Ein Miniatur-Detektor für Gamma-Strahlung auf der Basis eines Szintillators mit Silicon Photomultiplier (SiPM)

Bernd Laquai, 29.2.2016

Die Erfolgsgeschichte des Siliziums und der dazugehörigen Mikroelektronik scheint immer noch nicht zu Ende zu gehen. Das betrifft nicht nur die Weiterentwicklung integrierter Schaltungen, wo man zwischenzeitlich bei Strukturgrößen von 20nm für das Gate eines MOS-Transistors angekommen ist, sondern auch das Ersetzen von Geiger-Müller Zählrohren oder optischer Lichtverstärkerröhren (Photomultiplier) wie sie in Szintillationszählern eingesetzt werden durch Siliziumchips, welche die Funktionalität auf einem Bruchteil des bisherigen Volumens reduzieren. Der neueste Schrei in dieser Richtung ist der SiPM oder Silicon Photomultiplier, ein kleines Siliziumchip mit einigen Tausend Zellen, die aus einer Art PIN-Diode mit Vorwiderstand bestehen. Mit diesem nur wenige Millimeter großen Chip kann man buchstäblich einzelne Photonen zählen. Wenn man dann einen Szintillationskristall davorsetzt, dann erzeugt jedes einfallende Gamma-Quantum einen Lichtblitz aus einigen 100 Photonen im nahen Ultraviolett-Bereich, was der SiPM in einen energieproportionalen Impuls umsetzt. Verstärkt man diesen, kann man einmal die Gamma-Quanten zählen, man kann aber auch die Größe der Pulse auswerten und damit eine Spektroskopie erreichen. Dort wo früher große Photonenverstärkerröhren eingesetzt wurden, die zu Detektoren in der Größe einer Spraydose geführt haben, hat man heute millimetergroße Siliziumlichtverstärker, die zusammen mit einem millimetergroßen Kristall einen spektroskopiefähigen Detektor für Radioaktivität in der Größe einen Lippenstifts ergeben. Der größte Vorteil ist aber, dass als „Hochspannung“ für den SiPM nur noch 30V benötigt werden und keine 1200V mehr, so wie bisher. Dazuhin sind die kleinen Siliziumchips viel robuster als die evakuierten Glasröhren und sind zudem auch noch gegen Magnetfelder recht unempfindlich. Der Preis ist schon mehr als konkurrenzfähig, er liegt bereits unter 100 Euro, Tendenz rapide fallend.

Der Erfolgsgeschichte der SiPMs vorausgegangen ist die Entwicklung der Avalanche-Photodiode (APD). Sie arbeitet so ähnlich wie eine Z-Diode für hohe Spannungen. Dort dominiert nämlich beim Durchbruch ebenfalls ein Lawineneffekt das Geschehen, ohne dass das Bauteil dabei Schaden nimmt. Bei der APD löst ein absorbiertes Photon die Lawine aus, und die Lawinen-Vervielfachung der Ladungsträger pro Photon bestimmt die Verstärkung. Dieser Lawinenvervielfachungseffekt mit einer gewissen Verstärkung wird bei jedem absorbierten Photon ausgelöst, so dass der von der APD erzeugte elektrische Strom auch linear vom Photonenstrom (dem Photonenfluss) abhängt. Die Vorspannung der APD wird dabei aber so gewählt, dass beim Enden des Photonenflusses, die Lawine auch von selbst wieder endet. Daraus wurde wiederum die Geiger-Mode Avalanche-Diode (GM-APD) entwickelt. Manchmal wird diese auch als Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) bezeichnet. Bei dieser kann die Spannung so groß gewählt werden, dass der Lawineneffekt so stark zunimmt, dass sich der Strom von selbst erhält, also nicht von selbst wieder stoppt und dabei dann in eine Art Sättigung geht. Die Spannung, ab der die Lawine nicht mehr von selbst stoppt wird als Durchbruchspannung bezeichnet. Nach einer bestimmten Zeit löscht man die Lawine aber wieder aktiv (active-quenching) oder man sorgt durch einen Widerstand dafür, dass die Spannung wieder unter die Durchbruchsspannung fällt und die Lawine dann doch wieder von selbst erlischt (passive quenching). Das hat den Vorteil, das ein einzelnes Photon ein bestimmtes Ladungsquantum (Strompuls) erzeugt, welches einem Photon entspricht und auf der anderen Seite durch die Stromsättigung eine statistisch viel

determinierter und damit rauscharmer Ladungsimpuls entsteht. Auf diese Weise kann man schließlich einzelne Photonen zählen. Im Prinzip ist das auch genau das, was in einem Geiger-Müllerzählrohr abläuft, das im Geiger-Plateau betrieben wird. Jedes absorbierte Strahlungsquantum erzeugt dabei durch Lawinenvervielfachung auch einen kurzen Stromfluss, dessen Dauer durch das Löschgas begrenzt wird, und den man genauso als feste Ladungsmenge (Stromimpuls) auffassen kann.

Zum SiPM kommt man schließlich indem man nun ein ganzes Feld von GM-APDs auf einen Chip integriert. Das passive Quenching kann in Form eines Polysilizium-Widerstands ganz ökonomisch neben einer APD-Fläche realisiert werden, beides zusammen lässt sich in einer wenige Mikrometer großen quadratischen Zelle unterbringen. Dann werden alle Zellen bestehend aus APD und Quenching Widerstand mit der Kathode bzw. Anode an einen Anschluss des SiPMs gelegt und das freie Ende aller Quenching-Widerstände an den anderen Anschluss.

Abb. 1: 4x4mm SiPM des Herstellers First Sensor mit 9340 GM-APD Zellen (der rötlich schimmernde Chip rechts neben der Bezeichnung SiPM-NUV4S-SMD)

Wenn nun ein Photon auf das SiPM trifft wird eine Zelle „gezündet“ und gibt einen Ladungsimpuls ab. Treffen mehrere Photonen auf das SiPM, werden mehrere Zellen gezündet und es entsteht ein entsprechendes Vielfaches der Ladungsmenge als kurzer Impuls. Das heißt die Summe der Ladungspunkte ist gequantelt und entspricht der absorbierten Photonenzahl. Das Ganze geht natürlich nur bis alle Zellen gezündet werden, mehr Ladung kann dann nicht mehr erzeugt werden. So gesehen verhält sich das Ganze am Ausgang wie ein DA-Wandler, der auch nur 2^N diskrete Signalwerte am Ausgang erzeugen kann. Die Zellenzahl von SiPMs liegt derzeit in einem den üblichen DA-Wandlern vergleichbaren Zahl an erreichbaren Quantisierungsstufen, also auch etwa zwischen 2^{10}-2^{16}.

Da die Quantisierungsstufe eines von einem Photon ausgelösten APD-Ladungsimpulses wie beim DA-Wandler sehr klein ist, erhält man mit einem SiPM im normalen Betriebsbereich ganz vergleichbar ein quasi-analoges Ausgangssignal, welches dem Photonenfluss proportional ist.

Der deutsche Hersteller First Sensor aus Berlin stellt nun SiPMs so her, dass sie einmal mit einer moderaten Durchbruchspannung von 26V plus max. 6V Overvoltage betrieben werden können und zum anderen im nahen Ultraviolett ihre maximale Licht-Absorption aufweisen (es gibt natürlich etliche andere Hersteller wie beispielsweise Hamamatsu, SensL, AdvanSiD usw.). Die spektrale Empfindlichkeit im nahen Ultraviolett prädestiniert diese SiPMs für den Einsatz mit Szintillationskristallen wie NaI, LYSO und anderen. Der Haupttreiber für diese Größe an SiPMs dürfte die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) sein, ein neues nuklearmedizinisches Diagnose-Verfahren, wo es um 3D-Abbildungen ähnlich wie bei der Kernspin- oder Computertomographie geht. Für so einen PET-Scanner braucht man einen Ring mit unzähligen Szintillationsdetektoren, welche die Emissionen der 511keV-Annihilierungsstrahlung der Positron-Elektron Rekombination ortsabhängig registrieren sollen.

Es ist nun nicht ganz einfach als Hobby-Bastler die sogenannten Single-Photon Events nachzuweisen um nachzuprüfen, ob so ein SiPM auch wirklich einzelne Photonen zählen kann. Mit einem nicht ganz unerheblichen gerätetechnischem Aufwand bekommt man es aber doch hin. Dagegen wäre es vermutlich ein unangemessener Aufwand einen Generator zu bauen, der einzelne Photonen aussendet um diese dann nachzuweisen. Was man aber machen kann, ist die Photonen, die als Dunkelstrom (Dark Current) im SiPM selbst entstehen versuchen nachzuweisen.

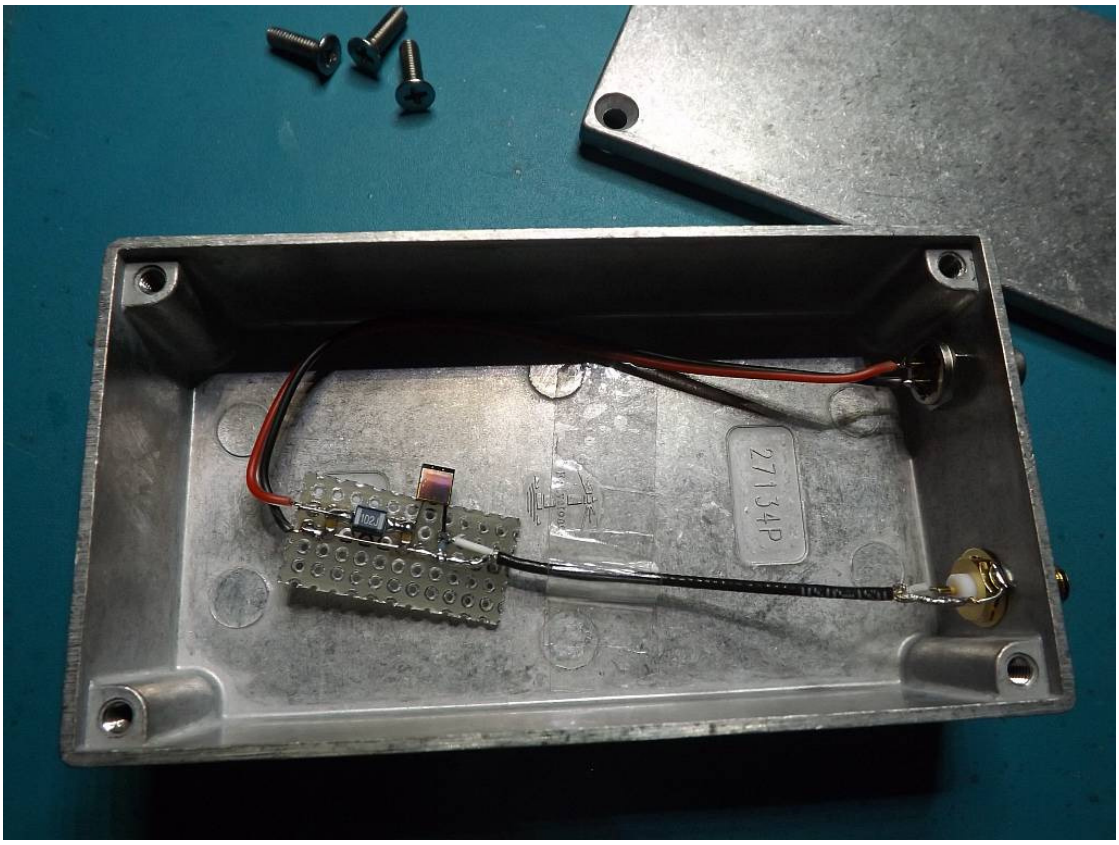

Abb. 2: SiPM Adapter mit 50Ohm Lastwiderstand und kapazitiver Auskopplung

Was man für die Messung des Dark Current und der Single-Photon Events benötigt ist zunächst einmal eine absolut rauscharme präzise Einstellung der Betriebsspannung (Biasspannung) des SiPMs. Jede Störung, die auf dieser Spannung Vbias sitzt, ist nachher im Signal enthalten. Ein Schaltnetzteil wie es heute vorherrschend verwendet wird, ist ohne spezielle Filterung eine schlechte Wahl. Ein guter und günstiger Startpunkt dagegen ist eine Batterie. Man kann sich diese aus vier Alkaline 9V Blocks zusammenbauen, was 36V ergibt und genügend Spielraum für eine ordentliche Regelung bietet. Als Regler bietet sich der Allerweltsregler LM317 an, der als einstellbarer, floatender Regler bis hoch auf 37V regeln kann. Mit ihm wird dann Vbias als Summe aus Breakdown Voltage Vbr und Overvoltage Vov eingestellt. Das Angenehme der SiPMs von First Sensor ist, dass sie eine Vbr von lediglich 26V haben. Rechnet man noch einmal 4V für Vov drauf liegt man schließlich bei 30V.

