Das Teviso Pin-Dioden Sensormodul RD2007 als Detektor für radioaktive Strahlung

Bernd Laquai 18.4.2014

Es gibt endlich eine Firma, die das Konzept des Pin-Dioden Detektors in professioneller Weise aufgegriffen hat und dieses nun als kommerzielles Sensormodul anbietet. Die schweizerische Firma Teviso (www.teviso.com) hat dabei, verglichen zum Konzept des Stuttgarter Geigerle, die Pin-Dioden, den Verstärker sowie den Komparator in ein 28 x16 x 6mm großes Gehäuse integriert, welches von hinten her vergossen ist und hat dabei gleich die notwendige elektrostatische Schirmung mit in das kleine Modulgehäuse eingebaut. Lediglich der digitale Logik-Baustein zum Betrieb der LED im Geigerle ist nicht enthalten. Zur Ansteuerung einer LED ist im Datenblatt eine spezielle Schaltung zur Impulsverlängerung angegeben, so dass man eine LED für einen erfassten Puls aufblitzen sehen kann. Ein Ohrhörer kann über einen entsprechenden Vorwiderstand oder kleinen Kondensator direkt an den Ausgang angeschlossen werden, so dass man ein Knack vernehmen kann, sobald ein Puls registriert wird. Das Modul kommt mit drei Pins aus, zwei dienen der Stromversorgung und ein Pin wird als CMOS Signalausgang genutzt.

Damit steht nun auch für den weniger geübten Bastler, welcher mit der analogen Schaltungstechnik und Themen wie Abschirmung eher auf Kriegsfuß steht, ein äußerst einfach und unkompliziert handzuhabender Strahlungssensor mit digitalem Zählimpulsausgang zur Verfügung. Man kann damit in wenigen Minuten einen PIN-Doden Zähler aufbauen, der einem Geigerzähler äquivalent ist, lediglich die Zählrate ist beim PIN-Dioden Konzept geringer. Den Sensor gibt es zur Zeit in drei verschiedenen Ausführungen. Neben dem Modul RD2007 gibt es noch eine Version RD2014 und RD3024. Bei diesen beiden Varianten wurde die Zählrate nochmals gesteigert (5.9 bzw. 5.8cpm pro µSv/h im Vergleich zu 3.4 cpm pro µSv/h beim RD2007). Zusätzlich können diese beiden Modelle bis 3V herunter betrieben werden, während der RD2007 nur bis 4V Betriebsspannung spezifiziert ist. Der RD3014 scheint dabei noch eine etwas dichtere Schirmung gegen Störfelder zu haben und ist damit auch deutlich teurer. Die Angabe der Umrechnungsfaktoren von cpm in µSv/h ist natürlich auch als ein gewisser Vorteil zu bewerten, da diese Faktoren im Prinzip eine werksseitige Kalibrierung darstellen, die laut Datenblatt auch zu +/-15% eingehalten wird.

Der RD2007 hat (wie auch die anderen Varianten) einen extrem niedrigen Stromverbrauch von 400uA. Allerdings sollte die Versorgungsspannung frei von Störungen sein, da im Modul nicht mit einer guten Unterdrückung von Störungen gerechnet werden kann. Impulse auf der Stromversorgung könnten deswegen fälschlicherweise auf Zählimpulse abgebildet werden. Werden Schaltregler (DC/DCs) bzw. Schaltnetzteile an Stelle von Linearreglern bzw. linearen Netzteilen zur Stromversorgung verwendet werden, sollte man also vorsichtig sein. Daher empfiehlt der Hersteller in solchen Situationen auch eine zusätzliche Filterung in der Stromversorgung.

Mit dem RD2007 ist es nun möglich in wenigen Minuten aus 4 Bauteilen (Sensormodul, 4.5V Batterie, Schalter und Piezo-Lautsprecher) einen durchaus anspruchsvollen Detektor für Radioaktivität aufzubauen. Das ist kaum noch zu toppen was den minimalen Bastelaufwand anbelangt. Das Sensormodul kann auf genauso einfache Weise völlig direkt und ohne zusätzliche Bauteile an einen mit 5V versorgten Mikrocontroller angeschlossen werden. Dazu

muss nur der Ausgang des Sensors mit dem Interrupt-Eingang verbunden werden, so dass in einer Interrupt Service Routine ein Zähler hochgezählt werden kann. Damit kann sich ein „Softi“ dann auch völlig auf das „Wesentliche“ nämlich die Programmerstellung konzentrieren (die Hardware hat er so natürlich nicht ganz verstanden). Man kann den Ausgang des Sensormoduls auch über eine kleine Kapazität direkt mit einer Soundkarte (eine gute mit 192kSamples/s) verbinden, so dass man leicht eine unbeaufsichtigte Aufzeichnung über längere Zeit machen und die Daten später auswerten kann.

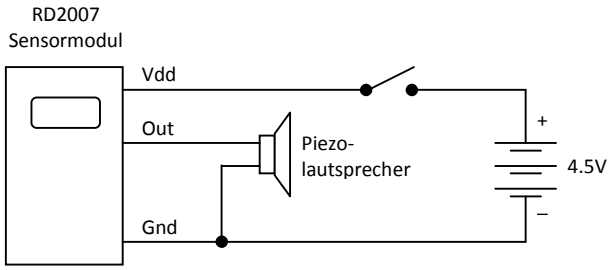

Abb. 1: An Einfachheit kaum zu toppen, der Minimaldetektor für Radioaktivität aus 4 Bauteilen mit dem RD2007 Sensormodul

