einen Zähler mit hoher Empfindlichkeit für Gamma-Strahlung bei einer gleichzeitig hohen Zählrate bauen, dann empfiehlt sich vom Prinzip her ein Szintillationszähler. Er verwendet einen Szintillator-Kristall, der von den Gammaquanten zur Fluoreszenz im UV oder im blauen sichtbaren Bereich des Lichts angeregt wird. Dabei wird im Gegensatz zur PIN-Diode und zum Geiger-Müller Zählrohr keine dünne Oberfläche zur Detektion verwendet, sondern das ganze Volumen des Kristalls. Im

Volumen habe die Gammaquanten dann genug Weglänge um über Einfach- oder Mehrfachstöße in Wechselwirkung mit der Materie zu gehen und all ihre Energie zur Umwandlung abzugeben. Die erzeugten niederenergetischen Photonen kann man dann an der Photokathode eines Photomultipliers (Photo Multiplier Tube, PMT) in Elektronen umwandeln und diese über eine mehrfache Sekundärelektronenemission massiv verstärken. Das Dumme an diesem Konzept ist aber, dass ein Photomultiplier eine recht voluminöse und empfindliche Röhre ist, die zur Versorgung mindestens 1000V Hochspannung benötigt.

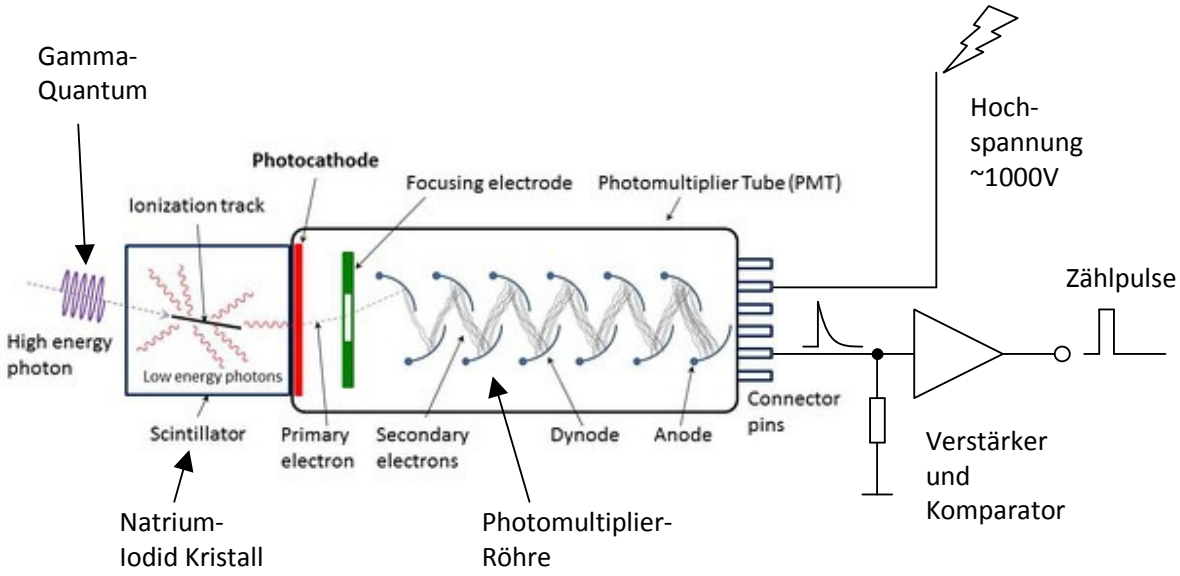

Abb. 2: Prinzip eines Szintilationszählers mit NaI-Szintillationskristall und Photomultiplierröhre (Quelle: Wikipedia, modifizierte Zeichnung)

Das Konzept des Szintillationszählers ist schon relativ alt und hatte immer schon den Vorteil, dass die Verstärkung durch eine Sekundärelektronenemmission sehr rauscharm und relativ sicher gegen elektrische Störsignale ist und daher auch sehr hoch sein kann. Die Halbleitertechnologie hat allerdings durch die irrwitzige Miniaturisierung kräftig gegenüber der Röhrentechnologie aufgeholt und so ist es heute möglich, vergleichbare Halbleiter-Verstärker zu bauen, die dem PMT Paroli bieten können. Außerdem gelang es, PIN-Dioden und Szintillationskristalle zu einem Detektor zu vereinen und so aufeinander abzustimmen, dass die Wellenlänge des bei der Szintillation angeregten Lichts zur spektralen Empfindlichkeit einer großflächigen Photodiode passt, die auf einen Szintillator-Kristall aufgesetzt werden kann. So ist die First Sensor AG in Berlin ein deutsches Unternehmen, das solche Detektoren anbietet. Sie bestehen beispielsweise aus einem 8mm dicken Cäsium-Iodid (CsI) Kristall der auf eine 10x10mm PIN Detektor aufgesetzt ist (Bezeichnung: X100-7 THD Order Nummer 50147701).

Abb. 3: PIN-Diode X100-7 THD von First Sensor mit aufgesetztem Cäsium-Iodid Szintillationskristall

Angegeben wird die Zählrate eines solchen Detektor-Assemblies mit bis zu 1200 (cpm / uSv/h). Der Detektor zeichnet sich zudem durch eine kleine Kapazität und einen geringen Dunkelstrom aus. Außerdem ist der Kristall bereits mit einer relativ idealen optischen Kopplung auf den Diodenchip aufgesetzt und zusätzlich mit einer Schirmung gegen Umgebungslicht versehen. Der CsI Kristall zeigt eine brauchbare Gamma-Empfindlichkeit bis über 1000keV (noch etwa 10% Absorption bei 1000keV) und deckt damit den interessanten Energiebereich natürlicher und technischer Radionuklide fast vollständig ab. Die Herausforderung bei der Verwendung eines solchen PIN-Detektors mit aufgesetztem CsI-Kristall besteht allerdings in der Konstruktion eines rauscharmen Ladungsverstärkers mit hoher Verstärkung, der auf die deutlich kleineren Impulse der vom Kristall emittierten niederenergetischen Photonen noch ausreichend empfindlich ist. Der klare Vorteil eines solchen Konzepts ist, dass ein mit Niederspannung (12V) betriebener, Gamma-empfindlicher Zähler gebaut werden kann, der bei einer vergleichbaren Zählrate zu einem typischen Geiger-Müller Zählrohr doch deutlich kleiner realisierbar ist.