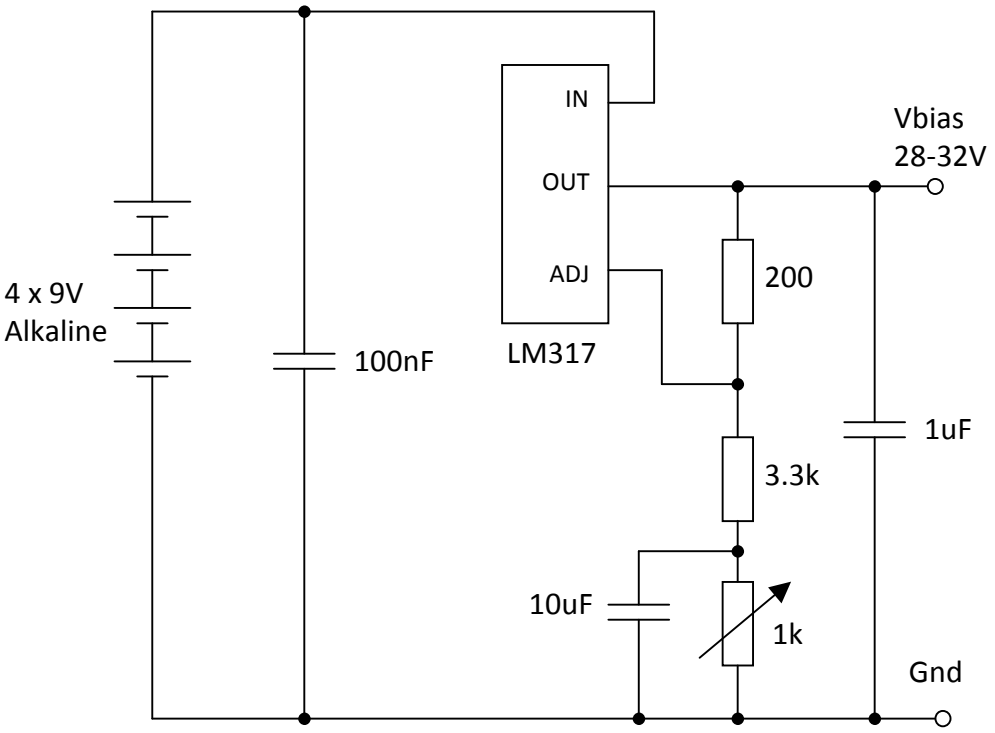

Abb. 3: Geregelte Stromversorgung für die Biasspannung des SiPM

Als nächstes benötigt man einen Adapter an das SiPM, welcher die Biasspannung zuführt und das Signal an einem Lastwiderstand auskoppelt. Dafür gibt es unzählige Möglichkeiten, die auch vom Typ des SiPM selbst abhängen. Üblicherweise sind sie auch im Datenblatt beschrieben. Als Lastwiderstand sind gelegentlich 1kOhm oder sogar mehr genannt. Das aber geht nur, wenn unmittelbar auf den Lastwiderstand ein Verstärker sitzt, der die Impedanz in 50ohm wandelt. Für einen Prototypentest ist es dagegen günstiger man benutzt nur 50Ohm als Lastwiderstand, da man dann eine koaxiale Leitung zu einem externen Laborverstärker nutzen kann, ohne dass es zu Reflexionen auf der Leitung durch eine Fehlanpassung kommt. Die 50ohm reduzieren zwar die Spannung erheblich, da sich das SiPM wie eine Stromquelle verhält (der Quenching-Widerstand ist einige 100kOhm groß). Man muss den kleineren Spannungsabfall am 50ohm dann über eine entsprechende Verstärkung des Signals auffangen. Das ist aber mit Laborverstärkern durchaus möglich, die in der Regel für 50ohm ausgelegt und korrekt terminiert sind. Diese Leitungsterminierung ist

wichtig, da die Pulse sehr kurze Flanken im Bereich von wenigen ns aufweisen. Als Verstärkungsfaktor braucht man wenigsten 10x (20dB), da die Impulse von Single Photon Events an 50ohm typischerweise nur wenige 100uV groß sind und selbst ein gutes Oszilloskop als kleinsten Spannungsbereich nur bis 1mV/div anbietet.

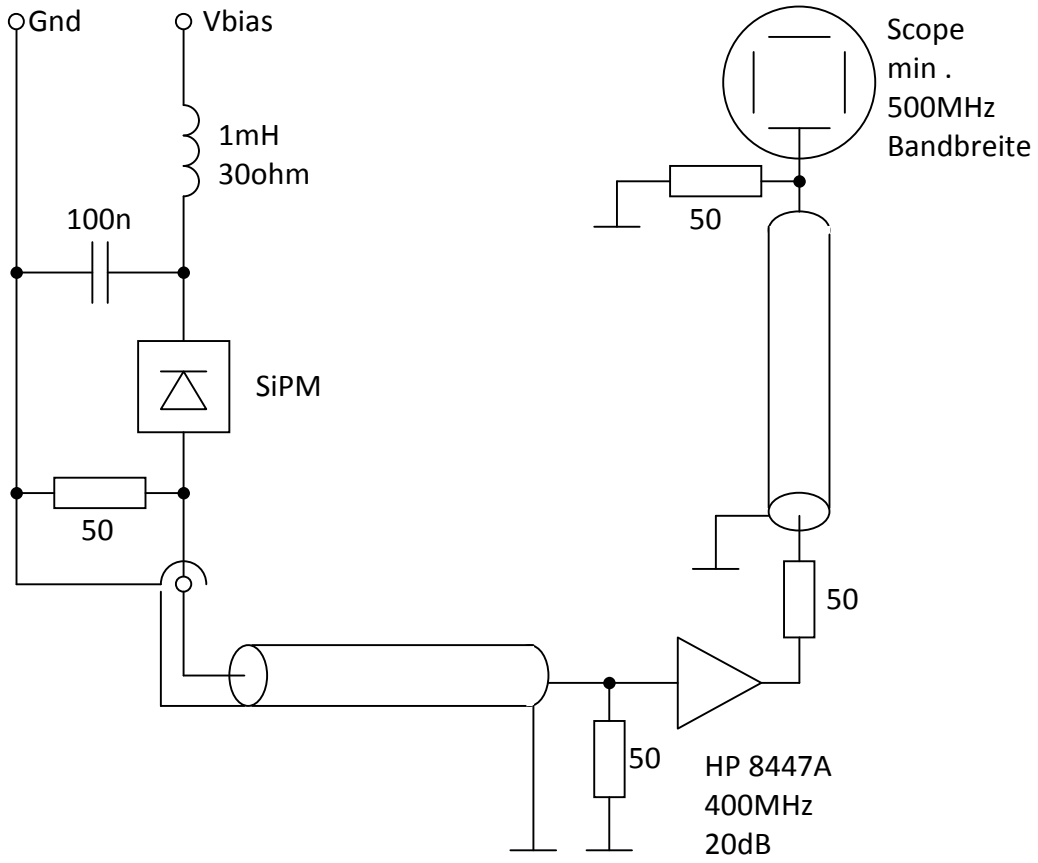

Abb. 4: SiPM Adapter und Anordnung zur Messung der Single Photon Events im Dark Current

Man kann sich den Verstärker natürlich auch selbst bauen, aber man muss dabei beachten, dass er rauscharm ausgelegt wird und den Faktor 10 an Verstärkung, den man in etwa benötigt, bei einer Bandbreite von wenigstens 100MHz erreicht. Das bedeutet, dass das Verstärkungs-Bandbreite Produkt (GBWP) des Halbleiters-ICs (OP) wenigstens 1GHz sein sollte und man das nicht so einfach auf einer Lochraster Platine aufgebaut bekommt. Dazu muss man dann schon eine Platine entwerfen und dabei gewisse Regeln für sehr hohe Frequenzen einhalten. Die andere Alternative wäre, man besorgt sich ein sogenanntes Evaluation-Board eines Halbleiter-Herstellers, der so einen OP anbietet. Ein Beispiel für einen derartigen OP wäre der AD8099 von Analog Devices, der den Gain 10 bei einer Bandbreite von 550MHz hinbekommt und extrem rauscharm ist. Für den gibt es dann auch ein Eval Board, das man vielleicht umsonst bekommt, wenn man beim Hersteller ganz nett anfragt und dem Verkäufer in Aussicht stellt, dass man ein völlig innovatives Produkt entwickelt, wo man später durchaus Stückzahlen von 10000 pro Jahr abnehmen wird, wenn der OP seinen Job besser tut als derjenige der Konkurrenz und das Produkt wirklich fliegt.

Mit so einer Verstärker-Anordnung und einem guten Oszilloskop kann man dann tatsächlich zeigen, dass der Dark Current gequantelt ist und aus Pulsen besteht, wie er Single Photon

und Multiple Photon Events entspricht. Die Dark Current Pulse entstehen nämlich dadurch, dass Ladungsträger auch durch thermische Anregung im Silizium einer Zelle ausgelöst werden können und das Zünden einer Zelle bewirken. Der Verlauf dieser Lawine und der Ladungspuls ist identisch zu einem Photon Event.

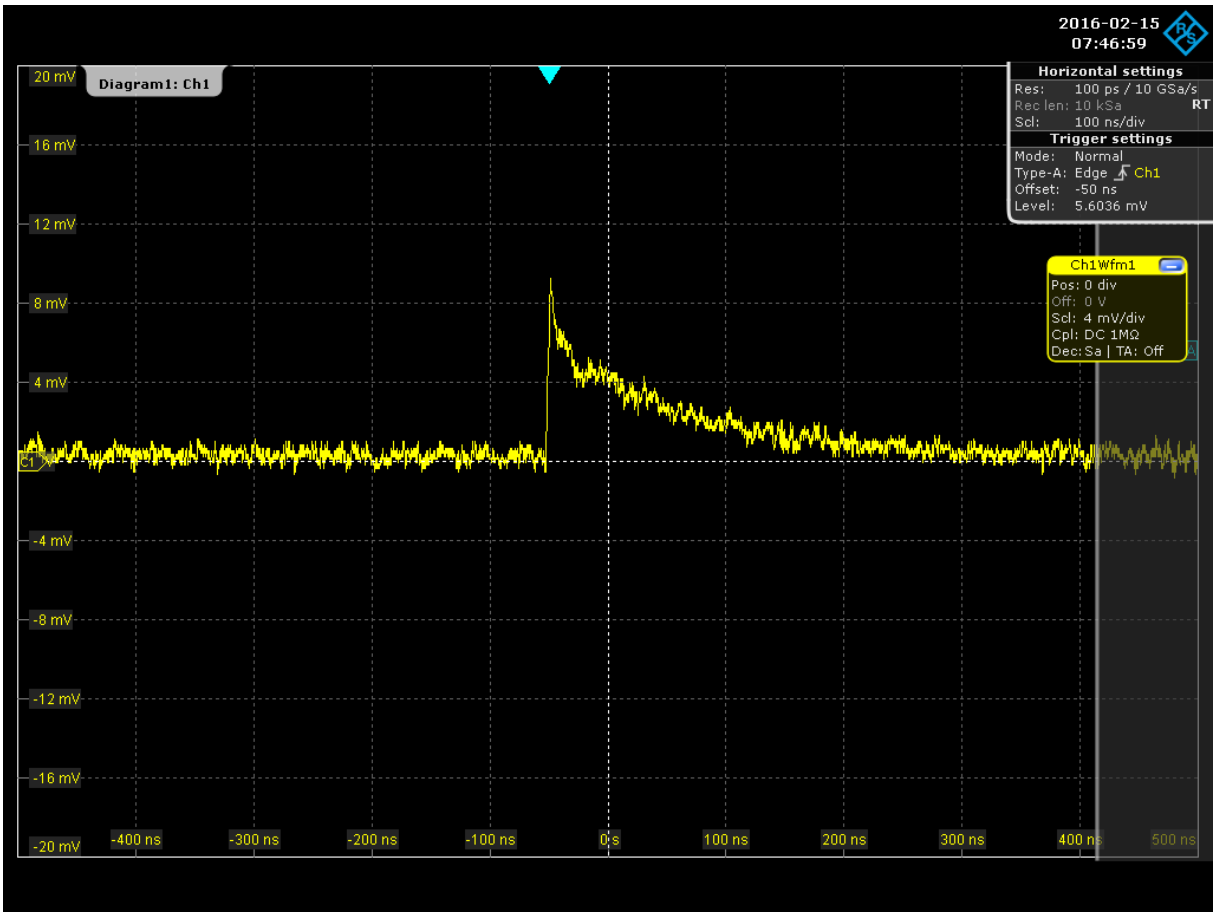

Abb. 5: Multiple Photon Event im Dark Current eines SiPMs von First Sensor bei Vbias=28V