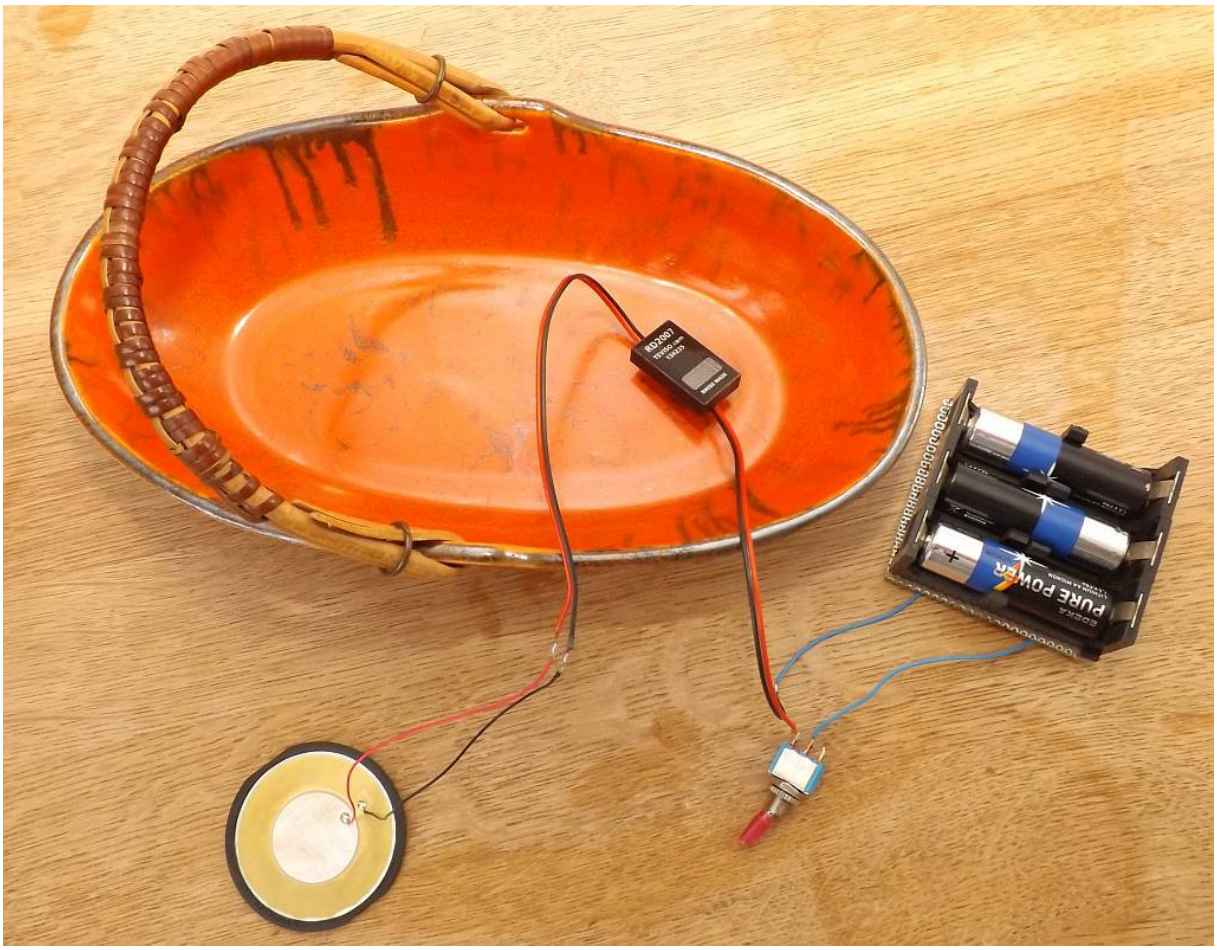

Abb. 2: Was tickt denn da? Kontrolle in Oma’s Porzellankiste mit den Minimaldetektor

Im Gegensatz zu den auf Bastelseiten beschriebenen PIN-Detektor Beispielen (inklusive des Stuttgarter Geigerle) kann man bei den Teviso Modulen davon ausgehen, dass ein spezielles,

kundenspezifisch hergestelltes PIN-Dioden Array verwendet wird, das nicht notwendigerweise nur aus einer reinen Serienschaltung von drei, der BPW34 PIN-Diode ähnlichen Diodenchips besteht. Außerdem wird vermutlich auch ein spezieller, sehr rauscharmer Verstärker eingesetzt, der es ermöglicht, die Schaltschwelle des nachfolgenden Komparators (ebenfalls mit rauscharmer Schwelle) sehr niedrig zu legen, ohne dass man Gefahr läuft, hohe Rauschspikes des Verstärkers als Zählimpulse zu zählen. Da in einer PIN-Diode überproportional mehr Impulse mit niedriger Impulshöhe entstehen (die Impulshöhenverteilung ist für schwache Pulse annähernd negativ exponentiell), steigert eine solche Maßnahme die Zählrate auch überproportional. Allerdings kann es im Extremfall dann auch notwendig werden, dass sowohl der Verstärker wie auch der Komparator gegen thermische und sonstige Einflüsse stabilisiert und sehr gut gegen Störungen abgeschirmt werden muss. Darin wird auch der Aufwand bei den zwei großen Brüdern RD2014 und RD3024 stecken, der sich sofort in höheren Kosten niederschlägt. Da das Rauschen in Halbleitern und Widerständen aber annähernd normalverteilt ist, welches - wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit - Ausreißer bis mindestens zur Betriebsspannungsgrenze erzeugen kann, ist es bei allem Aufwand nicht möglich zu verhindern, dass nicht doch gelegentlich ein Rauschspike als Zählimpuls gewertet wird. Daher hat so ein Sensor auch im strahlungsfreien Raum stets eine sehr kleine strahlungsunabhängige Nullrate. Das gilt übrigens auch für Geiger-Müller Zählrohre. Ein Geiger-Müller Zählrohr besteht aus einem Metallrohr oder einem metallisierten Glasrohr welches die einfallenden Gamma-Quanten über den Photoeffekt in freie Elektronen umwandelt. Diese lösen dann eine Stoßionisation aus, was zu einem Puls führt. Da dieses Metall nicht ganz frei von Radionukliden sein kann, gibt es bei Geiger-Müller Zählrohren ebenfalls eine Nullrate im strahlungsfreien Raum. Der strahlungsfreie Raum ist für den Bastler allerdings auch eher eine hypothetische Größe, da selbst mit einer großen Bleiburg meist noch genug Radon-Gasmoleküle aus der Luft unterwegs sind, die zu einer nicht ganz vernachlässigbaren strahlungsabhängigen Nullrate führen.