Das Szinti-Geigerle nutzt nun genau dieses Konzept unter Verwendung des oben genannten Detektor-Assemblies von First Sensor. Allerdings lässt sich dieses Konzept nicht mehr in einfacher Durchsteckmontage aufbauen. Vielmehr müssen die Vorteile der kleinen Baugröße von SMD Bauteilen genutzt werden um eine bestmögliche Störunempfindlichkeit gegen Einstreuung von außen bzw. gegenüber internen, parasitären Rückkopplungen zu erreichen. Da die Verstärkung gegenüber dem normalen Geigerle noch einmal massiv gesteigert werden muss, ist die Schirmung gegen EMV für den störungsfreien Betrieb absolut entscheidend.

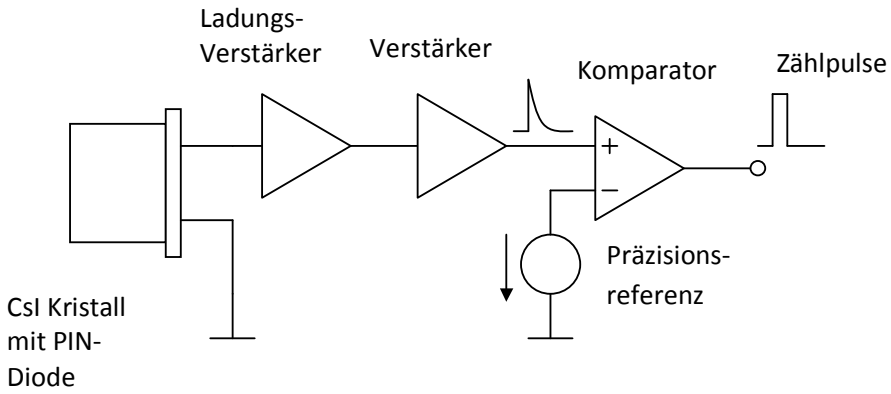

Abb. 4: Das Prinzip des Szinti-Geigerle

Als Ladungsverstärker wurde der für die Spektroskopie-Versuche bereits entwickelte Typ auf der Basis des Low-Noise Amplifiers LT1028 von Linear Technology verwendet/1/. Hinzugefügt wurde nun der sehr empfindliche und hochpräzise Komparator LTC1440, ebenfalls von Linear Technologies, der zudem sehr wenig Power Ground Noise beim Schalten erzeugt. Er verfügt über eine interne Band-Gap Spannungsreferenz, die dazu benutzt wurde, sehr kleine Schaltschwellen präzise zu implementieren.

Der erste Prototyp wurde auf einer 2-lagigen Platine implementiert. Die Platine mit einer Größe von 5.5x 4.4 cm wurde mit dem Open-Source CAD System KiCAD entworfen und bei der Firma wedirekt.de in Fertigung gegeben. Sie ist mit Anschlüssen für zwei Stiftleisten versehen und dafür vorbereitet als Piggy-Back Platine auf ein Arduino Shield aufgesetzt zu werden, das auch ein LCD Display treiben kann. Für die Prototypen-Versuche wurde das Szinti-Geigerle Detektor-Modul allerdings in einem separatem Gehäuse über eine Kabel-Verbindung an einem Arduino basierten Auswertemodul mit LCD Display betrieben.

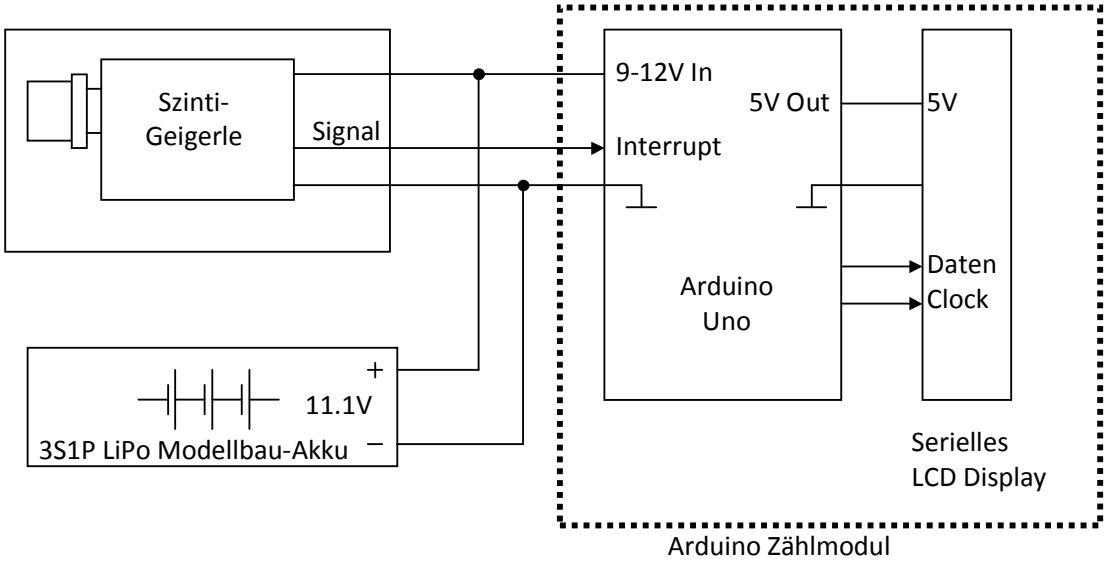

Abb. 5: Kombination des Szinti-Geigerle Detektormoduls mit einem Arduino-Zählmodul

Der Schaltplan zeigt den bereits bekannten Ladungsverstärker mit den zwei Verstärker-Stufen auf Basis des LT1028. Das Ausgangssignal wird kapazitiv (zur Abtrennung von DC-Offset Anteilen) auf die Komparator-Stufe mit dem LTC1440 gekoppelt. Die Komparatorstufe liefert am Ausgang Zählpulse mit 5V Pegel (low aktiv) und 500Ohm Innenwiderstand, die direkt auf den Interrupteingang eines Mikrocontrollers (e.g. Arduino) geführt werden können. Versorgt werden Ladungsverstärker und Komparator von einem einstellbaren Low-Dropout Spannungsregler LT3080 (ebenfalls Linear Technologies). Die Spannungsversorgung ist über den Set-Widerstand von 1Mohm auf 10V eingestellt, so dass auch ein Lipo-Akku mit 3Zellen als Spannungsversorgung (11.1V) dienen kann.

Die Komparatorschaltung verwendet die interne Spannungsreferenz von 1.182V am negativen Eingang des Komparators als Vergleichswert. Der Pegel des positiven Eingangs wird mit Hilfe der Schottkydiode BAT54A, die bei dem kleinen Stom eine Schleusenspannung von rund 100mV hat und einem Spannungsteiler mit Trimmpoti auf einen DC-Wert von wenigen 10mV über der Spannungsreferenz eingestellt und auf den positiven Eingang geführt. Damit reagiert der Komparator bereits auf sehr kleine Pulse des Ladungsverstärkers.