Schaut man sich das Ausgangssignal des SiPMs im Dunkel-Zustand des SiPM an, dann erkennt man Pulse mit einer sehr steilen Anstiegszeit von nur wenigen Nanosekunden und einen langsameren Abfall während der Recoveryzeit der Zelle von rund 100ns. Je nachdem wo man den Trigger-Pegel des Oszilloskops hinstellt, kann man verschieden hohe Pulse erkennen. Wenn man mehrere Trigger Events überlagert, erkennt man bereits, dass die Impulse feste, in etwa gleiche Höhen haben. Bei guten Scopes kann man nun direkt hinter der Rising-Edge zum Trigger Zeitpunkt ein schmales Fenster hinlegen und dort ein Histogramm vieler Kurvenverläufe aufsummieren. Dieses Histogramm spiegelt die Häufigkeit der Impulshöhen wieder und zeigt die Überlagerung mehrerer Gauß-Kurven. Die Gauß-Verteilungen sind sauber getrennt und stellen die Auftrete-Wahrscheinlichkeit des Vielfachen der Ladungsmenge eines Single-Photon Events (1PE) dar. Die Gauß-Verteilung mit der größten Häufigkeit bei der kleinsten Spannung liegt nach der Verstärkung um den Faktor 10 bei etwa 1mV (DC-Offset abgezogen) d.h. am 50Ohm Lastwiderstand ist sie um den Faktor 10 kleiner, also bei 100uV. Also grob gesagt, liegt die kleinste Impulshöhe der Dark Current Pulse bei 2 uA. Bei einer halben Dauer von etwa 50ns entspricht das einer Ladungsmenge von 10pC pro Single Photon Event (PE).

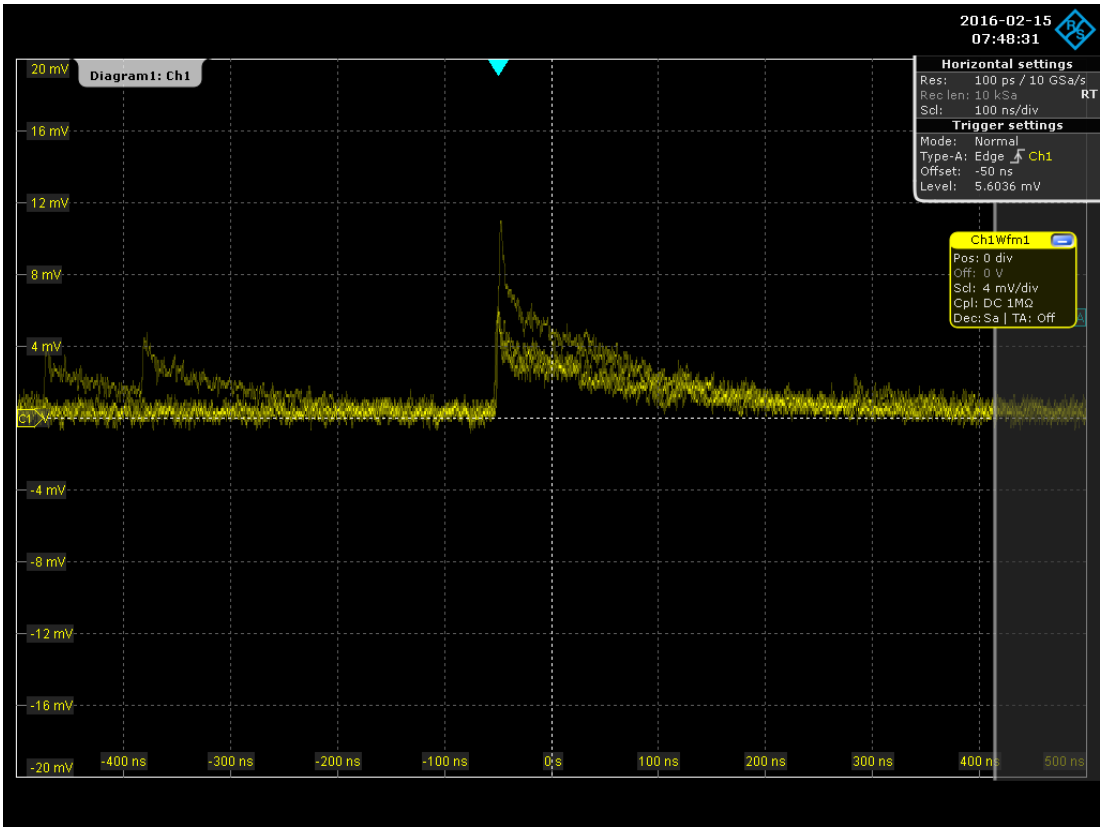

Abb. 6: Überlagerte Multiple Photon Events im Dark Current eines SiPMs

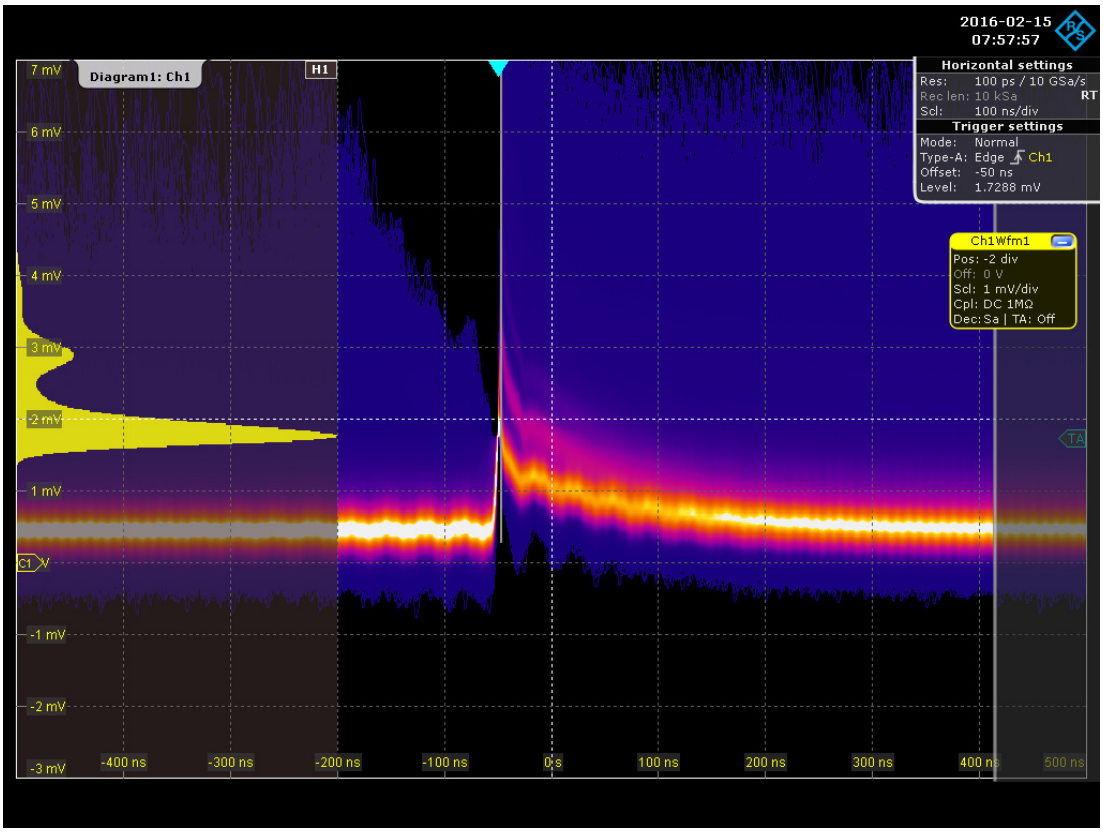

Abb. 7: Häufigkeitsverteilung von 1PE und 2PE Impulsen

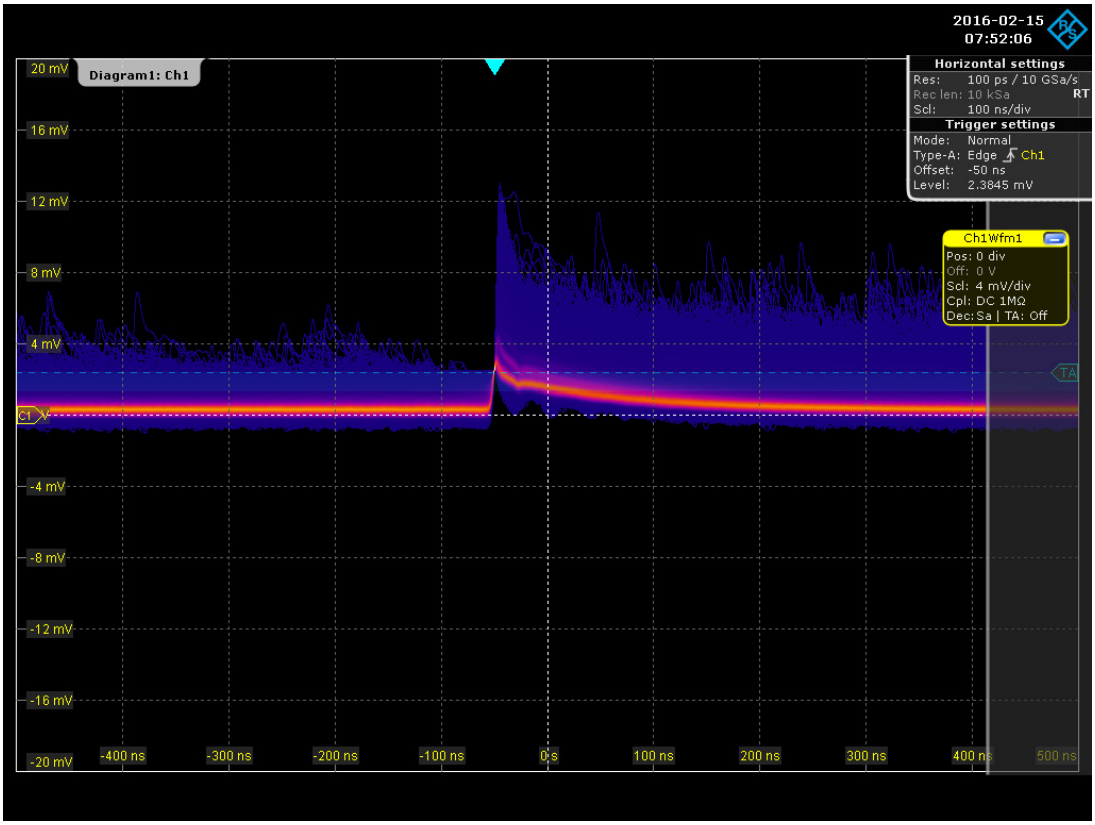

Abb. 8: 2PE und 3PE Impulse im Dark Current des SiPMs

Während das Beobachten einzelner Photon Events im Wesentlichen nur dem Verständnis dient, wird es natürlich erst richtig spannend, wenn man nun das SiPM mit einem Szintillationskristall kombiniert und damit die Photonen ordentlicher Lichtblitze im Kristall zählt. Das verwendete SiPM von First Sensor ist ein Array mit 9340 Zellen, das bedeutet, man ist in etwa auf Impulse mit maximal 934mV Höhe an 50ohm begrenzt. Nun ist es aber so, dass beispielsweise ein NaI Kristall nicht der schnellste ist, d.h. wenn er von einem Gamma-Quantum getroffen wird, dann werden über eine gewisse Zeit Photonen emittiert, die länger als 50ns ist. Dadurch steckt also die Energieinformation eher in der Fläche des Pulses, die man über eine gewisse Zeit am SiPM sehen wird, so dass man mit den 9340 Zellen nicht gleich am Ende ist. Die Zahl der Photonen, die das Kristall pro Gamma-Quantum liefert entspricht damit also der Fläche des Pulses dividiert durch die Fläche eines 1PE Events und dividiert durch die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zelle überhaupt zündet (Photon Detection Efficiency).

Das hier verwendete Szintillations-Kristall ist ein 10x40mm NaI-Kristall aus der Ukraine (Ebay). Es hat einen kleinen Durchmesser und ist dafür relativ lang, hat also schon ein relativ großes Volumen im Vergleich zur Größe des 4x4mm SiPMs. Das SiPM wird mit etwas Silikonöl auf das Kristall gesetzt und dann vorsichtig mit einigen Tesastreifen so fixiert, dass es einen sicheren optischen Kontakt zur Kristalloberfläche hat. Das Ganze wird in einem lichtdichten Alugehäuse verstaut mit einer Wandstärke von etwa 1mm. Da das NaI-Kristall ebenfalls in einem Topf aus Alu untergebracht ist, kann man davon ausgehen, dass für die hier verwendeten Proben weitestgehend nur Gammastrahlung das Kristall erreichen kann.