Das Sensor-Modul ist laut Datenblatt auf Röntgenstrahlung, Gammastrahlung und auch auf Betastrahlung sensitiv. Es sind drei Energiepunkte für die Gamma-Energien genannt für die eine Zählrate in cpm pro µSv/h angegeben ist (Am-241 mit ca. 50keV Gamma-Energie, Cs-137 mit 0.662MeV und Co-60 mit 1.33MeV Gamma-Energie). Das gibt eine grobe Vorstellung über den Empfindlichkeits-Bereich, der relativ flach erscheint (im Gegensatz zu so manchem Zählrohr). Der Datenpunkt für das Am-241 lässt natürlich auf eine noch tiefere Grenze hoffen, dem ist aber leider nicht so. Zumindest kann der getestete RD2007 Sensor (wie auch die üblichen PIN-Dioden) die Beta-Strahlung einer Tritium-Gaslichtquelle (max. 18.6keV Energie) nicht mehr erkennen.

Was aufhorchen lässt, ist die Bemerkung im Datenblatt: „Output pulse width 40 µs to 150 µs, depending on pulse energy level“. Das suggeriert die Vorstellung, dass vielleicht die Energie der einfallenden Gamma-Quanten in eine Pulsweite umgesetzt werden. Das hat auch schon voreilige You-Tube Video Autoren dazu verleitet zu behaupten, man könne mit dem Sensor mit einfachen und billigen Mitteln eine Gamma-Spektroskopie erreichen. Diese Hoffnung zerstreut sich leider schnell, wenn man genauer hinschaut. Es wäre einfach zu schön gewesen für den Preis.

Abb. 3 zeigt den Ausgang des RD2007 Moduls bei 5V Betriebsspannung, dargestellt mit einem Speicheroszilloskop nach kurzer Akkumulationszeit, nachdem der Sensor auf einem

Thorium Glühstrumpf platziert wurde. Man kann deutlich erkennen, dass der Komparator bei sehr kurzen Impulsen nicht mehr im digitalen Sinne durchschaltet. Da der höchste noch analog abgebildete Impuls etwa 100us lang ist, kann man von einer Bandbreite von etwa 10kHz ausgehen. Auf der anderen Seite kann man erkennen, dass die Zählimpulse maximal etwa 200us lang sind. Akkumuliert man die Pulse über sehr lange Zeit (mehr als 1 Stunde), erkennt man deutlich eine Häufung der fallenden Flanke bei etwa 150us nach dem Triggerzeitpunkt (bei –200us der Zeitbasis des Oszilloskops, siehe auch Abb.4a). In Abb 4 a,b wurde zusätzlich ein Histogramm über die Häufigkeit, mit der die aufgezeichnete Messkurve ein schmales Fenster bei 2.5V kreuzt (Triggerschwelle ebenfalls bei 2.5V), berechnet. Man kann in dem Histogramm eine nahezu kontinuierliche Verteilung erkennen, die keinerlei Hinweis auf unterschiedliche Häufungen bei bestimmten diskreten Energien gibt. Macht man das selbe Experiment mit einer Uranerzprobe aus dem Schwarzwald, ergibt sich eine vergleichbare Häufigkeitsverteilung auch wieder ohne jede diskrete Häufung verschiedener Energien, wie sie in der Zerfallsreihe des Urans vorkommen. Von daher kann man die beiden unterschiedlichen Proben nicht anhand ihrer Verteilung der Zähl-Impulsdauern unterscheiden.