Die Platine ist mit Footprints für zwei SMA-Buchsen, die dem Debugging dienen, ausgestattet. Über Bestückungsoptionen für 0Ohm Widerstände kann sowohl der Ausgang des Ladungsverstärkers wie auch der Komparatorausgang auf den SMA Verbinder gelegt werden und mit einem Oszilloskop beobachtet werden. Der Eingang kann entweder über einen 1pF zur Ladungsinjektion auf den Ladungsverstärker wie zur Einspeisung eines DC Pegels auf den Komparatoreingang gelegt werden.

Sowohl die Schaltplan-Eingabe wie auch das Layout wurde mit dem Freeware Platinen-CAD Programm KiCAD gemacht. Die doch überschaubare Verdrahtung konnte mit 2 Lagen erreicht werden, wobei die Rückseite dominant als Massefläche ausgelegt wurde und nur an unkritischen Stellen zur Unterkreuzung für Signale verwendet wurde. Die Leiterbahnen wurden mit 0.4mm Breite gezeichnet und die Vias mit 0.6/0.3mm Durchmesser. Im Bereich des Schaltungseingangs des Ladungsverstärkers wurden Guard-Ringe mit Leiterbahnen verlegt um Leckströme auf der Platinen-Oberfläche zu reduzieren. Man muss sich dabei klarmachen, dass der Ladungsverstärker mit 100Mohm im Rückkopplungspfad eine DC-Verstärkung von 10^8 hat (140dB). Ein DC-Strom von 10nA generiert also bereits ein Ausgangssignal von 1V. Deswegen muss auch die zur Stromintegration vorgesehene Kapazität sehr klein ausfallen (2x1pF in Serie = 0.5pF).

Die Simulation der kompletten Schaltung ist relativ einfach möglich, da alle ICs von der Firma Linear Technologies stammen. Damit sind sie auch automatisch als Macro-Modelle in der Bibliothek vorhanden. Das einzige Bauteil, für das man selbst ein Modell aufsetzen muss, ist der J-FET Transistor BF862. Ein solches Spice Model ist aber z.B. von der Firma NXP erhältlich. Es muss nur als Subcircuit in ein .lib File geschrieben werden und unter dem Pfad der LTSpice Bauteile-Bibliothek abgespeichert werden. Die PIN-Diode ist als Stromquelle mit ihrer parallel geschalteten Kapazität modelliert, die aber als spannungsunabhängig und ohne Leckstrom angenommen wird.

Die Simulation ist sicher nicht auf das uV und die ns korrekt, aber sie ist eine Möglichkeit die grundsätzliche Funktion zu verifizieren und die groben Zusammenhänge zu verstehen. Es empfiehlt sich daher schon, eine solche Simulation aufzusetzen und die Signale an den Schlüsselknoten anzuschauen. Die Simulationsdatei und das Model des J-FET Transistors ist im Downloadbereich zur Verfügung gestellt.