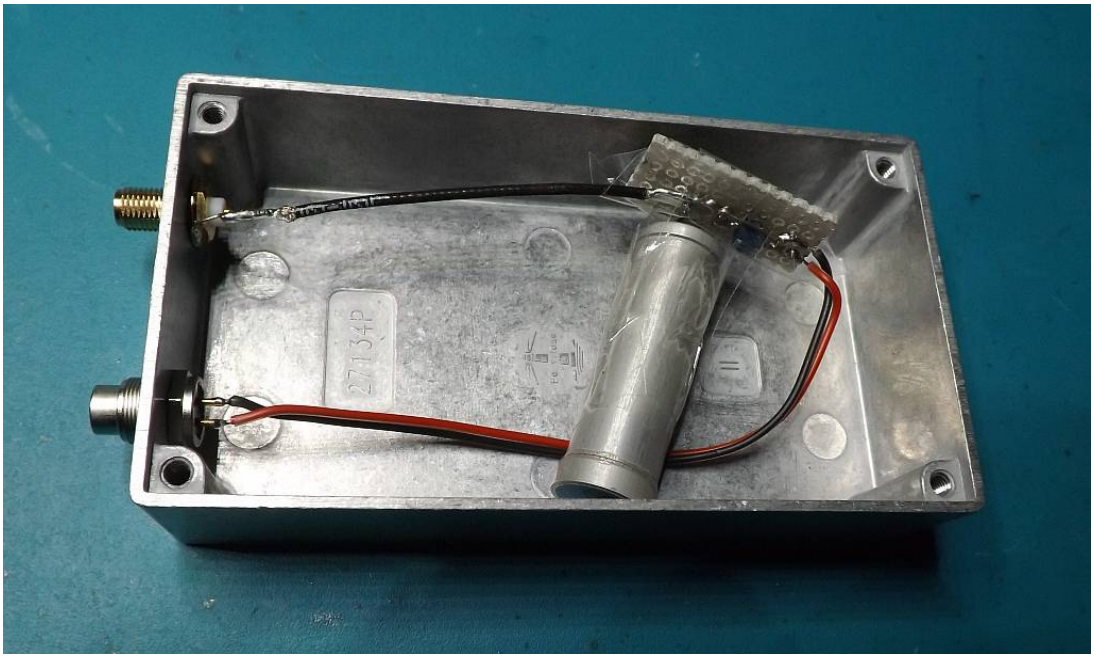

Abb. 8: SiPM Adapter mit aufgesetztem NaI-Kristall

Bei Verwendung eines Kristall ist jetzt kein weiterer Verstärker nötig und auch die Anforderungen an die Bandbreite des Scopes sind jetzt nicht mehr so hoch. Behält man die Eingangsimpedanz von 50Ohm bei (bei längerem Kabel zur Vermeidung von Reflexionen), dann sieht man sehr saubere, kräftige Pulse im mV Bereich. Die sauberste Darstellung erhält man, wenn man die Bandbreite zur Filterung auf 1MHz künstlich reduziert. Durch Variation der Filterbandbreite am Scope kann man erkennen, dass bei 10MHz Bandbreite die Steilheit der Pulse und die Pulshöhe nur noch wenig zunimmt, dafür aber verrauschter wird.

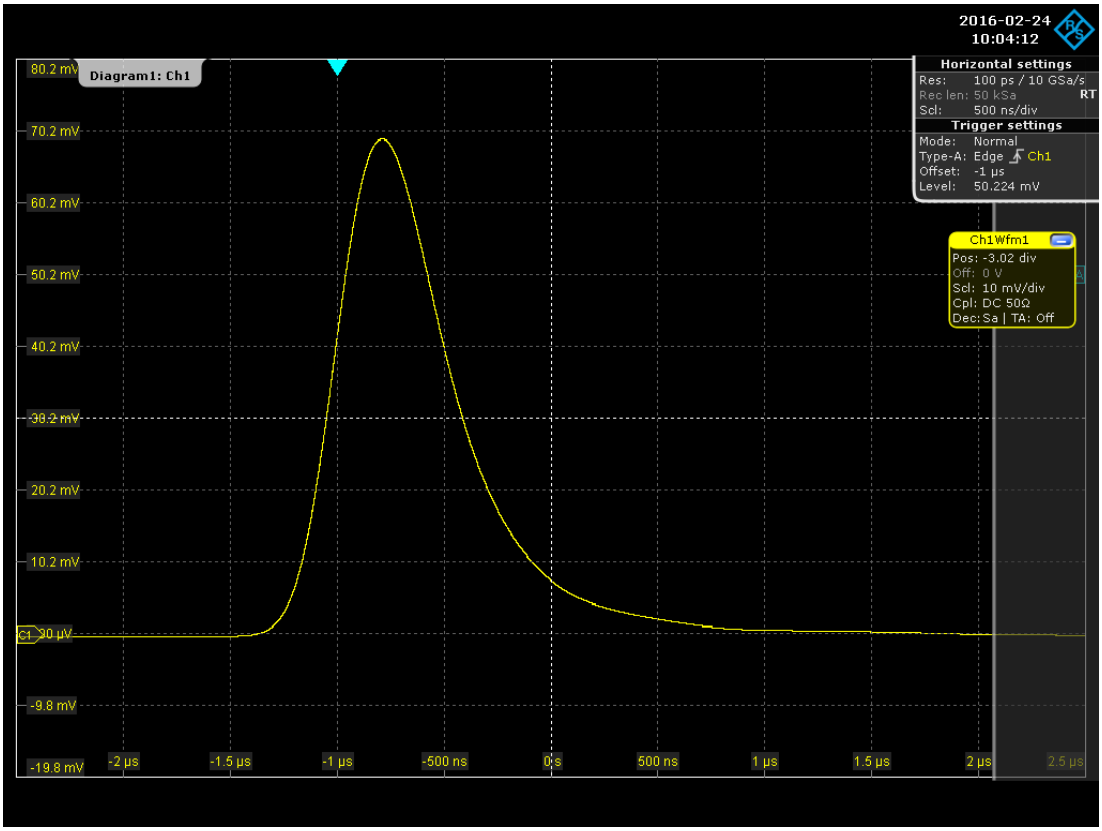

Abb. 9: Ausgangsimpuls des SiPMs mit aufgesetztem NaI-Kristall bei 1MHz Bandbreite

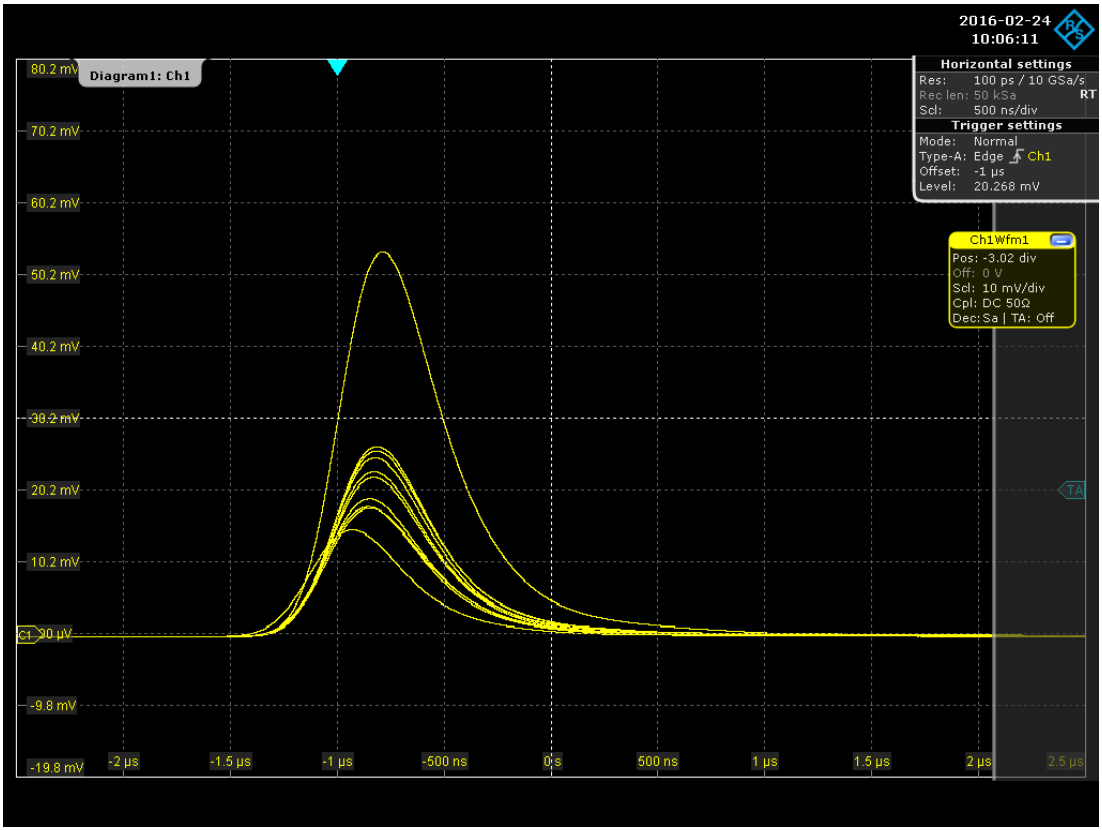

Abb. 10: Mehrere Ausgangsimpulse des SiPMs mit aufgesetztem NaI-Kristall bei 1MHz Bandbreite

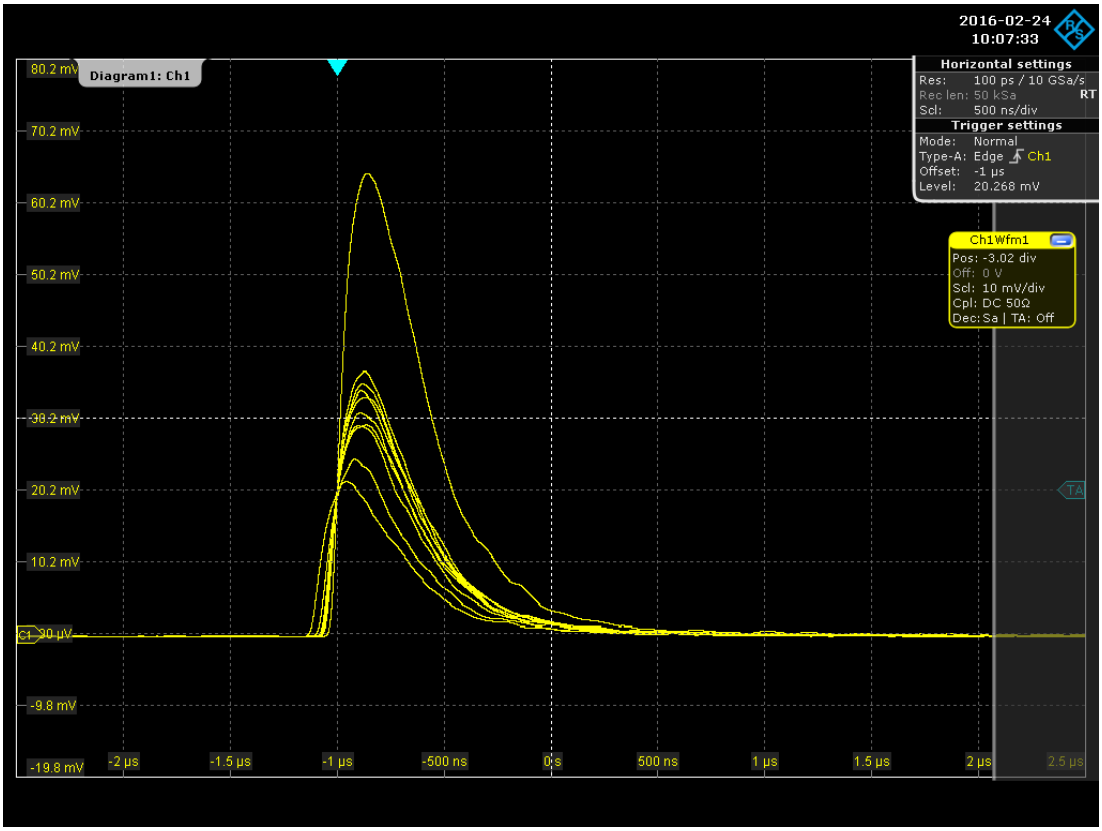

Abb. 11: Mehrere Ausgangsimpulse des SiPMs mit aufgesetztem NaI-Kristall bei 10MHz Bandbreite

Schließlich kann man wieder mit Histogrammen experimentieren um bei Verwendung verschiedener Proben die Häufung der Kurven bei verschiedenen Amplituden zu untersuchen. Dies gibt einen Hinweis in wieweit die Pulshöhe eine Energieproportionalität aufweist. Da sich die Dauer der Pulse dabei aber ändert, ist dies nur sehr grob möglich.