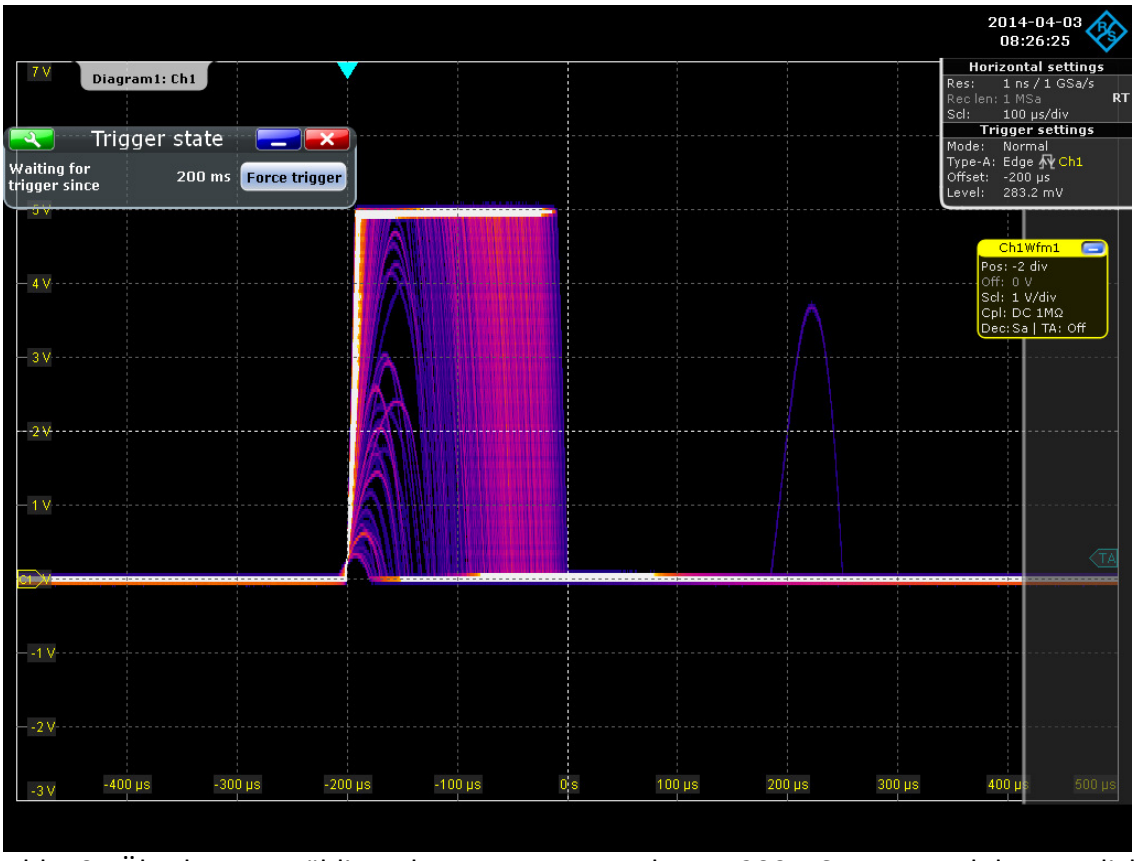

Abb. 3: Überlagerte Zählimpulse am Ausgang des RD2007 Sensor-Moduls. Deutlich sind unterschiedliche Impulslängen zu erkennen.

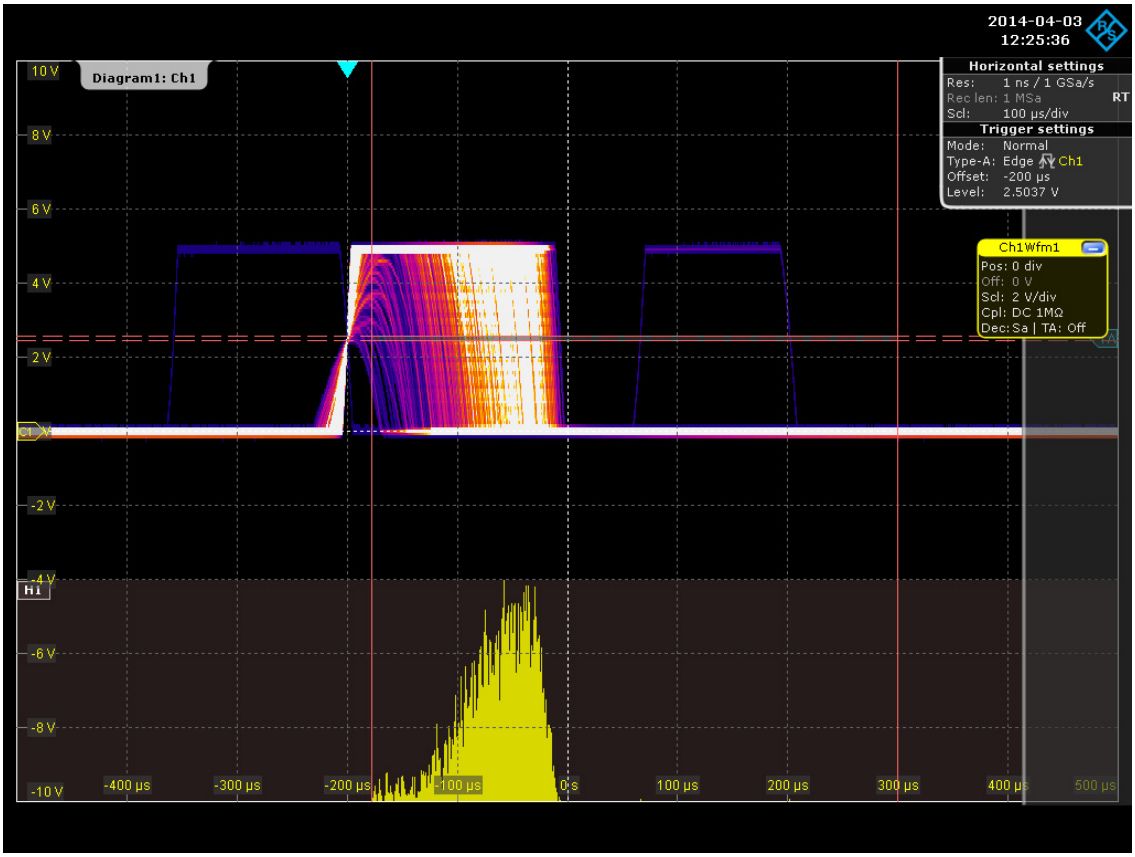

Abb. 4a: Aufzeichnung der Zählimpulse über sehr lange Zeit und Berechnung eines Histogramms entlang eines Fensters auf der Höhe von 2.5V (Thorium-Glühstrumpf)