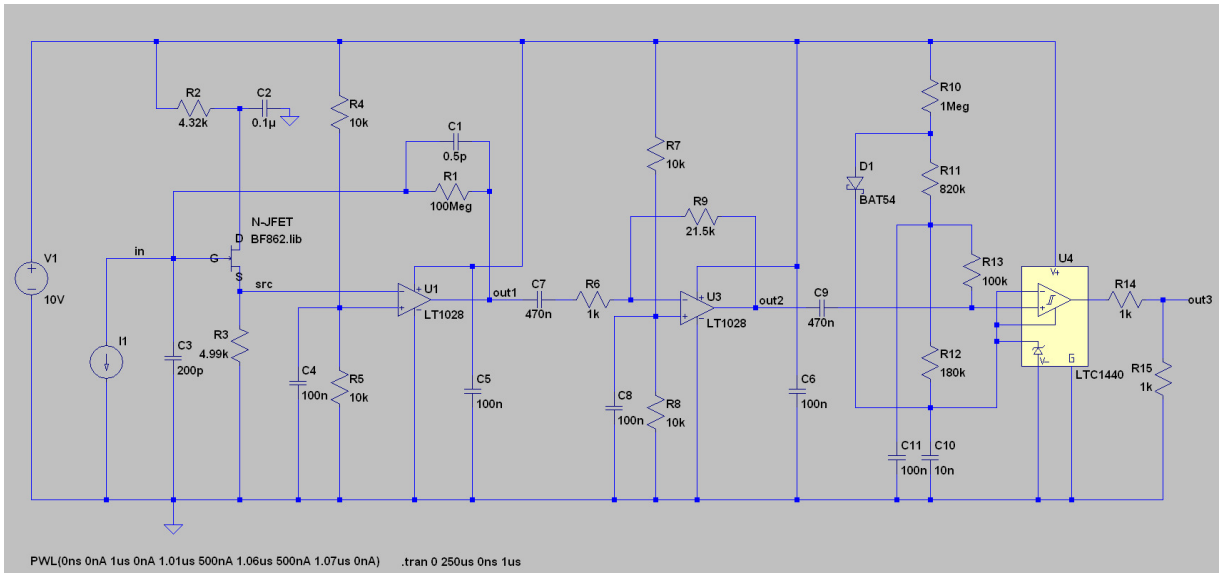

Abb. 6: Schaltplaneingabe für das Szinti-Geigerle in den LTSpice Simulator

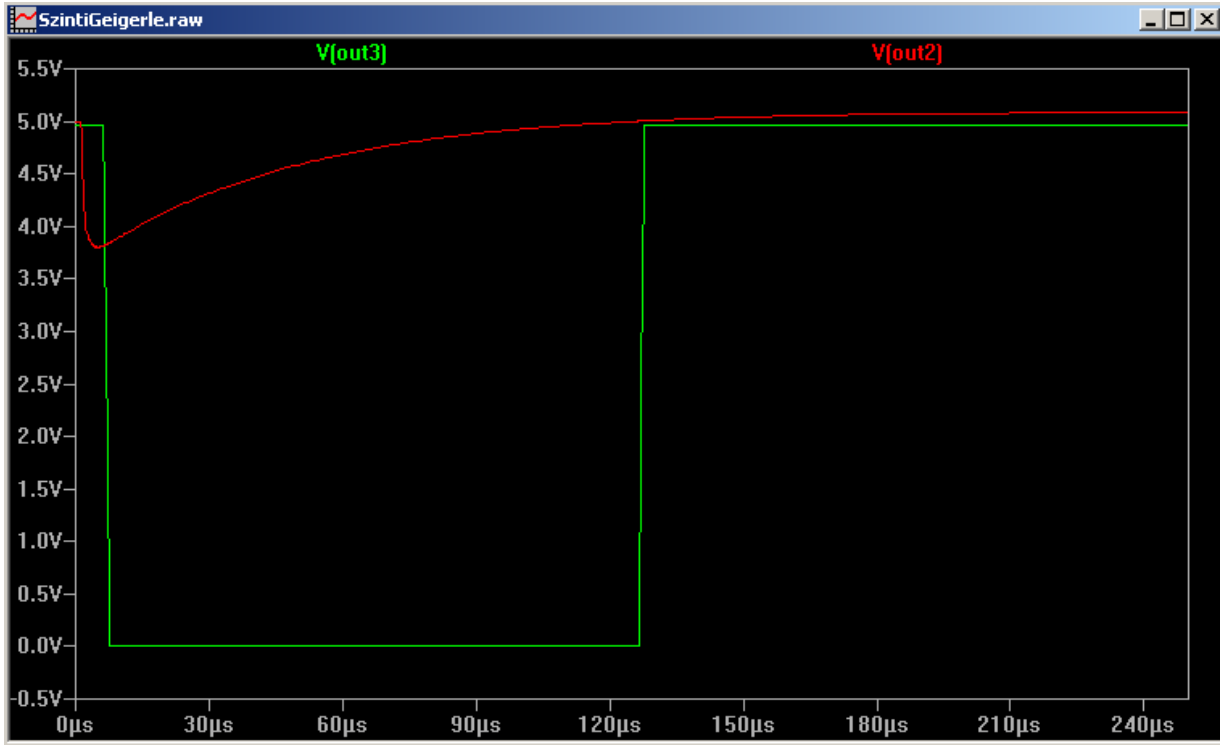

Abb. 7: Simulation des analogen Signals nach der zweiten Verstärkerstufe und am Ausgang des Komparators

Der Aufbau der Platine ist mit normalen Mitteln natürlich etwas mühsamer als eine Durchsteckmontage und muss unter einer Lupenleuchte mit einer sehr feinen Lötspitze erfolgen. Da aber als kleinste Bauteilegröße 0603 Gehäuse verwendet wurden, ist der Aufwand noch erträglich.

Die Firma wedirekt (Platinen-Online-Shop) lieferte eine wirklich sehr gute Qualität der Platine, und verarbeitete die Gerber-Daten aus dem KiCAD Platinen-Programm ohne Probleme. Sehr hilfreich zum Löten ist die Beschichtung der Kupfer-Leiterbahnen mit chemisch Nickel-Gold, damit ist jede atmosphärische Oxidation ausgeschlossen und der Flussmittel-Bedarf hält sich in Grenzen.

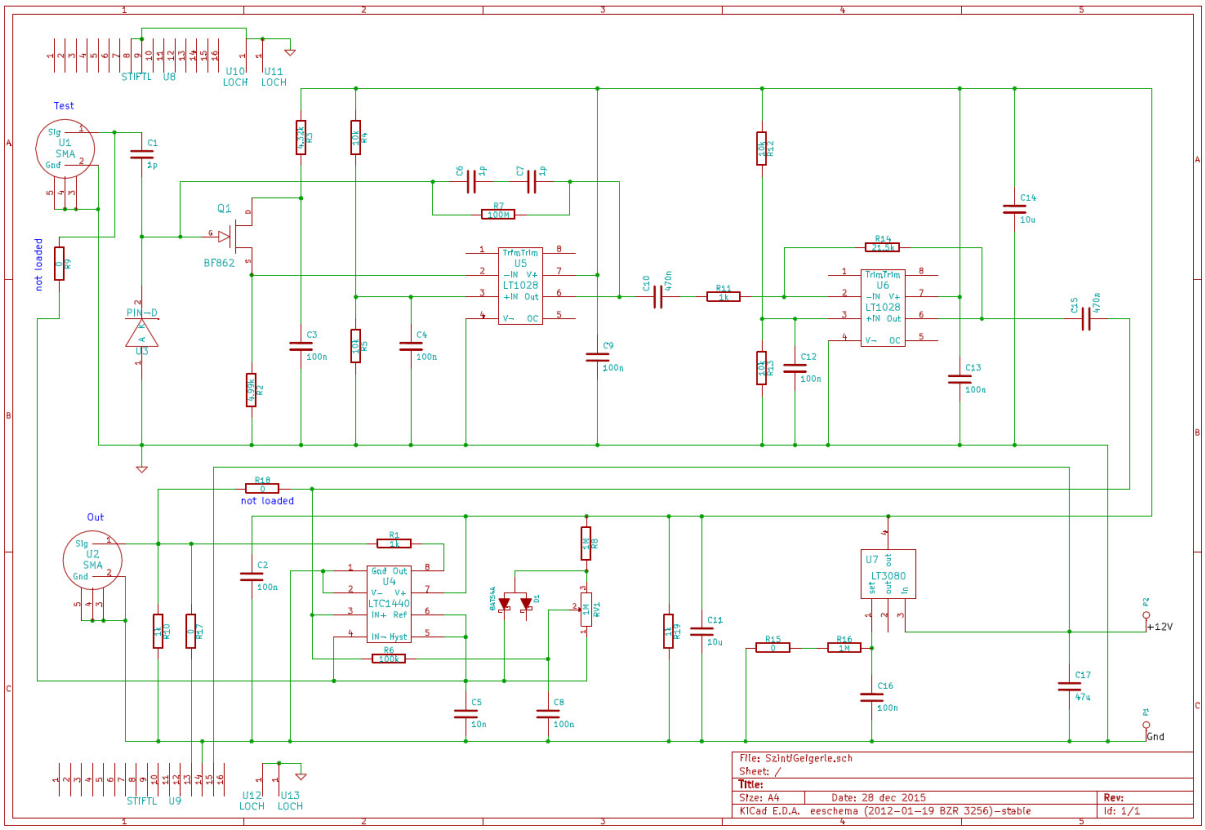

Abb. 8: Schaltplan Eingabe der Version 2 (bereits korrigierte Version) in KiCAD

In der ersten Prototypen-Version 1 zeigte sich, dass eine negative Polarität der digitalen Pulse (low aktiv) für die Stabilität der Schaltung günstiger ist als positive. Dies konnte mit 2 Fädeldrähten geändert gegenüber der ursprünglichen Planung werden. Durch diese Massnahme konnte auch die Spule zur Filterung des Power-Ground Noise vom Komparator her entfallen. Es zeigte sich dabei, dass die Induktivität im ursprünglichen Design zu einem unerwünschten Klingeln im Analogsignal bei energiereichen Quanten führt. Ausserdem wurde statt der vorgesehenen Festwiderstände zur Schwellwerteinstellung ein Trimmpotentiometer eingelötet, da so das präzise Einstellen der Schwelle in Folge der Bauteilestreuung doch etwas einfacher ist. Für die nächste Version 2 wurden dann noch einige Werte der Abblock-Kondensatoren vergrößert und die Schottkydiode mit einem SOT23 Gehäuse vorgesehen, statt mit dem bisherigen, größeren SOD323 Gehäuse.