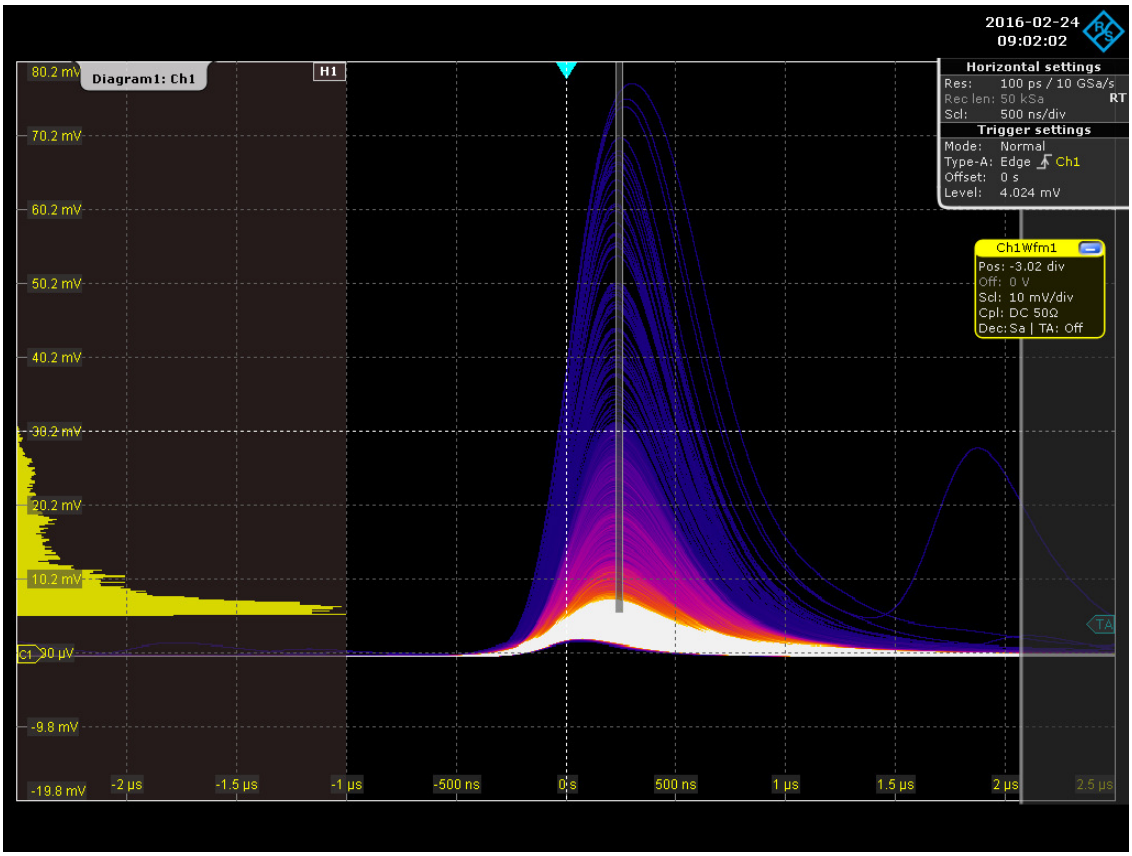

Abb. 12: Histogramm einer Thoriumprobe im SiPM Ausgangssignal

Im Histogramm einer Thorium-Probe (thoriumhaltiger Sand) kann man außer einer starken Häufung bei niederem Pegel (unter 10mV) nur noch einen kleinen Buckel bei etwa 18mV erkennen. Im Histogramm an einer Cs137 haltigen Spar Gap Röhre sieht man allerdings ein ausgeprägtes zweites Maximum bei etwa 7mV während die davon deutlich abgesetzte Verteilung bei Pegeln unter 5mV liegt. Was sich hier bereits abbildet, ist die Cs137 Linie bei 662keV, das darunterliegende Compton-Tal und die Compton-Streuung bei niederen Energien.

Interessant sind aber auch die sehr wenigen Kurven bei sehr hohen Pegeln, die bis über 70mV reichen. Sie dürften wohl aus der Höhenstrahlung stammen, denn selbst die unvermeidlichen Radon-Folgeprodukte in Wohnräumen erzeugen kaum so hohe Gammaenergien.

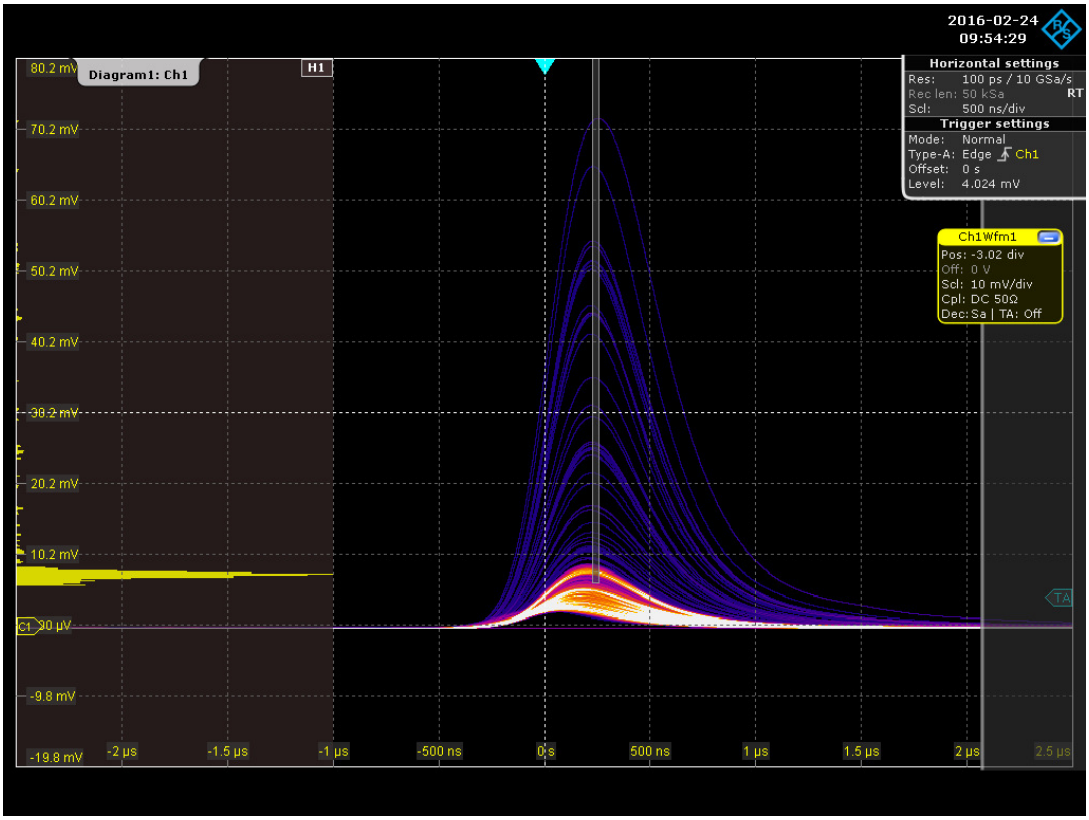

Abb. 13: Histogramm einer Cs137 Probe (Spark Gap Röhre) im SiPM Ausgangssignal

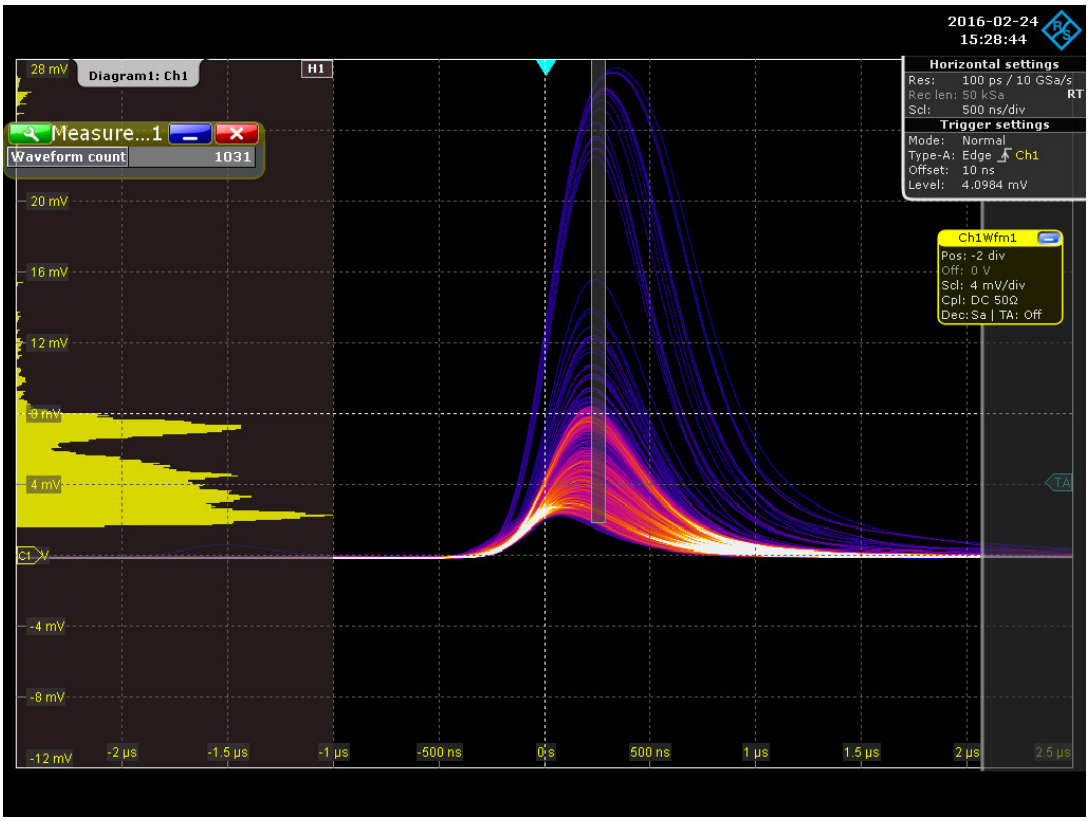

Abb. 14: Stärkerer Zoom in das Histogramm der Cs137 Probe

Aus diesen Messungen wird nun aber ersichtlich, dass die benötigte Bandbreite für die Verstärkung der NaI-Impulse nicht mehr so sehr groß sein muss wie im Falle der Single Photon Events. Eine Bandbreite von 1MHz wäre völlig ausreichend um die Impulse

einigermaßen originalgetreu abzubilden. Noch entspannter wird die Situation aber, wenn man bedenkt, dass sowohl für eine normale Zählanwendung im Niedrigdosisbereich wie auch für eine Low-Cost Spektroskopie mit der PC-Soundkarte und einer PC-MCA Software wie beispielsweise der von Theremino die Impulsdauer mindestens in der Größenordnung von 100us liegen sollte. Bei einer Samplingrate von 192kSps liegen die Abtastwerte ungefähr 5us auseinander. Bei einer Impulsdauer von 100us kämen so im Mittel 19.2 Abtastwerte auf einem Impuls zu liegen, was für die Theremino Software völlig ausreichend wäre um den Impuls gut zu erfassen. D.h. man muss also aus den ca. 500ns kurzen Impulsen des NaI-Kristalls durch eine lineare Abbildung Impulse mit ca. 100us Dauer generieren. Diese Aufgabe kann ein speziell entworfenes Tiefpassfilter zur Impulsformung leisten, ein sogenannter „Pulse-Shaper“.