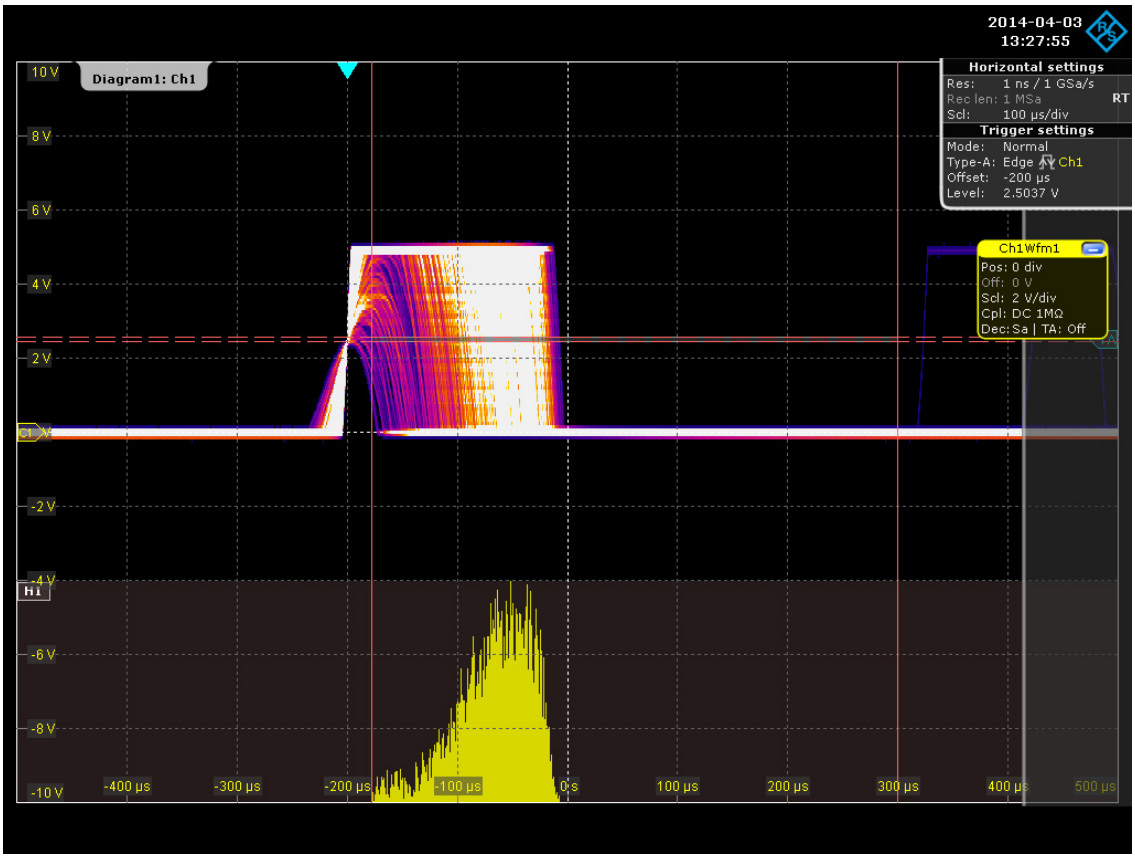

Abb.4b: Aufzeichnung der Zählimpulse über sehr lange Zeit und Berechnung eines Histogramms entlang eines Fensters auf der Höhe von 2.5V (Uranerzprobe)

Dieses Verhalten hat auch einen Hintergrund. Schaut man sich einmal die Impulse direkt nach dem Detektor-Verstärker des Alpha-Geigerle in einer ähnlichen Darstellung genauer an (BPX61 PIN-Diode ohne Glas als Detektor, Uranerzprobe), dann sieht man durchaus Häufungen bei gewissen Energien. Hier ist das Histogrammfenster nun vertikal dargestellt, zu einem Zeitpunkt wo die Impulse die höchste Höhe erreichen. Man kann hierbei ganz deutlich erkennen, dass etliche Pulse den Verstärker an den Anschlag treiben, so dass keine runde Pulskuppe entsteht, sondern die höchstmögliche negative Spannung des Verstärkers ausgegeben wird (-5V, AC Kopplung). Dies tritt immer dann auf, wenn energiereiche Alpha-Partikel auf der Diode einschlagen. Dieser Effekt lässt auch sofort nach, wenn man ein Blatt Papier zwischen Detektor und Probe bringt. Das liegt daran, dass Alpha Teilchen zwar eine hohe Energie aber wegen der großen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit Materie nur wenig Durchdringungskraft haben. Akkumuliert man ein derartiges Impulshöhen-Histogramm sehr lange, dann verbreitern sich die einzelnen Häufungen stark. Man kann in so einem Fall also weniger von Energielinien sprechen sondern eher von sehr breiten Peaks, die sich schnell gegenseitig überlagern.

Stellt man sich nun vor, dass diese analogen Impulse auf einen Komparator gegeben werden der seine horizontale Schwelle dort liegen hat, wo das Histogramm beginnt (ca. bei –0.75V), dann kann man ahnen, wie im Teviso Sensor die unterschiedlich hohen Impulse hinter dem Verstärker in unterschiedlich lange Impulse umgewandelt werden. Man kann erkennen, dass es eine maximale Impulsdauer gibt, die beim Alpha-Geigerle etwas kürzer ist (nur eine Diode und weniger Kapazität) als beim Teviso RD2007. Man erkennt, dass eine von einem Alpha-Teilchen erzeugte Kurve den längsten Impuls erzeugt und eine Kurve eines schwachen Gamma-Treffers, der kaum über die Schwelle kommt, den kürzesten. Allerdings erkennt man auch, dass die bereits schon breiten Häufungen in den Höhen der Pulse vom Komparator in nicht-linearer Weise in Impulsdauern verdichtet werden, so dass die Form des Histogramms kaum noch von einem Kontinuum unterschieden werden kann.