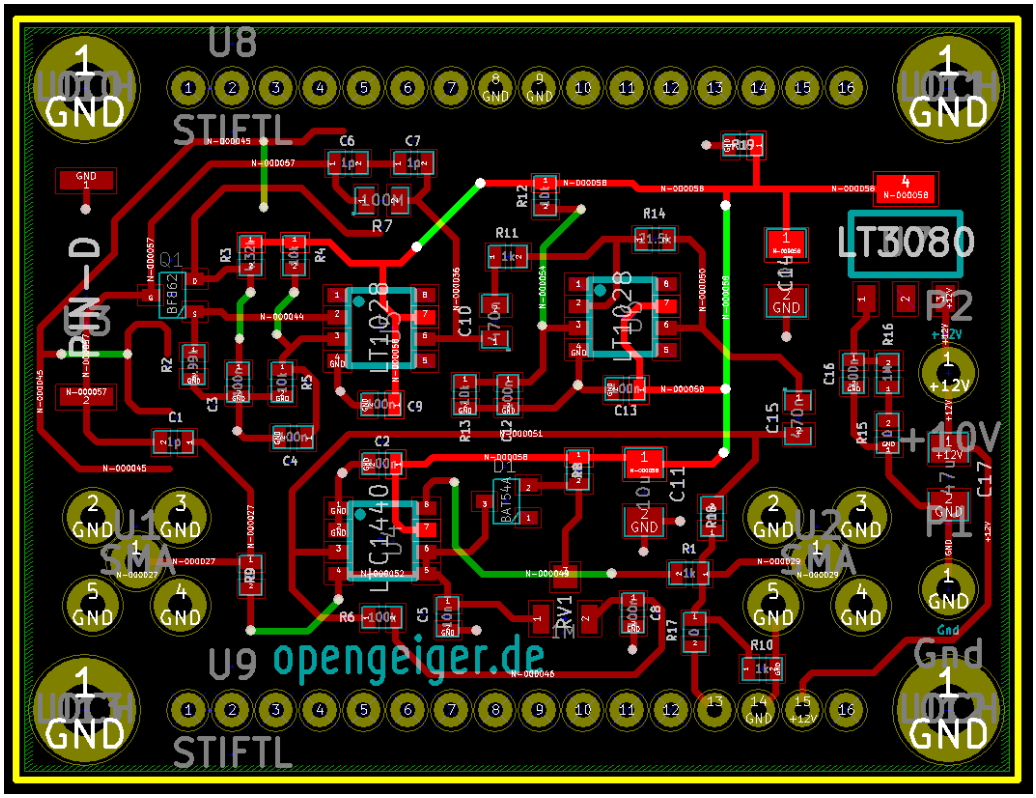

Abb. 9: Layout Version 2 (bereits korrigierte Version)

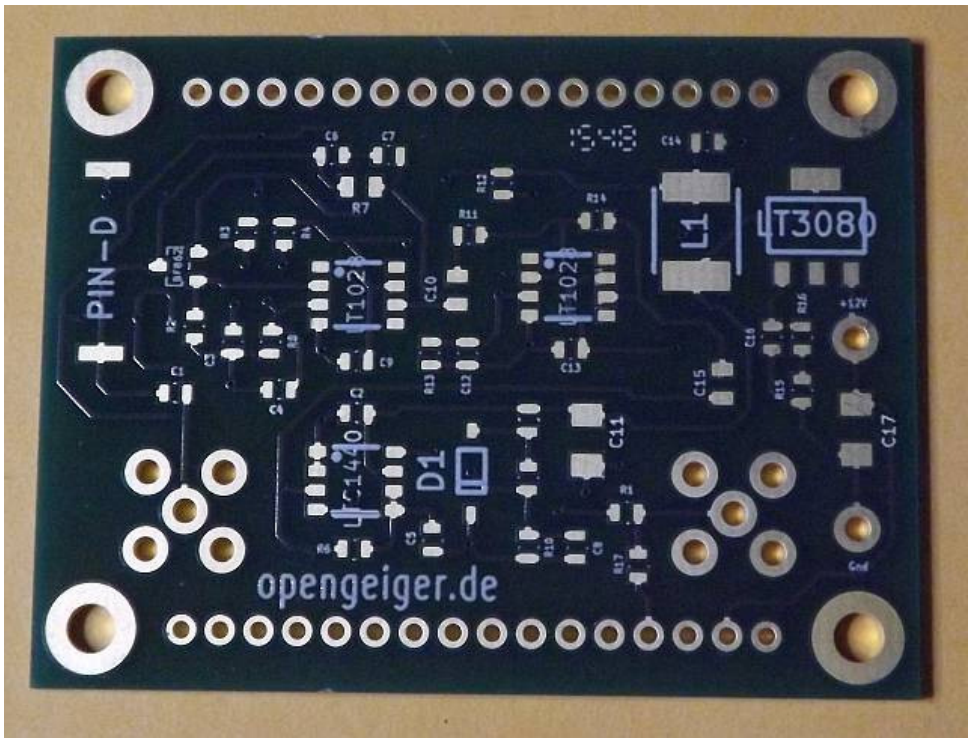

Abb. 10 Die im Platinen-Shop gefertigte Platine (Version 1)

