# Ein rauscharmer Front-End Verstärker für SiPMs zur Gamma-Spektroskopie

Bernd Laquai, 8.3.2016

Wie bereits gezeigt wurde, können mit Hilfe von Silicon Photomultipliern (SiPMs) sehr kleine Szintillationszähler oder sogar mobile „In-Situ“- Spektroskopiegeräte gebaut werden. Neben der extremen Miniaturisierung haben SiPMs auch den Vorteil, dass sie keine Hochspannung benötigen. Sie werden typischerweise mit Spannungen unter 50V versorgt: Für die SiPMs der Firma First Sensor, die hier verwendet wurden, reichen zur Versorgung sogar 26-34V.

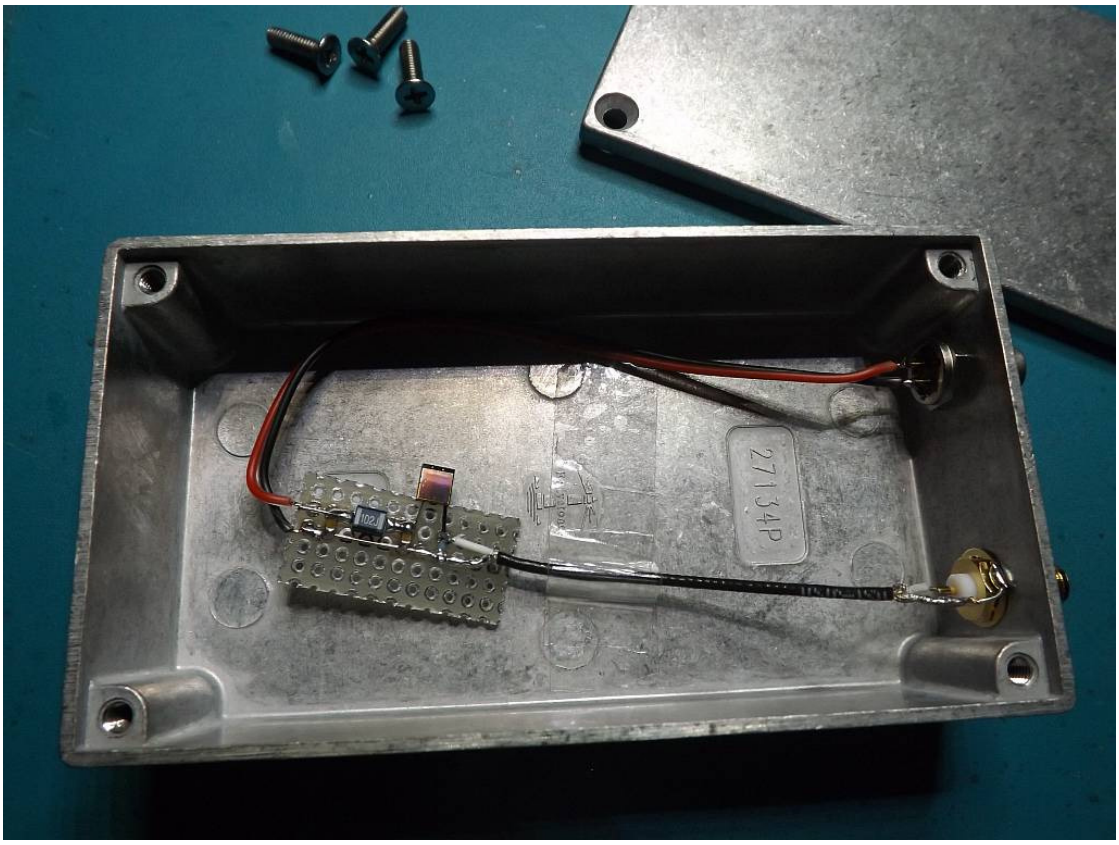


Abb. 1: SiPM Adapter mit 50Ohm Lastwiderstand und kapazitiver Auskopplung

Allerdings erzeugen die SiPMs, selbst wenn sie mit NaI-Kristallen kombiniert werden, recht schnelle Pulse. In dem hier untersuchten Fall eines 4x4mm SiPM von First Sensor und einem 10x40mm NaI Kristall liegt die Pulsbreite an einem Lastwiderstand von 50 Ohm bei etwa 1us und einer Anstiegszeit von etwa 100ns. Die Amplituden liegen deutlich unter 100mV. Für die Auswertung der Zählpulse oder für die Signalverarbeitung im Rahmen einer Spektroskopie ist daher ein Vorverstärker nötig, der einmal sehr rauscharm sein muss und dessen Verstärkung im Bereich von etwa 40dB liegen sollte, wenn man von einem 50Ohm System ausgeht. Das 50Ohm system hat dabei den Vorteil, dass es einerseits automatisch an die meisten Messgeräte angepasst ist und andererseits kann dann zwischen den SiPM Lastwiderstand von 50ohm und der Eingangsimpedanz des Verstärkers mit 50 Ohm eine, auf beiden Seite angepasste koaxiale HF Leitung mit 50 Ohm gelegt werden, und man kann somit Störungen durch Reflexionen ausschließen.