Man erkennt aus Abb.5 aber auch, dass die höhere Zählrate des RD2007 mit Sicherheit auch dadurch erreicht wird, dass die Komparatorschwelle mit mehr Präzision bei geringerem Rauschen näher an die Nulllinie gelegt wurde. Da offensichtlich auch auf eine gute Schirmung geachtet wurde, konnte man den Sicherheitsabstand bestimmt gegen eingestreute Impulse (elektrostatische Störungen, Mobilfunk, etc.) ebenfalls verringern, der in Abb. 5 recht groß ist. Dagegen werden im Falle von Abb. 5 viele Pulse, welche Höhen unter –0.75V haben, vom Histogramm nicht gezählt.

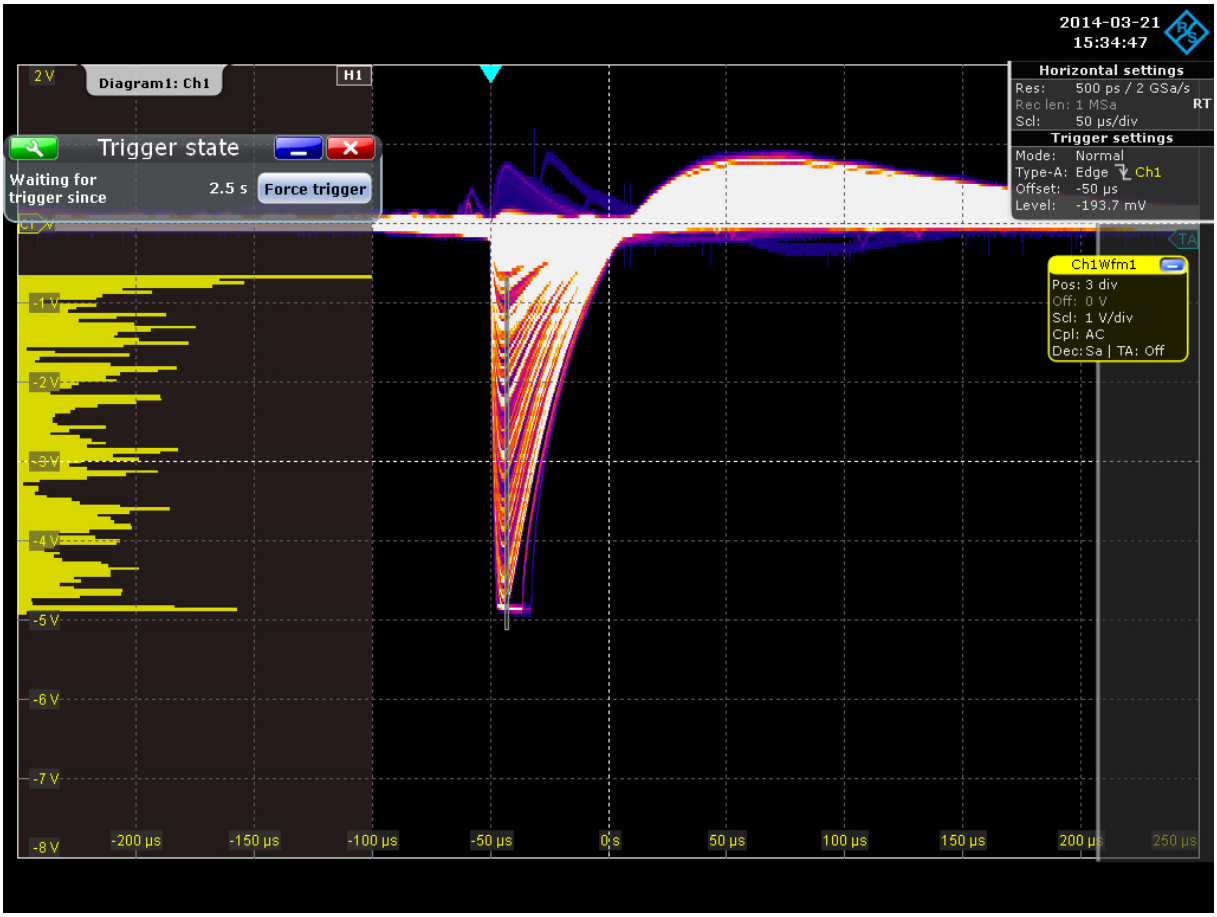

Abb. 5: Impulshöhen-Histogramm aufgenommen mit dem Alpha-Geigerle mit BPX61 Photodiode ohne Glas und einer Uranerzprobe

Man kann sich natürlich auch ganz grundsätzlich einmal fragen: Ist es denn überhaupt möglich mit einer PIN-Diode mit planarer intrinsischer Zone eine brauchbare Energieauflösung zu erreichen? Die Antwort ist an sich relativ einfach: Eher nicht. Das liegt daran, dass wenn ein Gamma-Quantum in die I-Zone einer planaren PIN-Diode eintrifft, diese mit hoher Wahrscheinlichkeit auch wieder verlässt, weil sie zu dünn für die meisten Gamma-Energien ist. Im Prinzip streut sich ein Gamma-Photon in den meisten Fällen nur an den äußeren Hüllen-Elektronen des Siliziums, bevor es mit einer Richtungsänderung wieder aus dem Chip austritt ohne seine ganze Energie abgegeben zu haben (sogenannte Compton-Streuung). Das Siliziumatom, das dadurch ionisiert wurde, gibt sein Elektron in Form eines Ladungsimpulses ab. Da aber die Gamma-Photonen (Quanten) dabei nur wenig ihrer Energie verlieren, ist die erzeugte Ladungsmenge kein wirklich proportionales Maß mehr für die gesamte Energie der Gamma-Quanten beim Eintritt in den Detektor. Vielmehr sind alle möglichen Energien denkbar, die an Elektronen abgegeben werden, je nach Streuwinkel. Deswegen erzeugt diese Streuung ein Energiekontinuum und damit eine kontinuierliche Verteilung der Pulshöhen. Die meiste Energie geben die Gamma-Photonen dann ab, wenn sie senkrecht von einem Hüllenelektron zurückgestreut werden. Da dieser Fall die höchstmöglichste Energie darstellt, die von Gamma-Photonen an die Elektronen abgegeben werden kann, ist das auch die höchste Pulshöhe für den Fall der einfachen Compton-Streuung (Compton-Kante). Danach ergibt sich dann prinzipiell ein Tal im Histogramm (Compton-Valley) bis zu der Energie, die dann auftritt, wenn ein Gammaquantum keine Compton-Streuung erfährt, sondern seine Energie tatsächlich über den photoelektrischen Effekt bei einer Wechselwirkung an den inneren Schalen des Siliziumatoms komplett an die