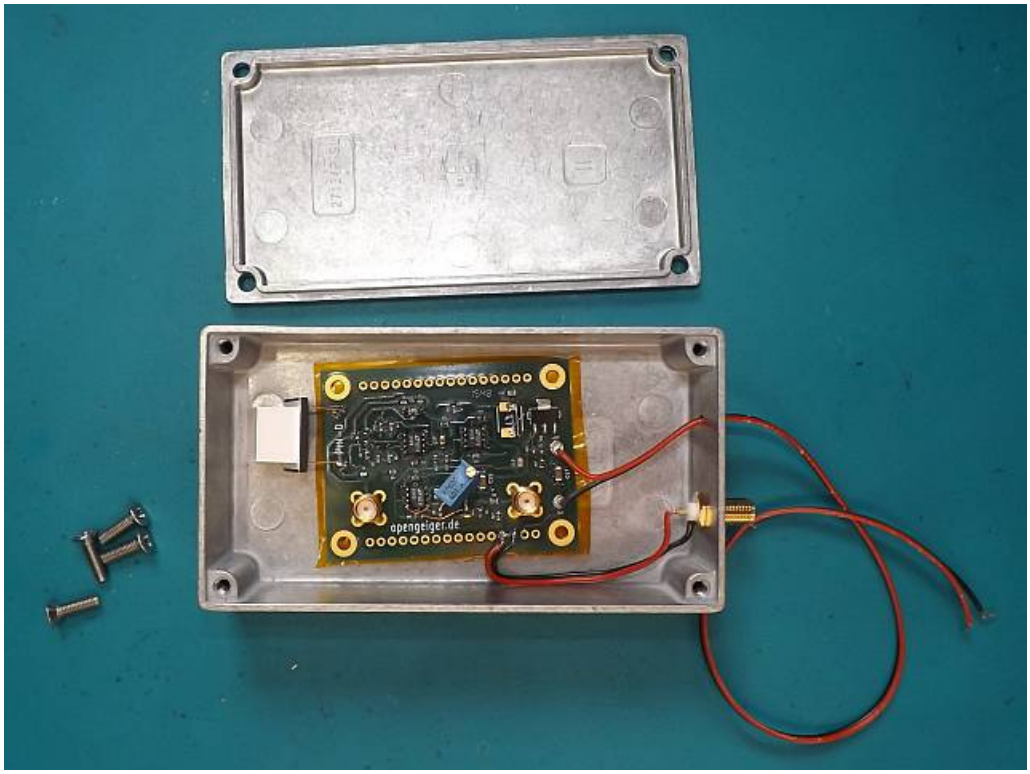

Abb. 11: Aufgebaute Platine in einem Alu-Druckguss-Gehäuse zur Schirmung vor Licht und vor elektrischen Störungen

Ganz wichtig für die korrekte Funktion ist das Gehäuse aus Alu-Druckguss, das aber nun kein spezielles Fenster aus dünner, empfindlicher Alufolie mehr benötigt, da die Gamma-Strahlung eine ausreichend hohe Durchdringungskraft hat. Wichtig ist das Gehäuse einmal um eine zusätzliche Lichtschirmung zu erreichen aber vor allem auch um jede Form elektrischer und magnetischer Felder (Wirbelstromdämpfung) abzuschirmen.

Insgesamt ergaben sich bereits bei den ersten Messungen hervorragende Ergebnisse. Der Spannungsbereich der Pulse lag bei den untersuchten Proben zwischen -200mV und –2V nach der zweiten Verstärkerstufe (Gain = 20). Das Rauschen lag unter 20mVrms so dass die Komparatorschwelle auf etwa 50mV über der Referenzspannung von 1.182V eingestellt werden konnte. Was mit dieser Einstellung die niedrigste detektierbare Energie ist, muss sich aber erst noch zeigen. Im ersten Anlauf Zumindest konnte die Gamma-Strahlung des Am241 aus einem Rachmelder jedenfalls noch nicht nachgewiesen werden. Auf das Cs137 jedoch reagiert das Szinti-Geigerle recht stark im Vergleich zum Gammascout Geiger-Müller Zählrohr (LND712).