Da das Eingangssignal in den Pulse-Shaper ein sehr kurzer Impuls ist, im Vergleich zu seiner Impulsantwort, kann man beim Entwurf des Tiefpassfilters davon ausgehen, dass der Tiefpass durch einen infinitesimal kurzen Impuls angeregt wird (Dirac-Stoß). Das gewünschte Ausgangssignal ist also ungefähr die Impulsantwort des Filter-Netzwerks auf einen Dirac-Stoß. In der Anwendung von Pulse-Shapern mit Multi-Channel-Analyzern (MCAs) hat sich gezeigt, dass Impulse mit Gauß-förmiger Impulsantwort die günstigsten sind. Daher kann man beim Entwurf eines Pulse-Shapers zunächst ein Synthesetool für analoge Filter benutzen (zum Beispiel AADE) um ein Gauß-Filter für etwa 10kHz zu synthetisieren. Meist sind 3 Pole (erzeugt durch 2 Kapazitäten und eine Induktivität als Pi-Struktur) für diese Zwecke völlig ausreichend. Ausgehend von den durch das Filtertool berechneten Werten kann man nun mit Bauteilewerten aus den üblichen E-Reihen der passiven Komponenten versuchen der gewünschten Impulsantwort möglichst nahe zu kommen. Mit 3 LC-Komponenten wird man noch keinen voll symmetrischen Impulsantwort erreichen, das ist aber auch nicht unbedingt nötig. Wichtig ist nur, dass das Filter beim Ausschwingen nicht klingelt.

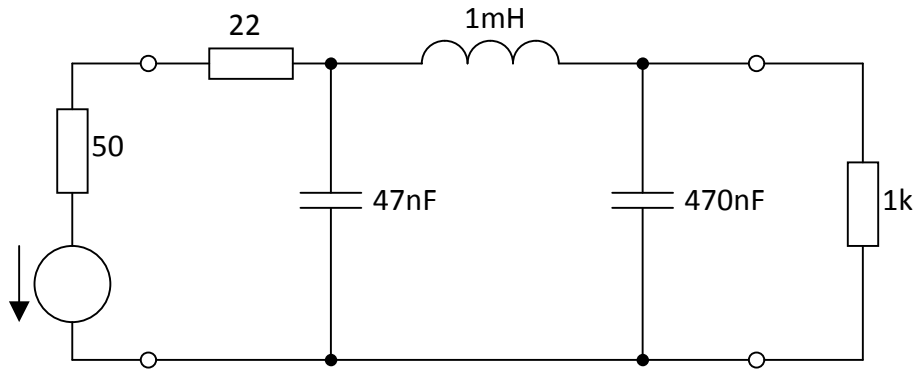

Abb. 14: Passives LC-Tiefpass-Filter als Pulse-Shaper, der die SiPM Pulse auf eine verarbeitbare Impulsdauer mit 100us und angenäherter Gauß-Form bringt.

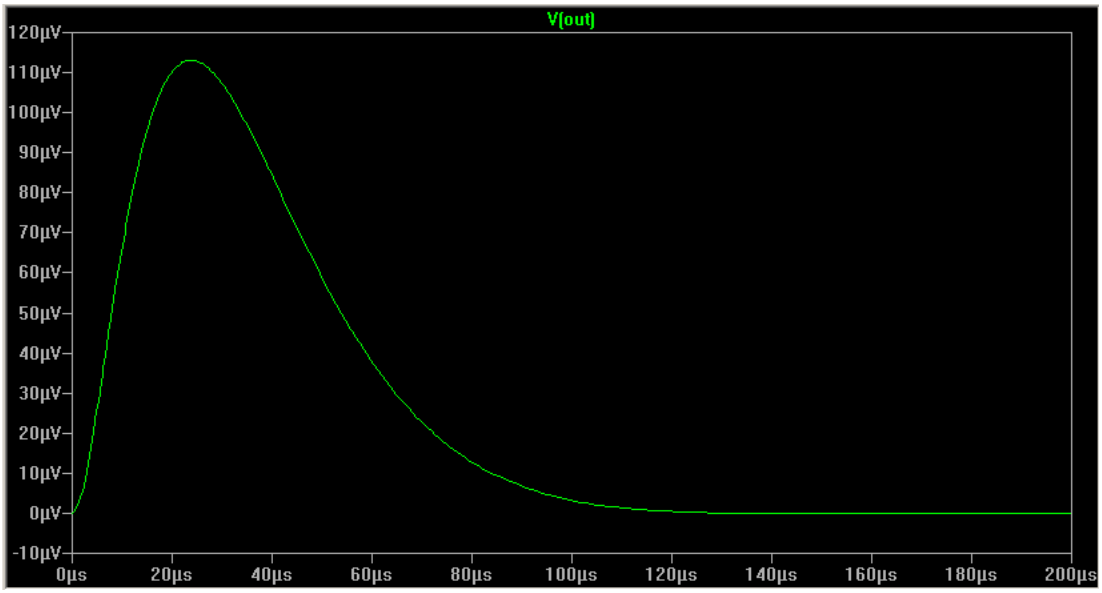

Abb. 15: Mit LT-Spice simulierte Impulsantwort des Pulse-Shapers

Für die Signalverarbeitung in einem linearen System ist es völlig gleichgültig in welcher Reihenfolge man die Funktionsblöcke anordnet. Deswegen kann man zunächst den Puls-Shaper verwenden und danach einen Verstärker, der jetzt eine noch geringere Bandbreite aufweisen muss, die sich an den 100us langen Impulsen des Pulse-Shapers orientiert. Dafür sind lediglich etwa 10kHz Bandbreite nötig. Meist ist die Induktivität relativ fest vorgegeben (das Größte was man in handlicher Bauform kaufen kann) und daran muss man im wesentlichen die anderen Bauteile anpassen. Es zeigt sich aber, dass man die 100us Impulsdauer mit moderaten Bauteile-Werten durchaus brauchbar hinbekommt, allerdings nur auf Kosten der Impulshöhe, was aber aus Energieerhaltungsgründen auch so sein muss. D.h. aber, der Verstärker kann nun weniger Bandbreite haben, aber er muss auch wieder mehr verstärken. So gesehen bleibt das notwendige Verstärkungs-Bandbreite-Produkt durch den Einsatz des Pulse-Shapers weitestgehend unbeeinflusst. Man benötigt nun also wieder eine Verstärkung von etwa 100 (20dB) um zu brauchbaren Amplituden zu kommen. Ein OP der das bei relativ wenig Rauschen und einer hochohmigen Beschaltung, die den Pulse-Shaper nicht zu sehr belastet, erreichen kann, ist beispielsweise der AD8065. Ihn kann man mit einem Gain-Widerstand von 1kOhm, der den Eingangswiderstand festlegt und einem Feedback-Widerstand von 100kOhm beschalten um die Verstärkung von 100 zu erreichen. Für eine Single-Ended Spannungsversorgung von 10V muss man mit einem Spannungsteiler eine virtuelle Mitte erzeugen, was einen 5V DC Offset erzeugt. Bevor man mit dem Ausgang auf die PC Soundkarte kann, sollte man diesen DC-Anteil besser wieder abtrennen, denn man kann nicht immer sicher sein, ob die Sound-Karte das auch richtig machen würde. Die Auskoppel-Kapazität muss aber genügend groß gewählt werden, nicht dass dadurch ein Unterschwingen des Impulses zustande kommt.

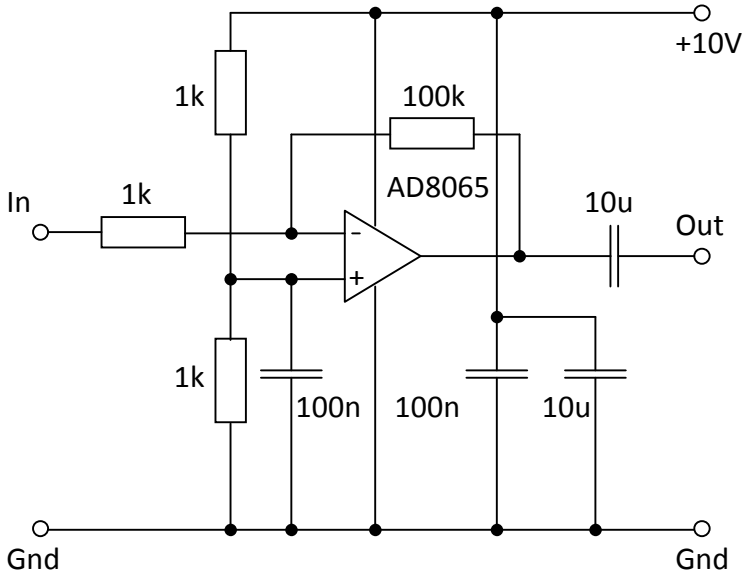

Abb. 16: Verstärker für Zählanwendungen und die Auswertung der SiPM Signale mit einer Spektroskopie über die PC-Soundkarte (e.g. Theremino MCA)

Die am Ausgang des Verstärkers entstehenden Pulse kann man nun genauso gut auf einen Komparator führen und damit ein Strahlungs-Messgerät für Gammastrahlung bauen, das lediglich die Zählrate als Maß für die Radioaktivität bzw. Strahlungsintensität benutzt.

Trotzdem ist es natürlich spannend zu sehen, wie gut eine Spektroskopie mit einem Ansatz über die PC-Soundkarte möglich wäre. D.h. man kann nun das Ausgangssignal des Verstärkers direkt auf eine gute Sound Karte (evtl. externe USB Soundkarte) führen, so wie es das System von Theremino auch macht. Damit ist es dann möglich die Theremino Software zu verwenden, einmal zur primitiven Bestimmung der integralen Zählrate und zum Anderen für eine Spektroskopie.

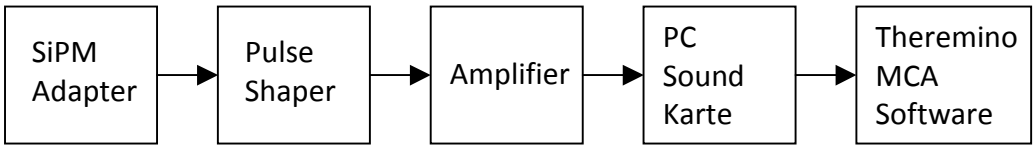

Abb. 17: Signalpfad für die Spektroskopie über die PC-Soundkarte

Um eine Fehlfunktion durch eingekoppelte Störungen durch Störfelder in der Umgebung auszuschließen, empfiehlt es sich ein provisorisch aufgebautes System in die berühmte Keksdose zu stellen. Sie stellt für elektrische Störfelder einen Faraday'schen Käfig dar und für magnetische Felder wird die Schirmung durch Erzeugung von Wirbelströmen erreicht, die wiederum Magnetfelder erzeugen, die der ursprünglichen Störung entgegengerichtet sind. Besonders die hohe Verstärkung macht diese Maßnahme fast zwingend erforderlich.

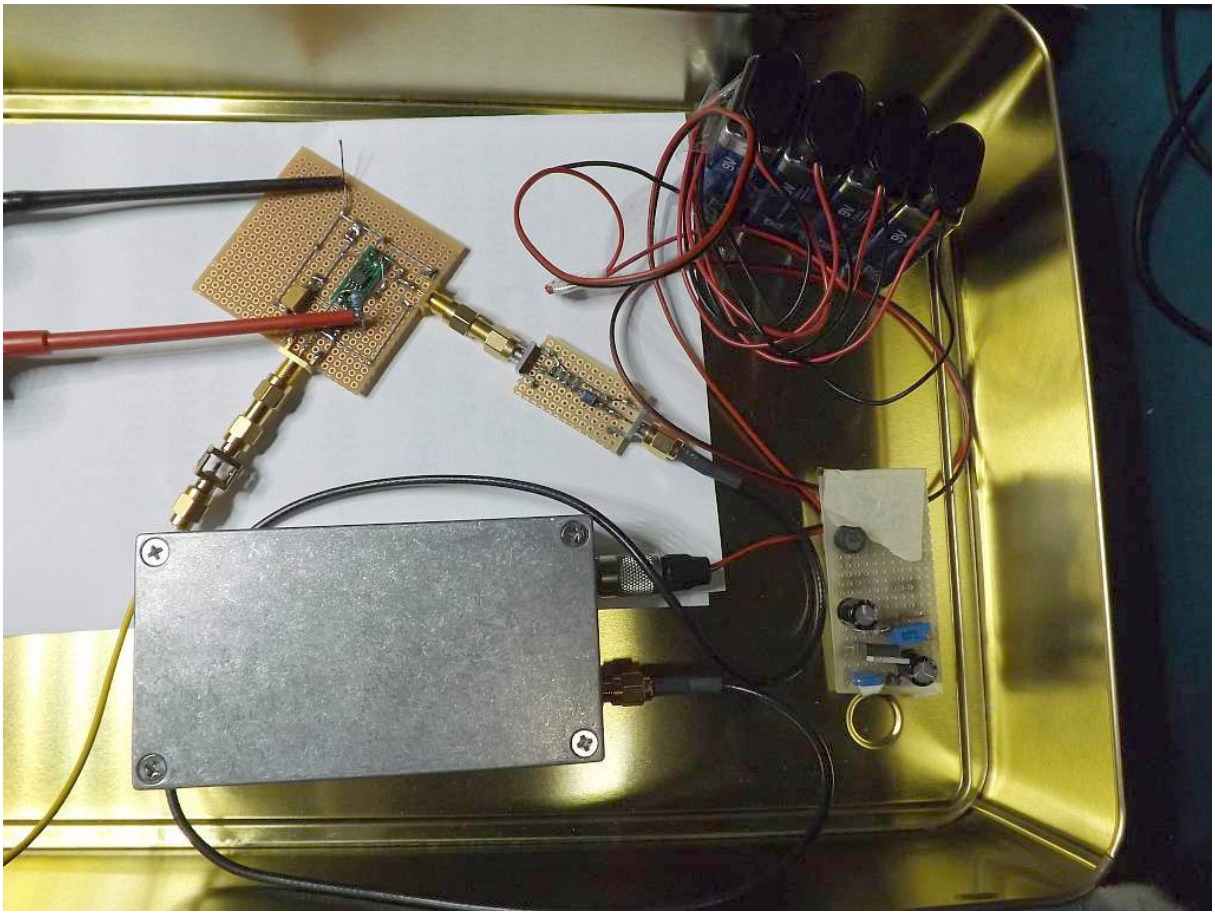

Abb. 18: Aufbau einer provisorischen Anlage zur Gamma-Spektroskopie mit einem SiPM und einem 10 x 40mm NaI Kristall