Energie eines Photoelektrons verliert. Dieser Impuls (Photopeak) ist dann proportional zur gesamten Gammaenergie und liegt in der Energie hinter dem Compton-Tal. Wenn aber die Compton-Streuung für mehrere Radionuklide in einem Nuklid-Gemisch dominiert, dann fallen die einzelnen Photopeaks nicht mehr groß auf.

Bei Detektoren für die Gammaspektroskopie geht man daher einen anderen Weg. Man stellt ein Halbleiter (Si oder Germanium) so hochrein her, dass ein möglichst großes aktives (eigenleitendes) Volumen für Wechselwirkungen entsteht. Das sind eher cm Kantenlänge als die µm Schichtdicke im Falle einer PIN-Diode. Dann treten zwar auch viele Fälle von Compton-Streuung auf, aber ein Gamma-Photon kann so mehrmals mit Si-Atomen zusammenstoßen und diese ionisieren, ohne dass es das Detektor-Volumen verlässt. Hat es dann am Ende alle Energie abgegeben (mehrfache Compton-Streuung), entsteht ein Ladungspuls welcher der Energie des ursprünglichen Gammaquantums wirklich entspricht. Damit unterscheiden sich diese Ladungsimpulse aber nicht mehr von den durch den Photoeffekt entstandenen und fallen auf die Energie des Photopeaks. Nur wenn an der Oberfläche geschwächte Gammaquanten den Kristall vorzeitig verlassen, wird im Gammaspektrum noch ein schwaches Compton-Kontinum erzeugt. Der Photopeak dominiert aber das Geschehen und hebt sich damit deutlich auch von den Compton-Kontinua anderer Radionuklide ab. Das Problem ist nur, dass diese hochreinen Detektoren ein Vermögen kosten und man infolge des schlecht leitenden intrinsischen Halbleitermaterials wieder sehr hohe Spannungen braucht. Das heißt, wenn man wirklich Low-Cost Gamma-Spektroskopie machen will, ist der RD2007 kein geeigneter Detektor. Die kostengünstigere Lösung ist dann vermutlich doch eher ein Szintillationsdetektor.

Für den Gebrauch als einfachen Strahlungsdetektor ohne Energieauflösung ist der RD2007 bei einem Preis von deutlich unter 100Euro aber sicher eine sehr ökonomische Lösung im Vergleich zu einem Zählrohr, welches den selben Energiebereich abdeckt und dann noch eine Hochspannungserzeugung und Auswerteschaltung braucht.

Nun stellt sich noch die Frage, ob der Teviso Sensor zum Nachweis von Niedrigdosisstrahlung geeignet ist, wenn man die im Vergleich zu einem großen Zählrohr doch relativ niedrige Zählrate anschaut. Die Antwort wurde mit dem Stuttgarter Geigerle allerdings bereits gegeben und der RD2007 tut diesen Job genauso gut, wenn nicht gar besser. Man muss lediglich die entsprechend längeren Zähldauern berücksichtigen. Die beste Probe für eine Prüfung im Niedrigdosisbereich ist das Kaliumchlorid. Eine Menge von 100g KCL in einem ungefähr kubischen Behälter muss die angezeigte Zählrate etwa um den Faktor drei gegen eine durchschnittliche Nullrate, welche durch die terrestrische Strahlung hervorgerufen wird, erhöhen. Ein Test mit dem RD2007 ergab die Zählraten, welche in Abb. 6 dargestellt sind. Hier wurde die Zeit gemessen, bis 10 Pulse erreicht waren und daraus die Pulsrate pro Stunde errechnet. Der Mikrocontroller, der die Berechnung und Aufzeichnung machte, schrieb den aktuellen Pulsraten-Wert aber alle 15min in den Speicher, egal ob er sich geändert hatte oder nicht.

Als Mittelwerte ergaben sich folgende Werte:

KCl 69 Pulse pro Stunde (0.34uSv/h)
Nullrate 26 Pulse pro Stunde (0.13uSv/h)

Damit errechnet sich ein Faktor von 2.6, was eine sehr gute Trennschärfe bedeutet.