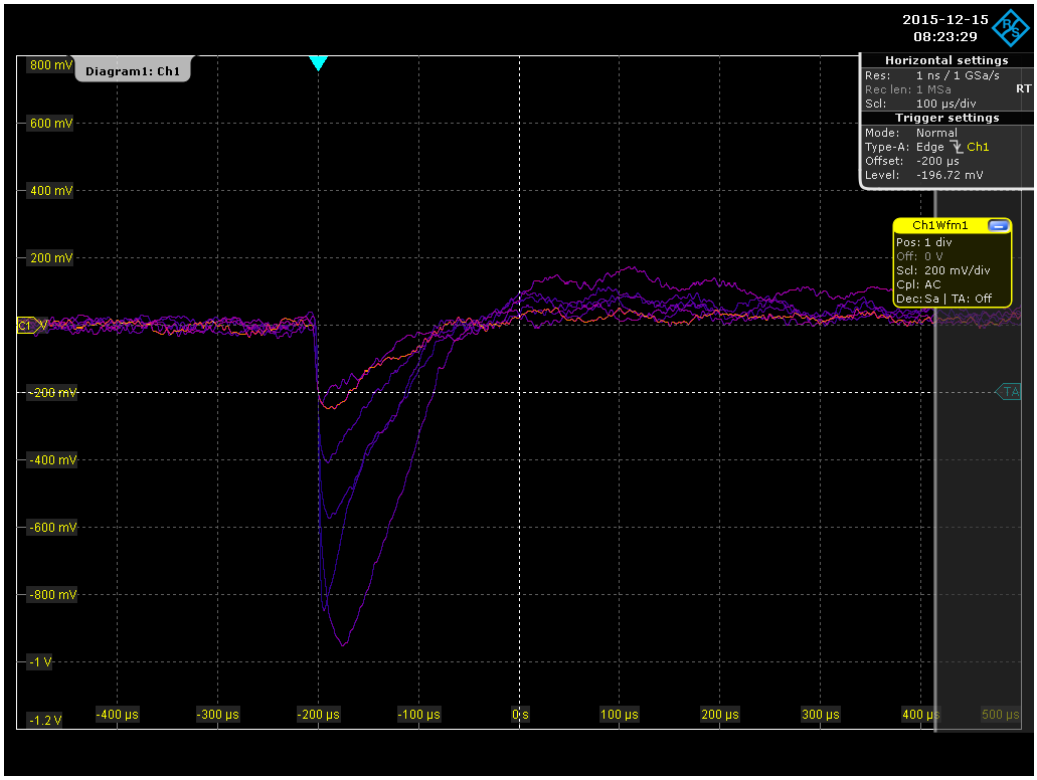

Abb. 12: Pulse unterschiedlicher Höhe am Ausgang des analogen Verstärkers

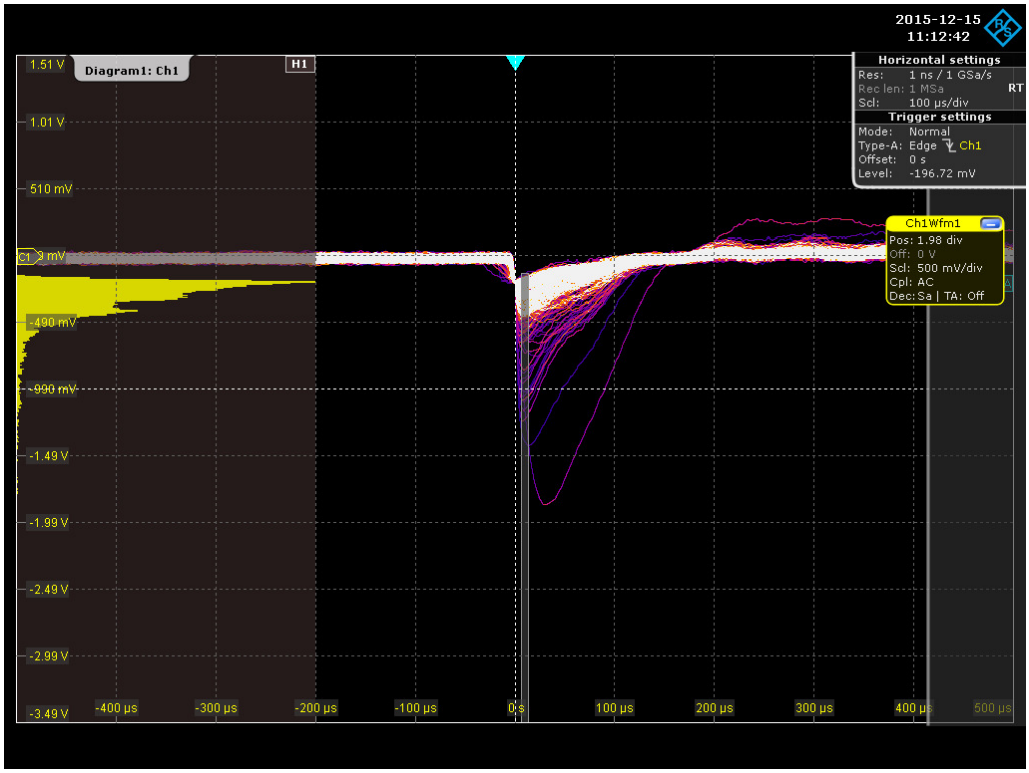

Abb. 12: Histogramm über viele Pulse am Ausgang des analogen Verstärkers (Glühstrumpf als Probe)

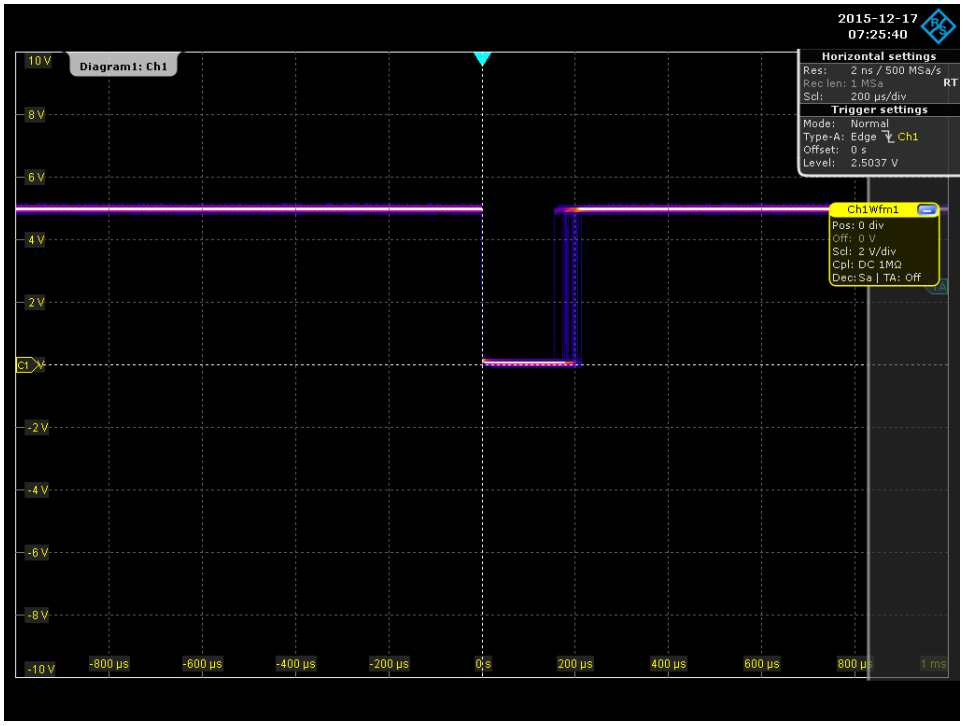

Abb. 13: Digitale Pulse am Ausgang des Komparators

Die SMA-Buchsen sind für eine einigermaßen exakte Messung der Signale notwendig. Man muss das Oszilloskop direkt anschließen, Tastköpfe würden das Signal zu sehr verfälschen. Es empfiehlt sich für die erste in Betriebnahme die Schaltung über der den Testeingang mit angeschlossener PIN-Diode zu stimulieren. Das macht man am besten in einer Metallschachtel (z.B. Keksdose) die man zur Schirmung auf Masse legt. Diese dient dann gleichzeitig als Lichtschirmung. Die zweite Verstärkerstufe ist auch niederohmig genug um das analoge Signal nach außen auf das Oszilloskop zu geben.

Hat man ein Speicheroszilloskop kann mein bei einer „Infinite Persistance“ Einstellung beliebig viele Waveforms aufnehmen und aufeinanderlegen. Manche Oszilloskope bieten noch eine Histogrammfunktion, so dass man sich auch die Häufigkeit anschauen kann, mit der die Waveform durch ein vorgegebenes Fenster läuft. Auf diese Weise kann man quasi auch auf ganz primitive Weise einen Multi Channel Analyzer nachbilden, wie er in der Spektroskopie verwendet wird. Man erkennt dabei auch, dass bestimmte Impulshöhen häufiger auftreten, als andere, wenn man wie hier zum Beispiel eine Thorium Probe als Strahlungsquelle verwendet, die einzelne ausgeprägte Gamma-Linien aufweist.

Die Komparatorschwelle stell man nun so ein, dass sie etwa beim 2-3-fachen der Rauschspannung der Grundlinie (in Vrms) liegt. Damit stellt man sicher, dass man Strahlungsimpulse detektiert und nicht die zufälligen Auslenkungen des elektronischen Rauschens. Eine gewisse Restwahrscheinlichkeit bleibt aber immer, dass eine Rauschspannung im analogen Ausgangssignal so hoch liegt, das der Komparator auslöst. Deswegen ist die Nullrate nicht allein durch Strahlungsquanten der terrestrische kosmischen Strahlung oder der terrestrischen Strahlung bestimmt. Man kann auch erkennen, dass das digitale Ausgangssignal immer noch eine gewisse Impulsweitenmodulation aufweist, die durch die

unterschiedliche Abklingdauer der Landungsimpulse zustande kommt. Diese ist natürlich auch von der Einstellung der Komparatorschwelle abhängig.