Mit der gezeigten provisorisch aufgebauten Anlage wurden nun einige Proben spektroskopisch untersucht. Zunächst wurde eine Messung des Hintergrunds vorgenommen, der beiden folgenden Messungen abgezogen wurde. Bei der Hintergrundmessung über 6800 Pulse ergab sich eine Zählrate von 9 Pulsen pro Sekunde, was für den kleinen Kristall durchaus plausibel erscheint. Das Spektrum ist sehr breit, viel breiter als die höchste nachweisbare Gamma-Energie. Möglicherweise gibt es auch eine Wechselwirkung mit Teilchen, die keine Gamma-Quanten sind. Das kann bis jetzt noch nicht plausibel erklärt werden.

Die Am241 und die Lu176 Probe ergeben jeweils sehr scharfe Linien, ganz wie man das erwarten würde. Bei der Radium Probe wird es schon schwieriger. Man kann deutlich Beiträge der Linien des Pb214 erkennen, die allerdings untereinander verschmelzen. Auch die Ra226 Linie, die mit der U235 Linie zusammenfällt, taucht in diesem Gemisch auf. Abgesetzt davon sieht man den Beitrag der Bi214 Linie bei 609keV sehr deutlich. Beim Thorium hat man die Situation, dass man den Hauptbeitrag der Pb212 Linie bei 238keV sehen kann, sowie die Tl208 Linie bei 583keV. Alle schwächeren Linien (z.B. die des Ac228) insbesondere bei höheren Energien gehen im Rauschen unter.

Beim Cs137 wird es dann offensichtlich. Man sieht den Beitrag der 662keV Linie ganz deutlich. Sie erscheint aber auf einem relativ breiten „Fuß“. Vor diesem Photopeak sieht man ein Tal, das sehr wahrscheinlich das Compton-Tal ist, das zwischen den Beiträgen der Compton-Streuung im Kristall und dem eigentlichen Photo-Peak liegt. Vermutlich ist es also

der geringe Durchmesser des Kristalls, der ein deutliches Compton-Rauschen erzeugt, weil etliche Gamma-Quanten nicht ihre gesamte Energie in Photonen umwandeln und vorzeitig den Kristall wieder verlassen. Für eine gute Spektroskopie ist der Kristall also etwas zu dünn. Eine Kalium Probe erzeugt schließlich keinen sichtbaren spektralen Beitrag mehr im erwarteten Bereich um 1450keV.

Aber prinzipiell sieht man ganz deutlich, dass das SiPM und der nachfolgende Signalpfad energieproportionale Signale liefert und auf diese Weise auch ein Spektroskopiegerät aufgebaut werden kann. Vermutlich aber wäre es günstiger einen Kristall mit größerem Durchmesser zu verwenden und mehrere SiPMs auf die Lichtaustrittsöffnung zu setzen und parallel auszuwerten. Beides erhöht den Kostenaufwand allerdings erheblich. Fraglich ist, ob sich dadurch die Breite von Linien bei hoher Energie reduzieren ließen. Am Rauschen im elektronischen Signalpfad kann es nicht liegen, das müsste beim Am241 und Lu176 dann genauso auftreten. Da bei hohen Energien relativ viele Zellen des SiPM gefeuert werden liegt es möglicher weise an der Streuung der Zellen. Dann aber würde ein größerer Kristall auch nichts nützen. Diese Frage kann nicht abschließend beantwortet werden. Was aber deutlich wird ist, dass mit einer derartigen Anordnung ein sehr kleines, leistungsfähiges Messgerät für Gammastrahlung auf Zählbasis gebaut werden kann.