Macht man eine Messung mit einer etwas stärker strahlenden Probe aus dem Haushalt, so kommt man mit dem RD2007 bei 5V Betriebsspannung auf folgende Werte:

Armbanduhr mit Leuchtziffern: 81 Impulse pro Minute
Keramikschale mit Uranglasur: 350 Impulse pro Minute (Strahlung von allen Seiten)

Zum Vergleich: Der Vellemann VM200 mit einem vergleichbar kleinen ZP1310 Zählrohr kommt gerade mal auf 23 Impulse pro Minute bei der gleichen Armbanduhr. Ein gut eingestelltes Stuttgarter Geigerle bringt es auf 88 Impulse pro Minute, ist also vergleichbar. Der Gammascout mit einem deutlich größeren LND712 Zählrohr bringt es allerdings schon auf 826 Impulse pro Minute mit der gleichen Armbanduhr, also eine um den Faktor 10 größere Zählrate. Das KCl sieht der Gammascout mit 766 Impulsen pro Stunde zu 532 Impulsen Nullrate. Er hat also eine schlechtere Trennschärfe (Faktor 1.4). Das liegt aller Wahrscheinlichkeit nach daran, dass der Gammascout im Gegensatz zum RD2007 infolge der Alpha-Strahlungsempfindlichkeit das Radon in der Raumluft besser wahrnimmt, was die wirkliche Nullrate verfälscht.

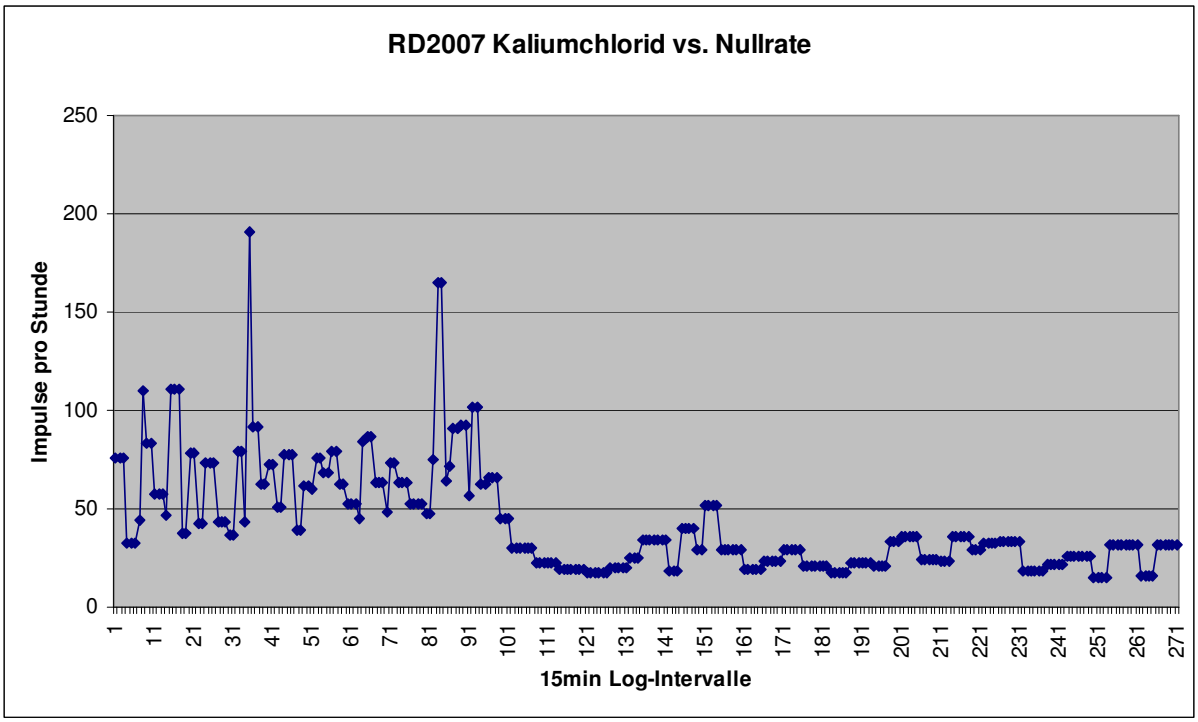

Abb. 6: Messung von 100g Kaliumchlorid und anschließende Messung der Nullrate mit dem Teviso-RD2007 Strahlungssensor

In Anbetracht der Kosten eines Gammascout oder eines vergleichbar guten Zählrohr-Zählers (mehrere hundert Euro) ist ein RD2007 Sensor in Verbindung mit einem kleinen Mikrocontroller aber sicher eine sehr attraktive ökonomische Lösung. Zudem ist der Sensor

wegen der 5V Betriebsspannung vor allem auch bei Feuchte im Außenbereich eine deutlich unproblematischere Lösung (er ist aber nicht spritzwasserfest!). Auch dann, wenn die Größe oder hohe Ortsauflösung von Bedeutung ist, ist der RD2007 einer Zählrohrlösung deutlich überlegen, da selbst bei einem kleinen Zählrohr eine Hochspannungserzeugung nötig wäre und die sensitive Fläche größer als beim RD2007 wäre. Auch in der Ausbildung, wo die Hochspannung bei Geiger-Müller Zählrohren manchmal etwas problematisch werden kann, bietet sich der ausschließlich mit Niederspannung betriebene Sensor an.

Der RD2007, wie auch die anderen Varianten des PIN-Dioden Sensor Moduls kann in Einzelstückzahlen über die bisher noch etwas spartanische Webseite der Firma Teviso bezogen werden (plus Versandkosten für eine Sendung per Einschreiben).

Interessanterweise wird als Anwendung auf der Webseite auch ganz deutlich die Ausbildung genannt. Das ist sehr lobenswert. Es bleibt zu hoffen, dass die Firma Teviso mit dem Produkt auch bei industriellen Anwendungen einen guten Absatzmarkt findet und in dieser Richtung auch Erfolg hat, denn ein gutes Produkt und eine gute Ausbildung allein sichert noch nicht das Überleben. In der Hobby-Gemeinde wird sich die Firma mit ihren Sensor Modulen sicher einen guten Namen machen, solange diese einigermaßen kostengünstig bleiben. Denn auch in diesen Kreisen schätzt man die schweizerische Präzision, selbst wenn das Silizium in den Modulen längst aus Taiwan oder Korea kommt.