Hat man die grundsätzliche Funktion verifiziert und den Komparator brauchbar eingestellt, kann man ein einfaches Zählmodul mit einem Mikrocontroller benutzen um die Pulsrate zu bestimmen. Hier bietet sich natürlich der Arduino an /3/. Am Ausgang des Komparators ist ein Spannungsteiler vorgesehen, der als High Level 5V und als Low level 0V liefert. Damit kann der Ausgang des Szinti-Geigerle direkt an den Interrupteingang eines Mikrocontroller angeschlossen werden, der die Pulsrate auf ein Display ausgibt.

Die Nullrate in der Wohnung liegt bei der oben beschriebenen Einstellung des Komparators bei ca. 40-50cpm. Interessant ist aber, dass das Szinti-Geigerle ein komplett anderes Ansprechverhalten hat als das normale Geigerle mit BPW34 Dioden. So reagiert es auf eine Uranglasur recht schwach aber auf ein natürlichen Granit mit Uranglimmern recht heftig. Dies liegt ganz eindeutig daran, dass das Szinti-Geigerle auf Grund der Wandstärke des Alu-Gehäuses von ca. 1mm recht unempfindlich auf die Beta-Strahlung ist (Th234, Pa234 in der Zerfallsreihe) dafür aber auf die Gamma-Strahlung des Pb214 (295 und 352keV) welches im natürlichen Uran enthalten ist, sehr deutlich reagiert. Da bei der Herstellung von Uranfarben das Ra226 (HWZ 1600Jahre) entfernt wurde, tauchen diese Zerfallsprodukte in der „relativ kurzen“ Zeit seit der Herstellung (um ca. 1930) noch nicht auf. Deswegen ist eine Uranglasur relativ arm an Gamma-Strahlung.

Abb. 14: Vergleichsmessung der Gammastrahlung mit dem Szinti-Geigerle und dem Gamma-Scout an einem uranhaltigen Granit, das Szinti-Geigerle zeigt 482cpm bei einer Integrationszeit von 10 Sekunden an, der Gammascout 1.593uSv/h (Integrationszeit 2 Sek, gefiltert).

Aus einer Vergleichsmessung mit dem Gammascout an einem Erzbrocken (Granit mit Uranocircit Kristallen) kann man grob die Zählraten-Empfindlichkeit für natürliches Uran bestimmen. Zieht man von dem Anzeigewert von 482cpm eine Nullrate von 40cpm ab und nimmt den Anzeigewert des Gammascout als korrekt an (1.593uSv/h) dann kommt man auf eine Zählratenempfindlichkeit von etwa 277cpm / (uSv/h) für die Summe der Gammastrahlung. Das ist zwar noch etwas weit weg von den von First Sensor spezifizierten Zählraten, aber es ist eine deutlich höhere Empfindlichkeit als die eines SBM-20 Geiger-Müller Zählrohrs. Und das ist für den Anfang echt nicht schlecht.

Mit der Anordnung aus Szinti-Geigerle, einem Arduino Zählraten-Auswertemodul und einem 11.1V Modellbauakku ist man bereits mobil genug um ins Gelände gehen zu können. Und auch da erweist sich das Szinti-Geigerle als recht robustes Messgerät. Allerdings sollte man die Platine deutlich gedämpft polstern, damit bei Vibrationen keine falschen Zählimpulse durch einen Mikrofonieeffekt an der Gehäusekapazität entstehen. Als Beispiel wurde hier die Kapelle an der Milchbar des Höhenpark Killesberg besucht, die aus uranhaltigem Sandstein gebaut wurde /6/. Das Szinti-Geigerle zeigt 312cpm an, was mit der vorher ermittelten Zählraten-Empfindlichkeit für natürliches Uran einer Dosisleistung von 0.98uSv/h entsprechen würde. Dieser Wert liegt voll in dem Bereich an Werten, die man bei diesem Baumaterial mit anderen Instrumenten auch messen kann.

Abb. 15: Messung an der Mauer der strahlenden Kapelle im Stuttgarter Killesbergpark. Das Szinti-Geigerle zeigt einen Wert von 312cpm an.

In der folgenden Tabelle sind noch einige weitere Zählraten an der Oberfläche „typischer“ Proben aufgeführt. Insgesamt kann man erkennen, dass das Szinti-Geigerle zusammen mit einem

Mikrocontroller ein recht leistungsfähiges Messgerät ergeben kann, das ganz ohne Hochspannung auskommt, gamma-empfindlich ist und dabei die Zählraten eines normalen Geiger-Müller Zählrohrs übertrifft.

Probe	Nuklid	Zählrate (cpm)
Spark Gap Röhre	Cs137	324
Fotoobjektiv	Th232	516
Armbanduhr	Ra226	342
Glühstrumpf	Th232	294
Uranerz mit Pechblende	Unat	1554
Keramik mit Uranglasur	U238	78
Thoriumsand aus Bayern	Thnat	582

Tabelle 1: Erste Zählraten-Ergebnisse mit dem Szinti-Geigerle

Literatur und Links

/1/ Ein Ladungsverstärker für eine Low-Cost Gamma-Spektroskopie mit Si-Detektoren
http://opengeiger.de/CSAdoku.pdf

/2/ Kostengünstige Gamma-Spektroskopie mit einer PIN-Diode und aufgesetztem Szintillationskristall
http://opengeiger.de/PinDiodenGSpec.pdf

/3/ Auswerte-Modul mit dem Arduino: Zeitintervall-Vorgabe versus Zählimpuls-Vorgabe für die Datenauswertung mit dem Arduino bei zählenden Strahlungs-Detektoren für Radioaktivität
http://opengeiger.de/Zeitvorgabe.pdf

/4/ Integrierte Schaltungen: LT 1028, LTC1440, LT3080, LTSpice Schaltungssimulator
http://linear.com

/5/ First Sensor AG
Sensoren für ionisierende Strahlung
http://www.first-sensor.com/de/produkte/strahlungssensoren/serie-x-detektoren-fuer-ionisierende-strahlung

/6/Uran in Stuttgarts bester Lage
http://opengeiger.de/GeigerCaching/UranKillesberg.pdf