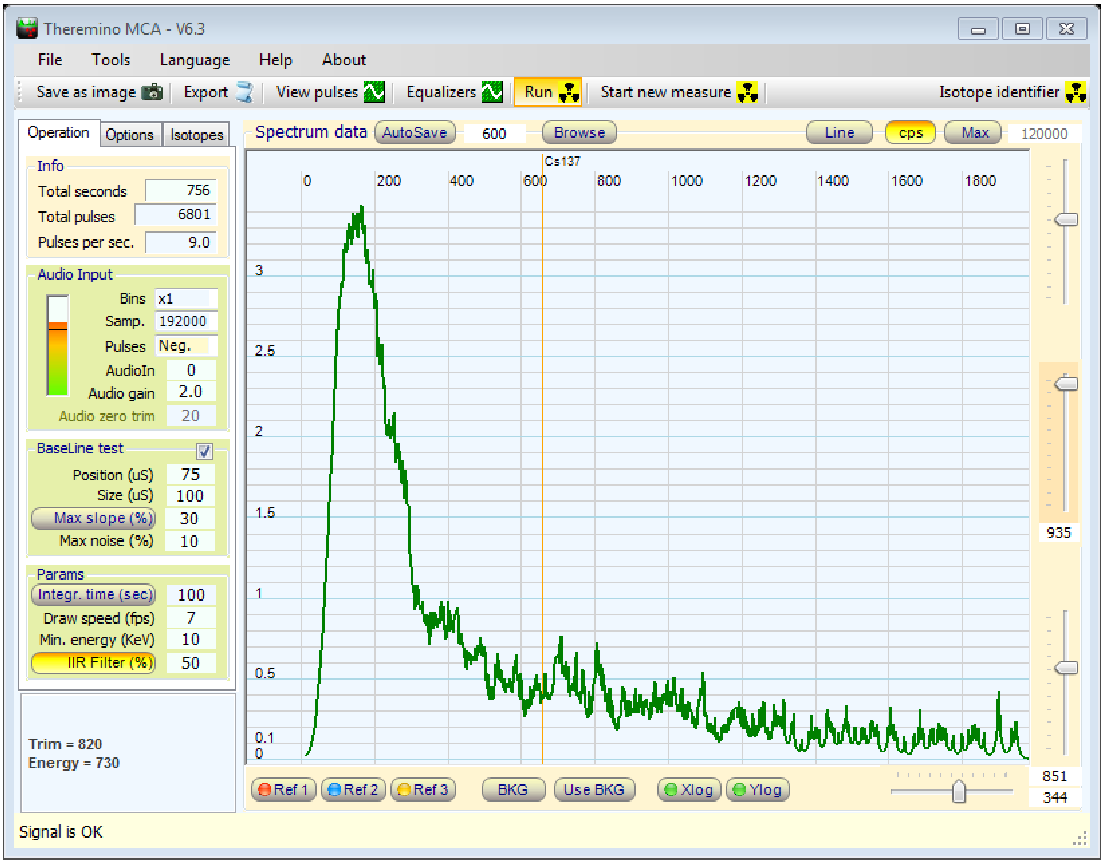

Abb. 19: Background-Messung

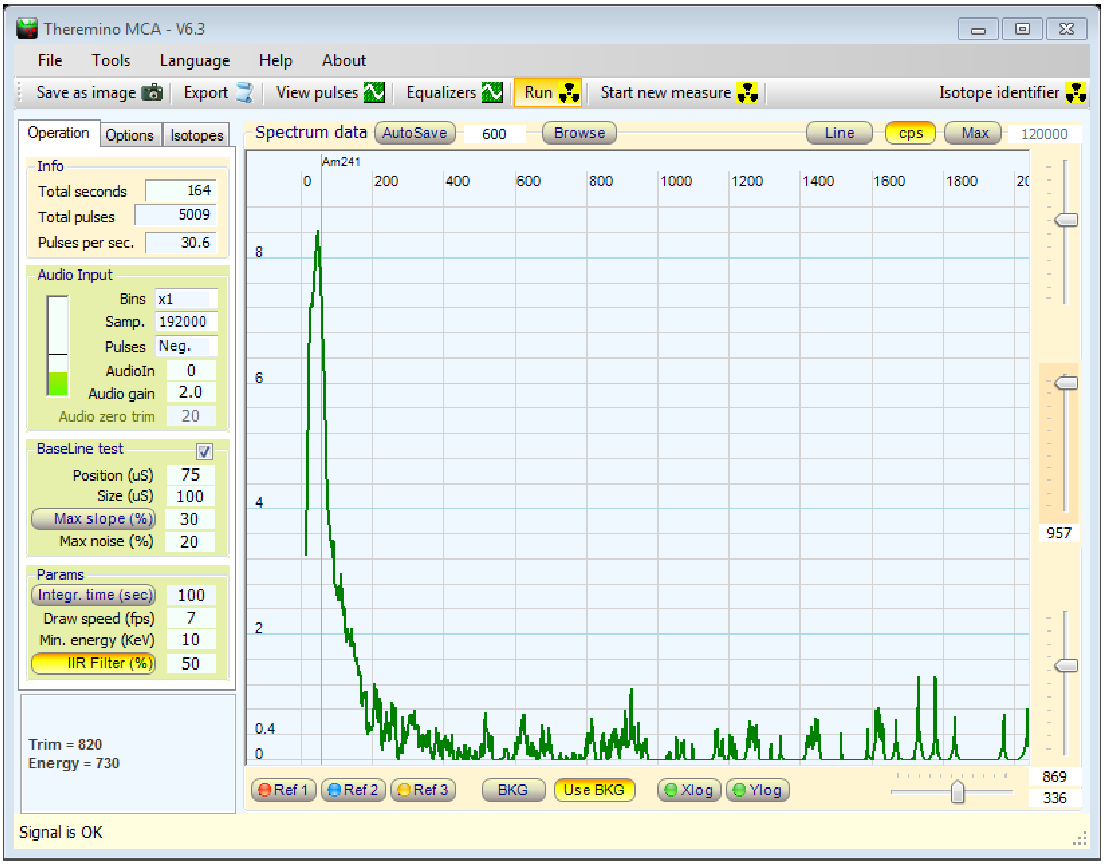

Abb. 20: Spektrum einer Am241 Probe (Rauchmelder) erzeugt mit dem SiPM

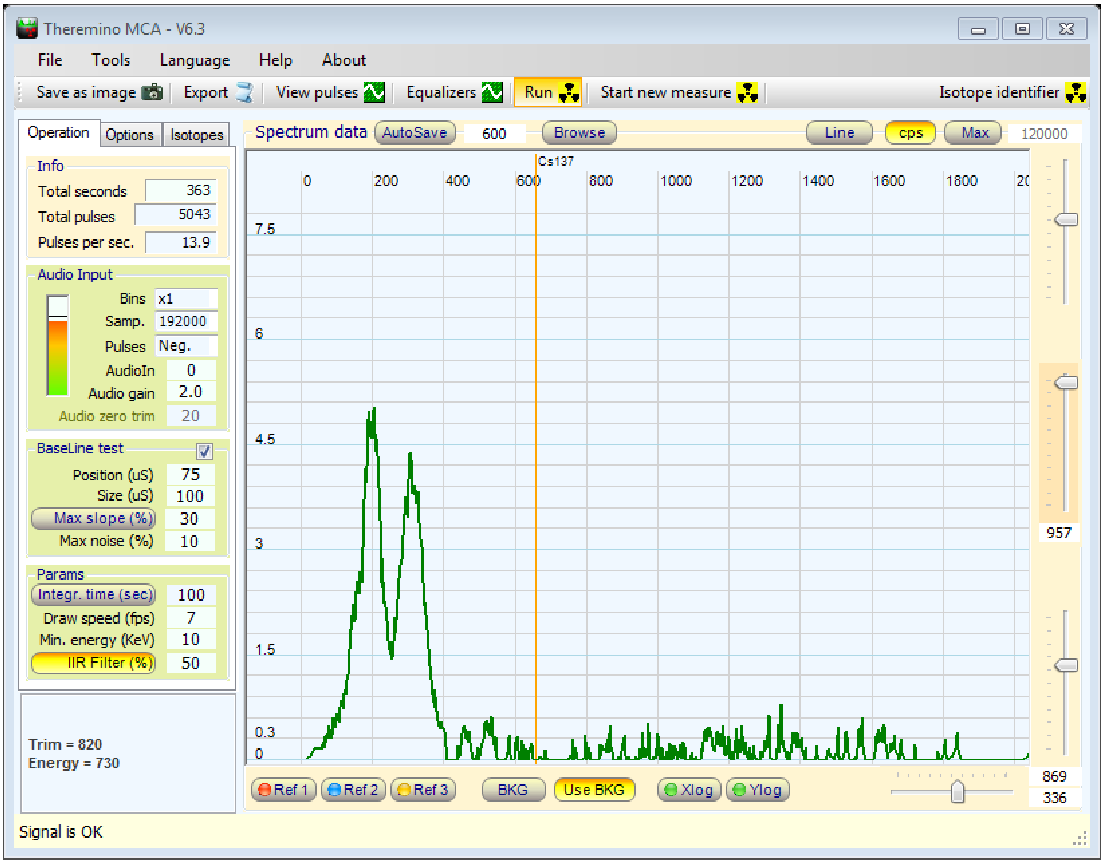

Abb. 21: Spektrum einer Lu176 Probe (Lutetium-Oxid) erzeugt mit dem SiPM

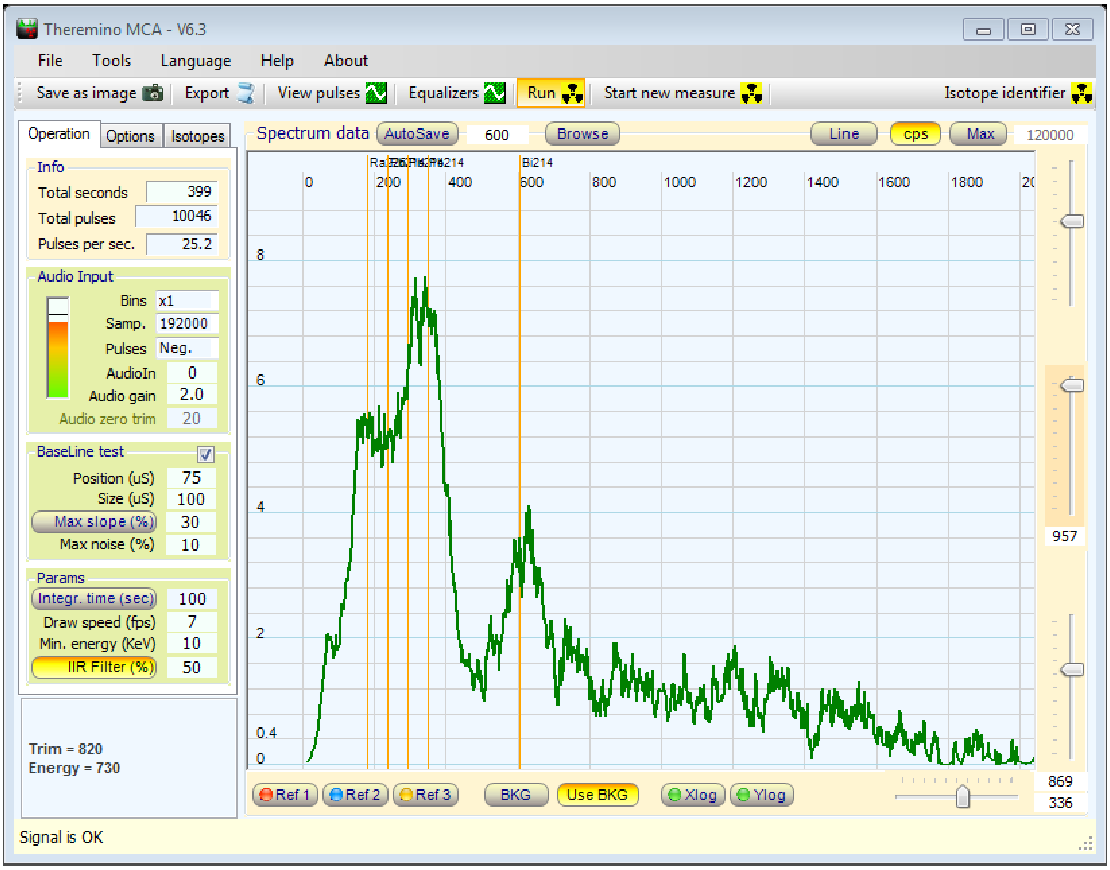

Abb. 22: Spektrum einer Radium Probe (Leuchtzeiger) erzeugt mit dem SiPM

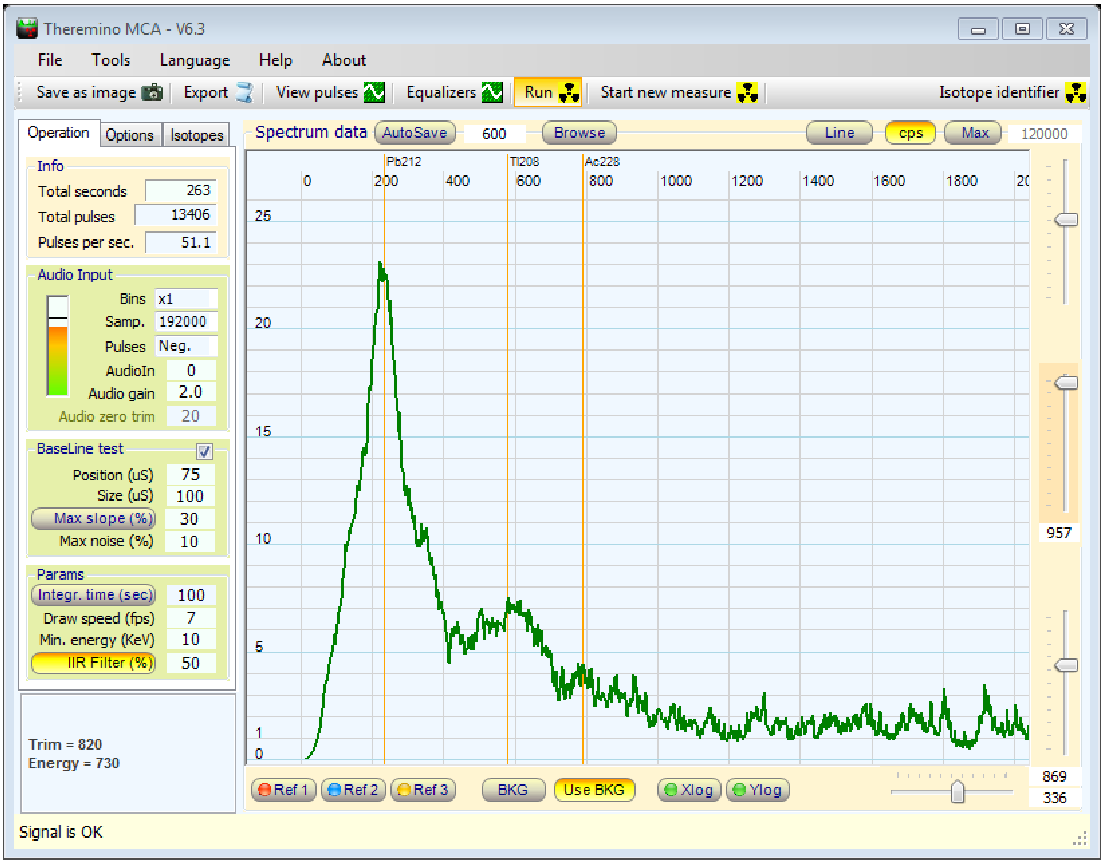

Abb. 23: Spektrum einer Thorium Probe (Monazit-Sand) erzeugt mit dem SiPM

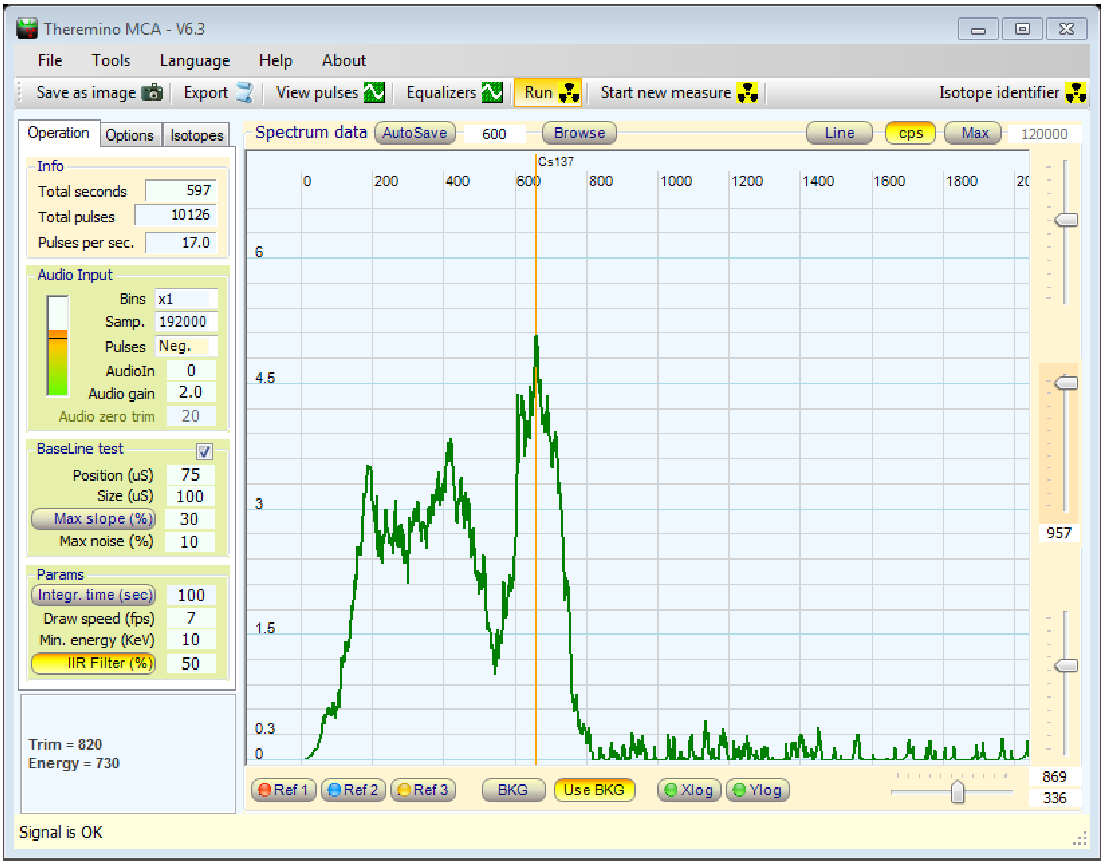

Abb. 24: Spektrum einer Cs137 Probe (Spark Gap Röhre) erzeugt mit dem SiPM

Literatur

Anna Vilà, Anna Arbat, Eva Vilella and Angel Dieguez
Geiger-Mode Avalanche Photodiodes in Standard CMOS Technologies
In „Photodetectors“ Edited by Sanka Gateva, InTech, 2012
http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/33517.pdf

Brian F. Aull et al., Geiger-Mode Avalanche Photodiodes for Three-Dimensional Imaging
LINCOLN LABORATORY JOURNAL VOLUME 13, NUMBER 2, 2002
http://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol13_no2/13_2geigermode3d.pdf

First Sensor
Introduction to silicon photomultipliers (SiPMs)
http://www.first-sensor.com/cms/upload/appnotes/AN_SiPM_Introduction_E.pdf

AvanSiD
Introduction to SiPMs – AdvanSiD
http://advansid.com/attachment/get/up_89_1411030571.pdf

Hamamatsu
What is an MPPC?
http://www.hamamatsu.com/jp/en/community/optical_sensors/sipm/what_is_mppc/index.html

Slawomir Piatek, Hamamatsu & New Jersey Institute of Technology
Physics and operation of an MPPC
http://www.hamamatsu.com/jp/en/community/optical_sensors/sipm/physics_of_mppc/index.html

Hamamatsu
MPPC® , MPPC Modules
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9003e.pdf

Theremino - The real modular input output
http://www.theremino.com

Theremino Gamma-Spectroscopy Blog
http://www.theremino.com/en/blog/gamma-spectrometry