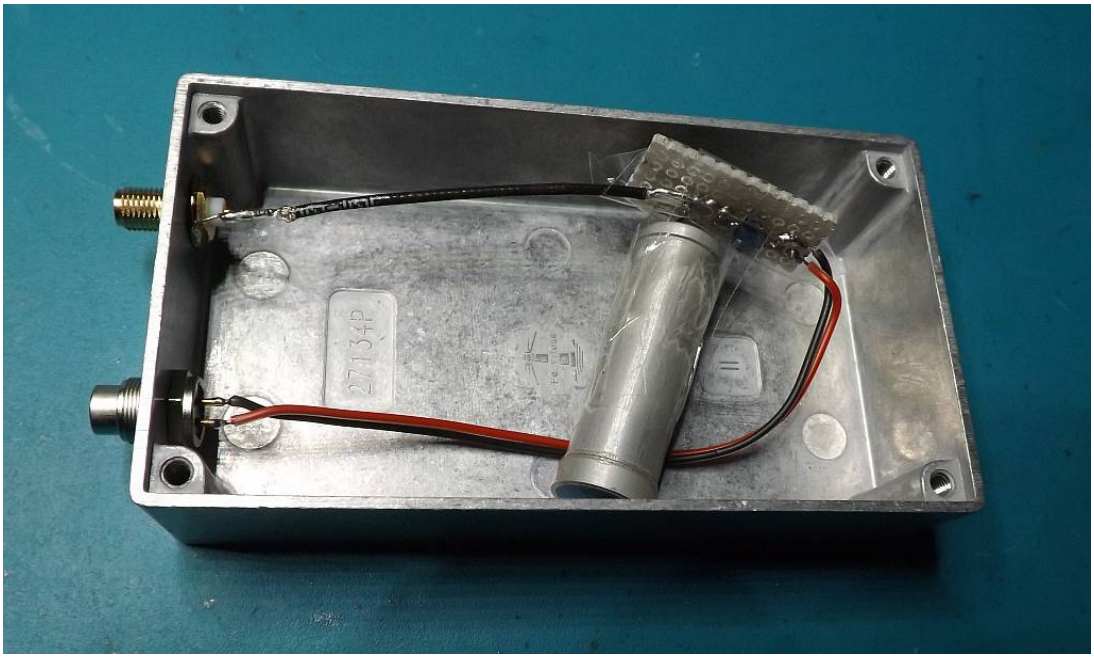

Abb. 2: SiPM Adapter mit aufgesetztem 10 x 40mm NaI-Kristall im provisorischen Gehäuse

Es ist natürlich vorteilhaft, wenn man die Verstärkung mit nur einem OP hinbekommen kann. Dazu ist allerdings ein OP nötig, der ein relativ hohes Verstärkungs-Bandbreite-Produkt aufweist und so auch relativ leicht instabil werden kann. Geht man von einer Bandbreite von etwa 10MHz aus, so hat man bei der Verstärkung von 40dB oder Faktor 100 bereits ein benötigtes Verstärkungs-Bandbreite-Produkt von 1GHz. Ein solcher OP ist natürlich nicht mehr ganz so einfach mit Hobby-Mitteln beherrschbar. Man muss dazu entweder eine Evaluierungs-Platine eines Herstellers verwenden oder eine Platine selbst entwerfen. Auf einer Lochraster Platine wird es jedenfalls sehr sportlich so eine Schaltung zum spielen zu bekommen.

Als OP bietet sich z.B. der AD8099 von Analog Devices an, den es im SOIC-8 Gehäuse gibt. Er ist ein ultra-low-noise OP mit einem spezifizierten Verstärkungs-Bandbreite-Produkt von 3.8GHz. In der Realität erreicht man bei der relativ hohen Spannungsverstärkung von 100 immerhin noch etwa 20MHz Bandbreite. Im Gegensatz zu den OPs der Mitbewerber hat der AD8099 auch ein sehr günstiges Gehäuse, denn der Output Pin erscheint auf beiden Seiten des Gehäuses, so dass man die Schleife für die Rückkopplung auf den Eingang sehr klein halte kann. Die Verstärkung von 100 entspannt allerdings die Stabilitätsproblematik, denn der OP ist um so leichter zu bändigen, je schwächer die Rückkopplung ist. Bei einer Verstärkung von 100 ist daher auch kein Kompensations-Netzwerk am Pin 5 mehr nötig. Der OP ist für eine Versorgung von 12V ausgelegt.

Eine Verstärkung von 100 erreicht man in der Praxis (im Gegensatz zur analytischen Rechnung) mit einem Gain-Widerstand von 26 Ohm und einem Feedback-Widerstand von 5.11 kOhm. Dabei wird der invertierende Eingang als Signaleingang benutzt. Zusammen mit einem 147Ohm Widerstand am Eingang gegen Ground ergibt sich eine Eingangsimpedanz von 50Ohm. Am Ausgang kann man ebenfalls einen Serienwiderstand von 50Ohm vorsehen, so dass im Falle, dass eine Leitung getrieben wird, entweder nur quellenseitig eine Anpassung vorliegt oder für den Fall eines mit 50Ohm terminierten Messgeräts beidseitig Anpassung herrscht, allerdings dann mit 6dB Dämpfung in der Übertragungscharakteristik eines Spannungssignals.

Für OPs im 8-Pin SOIC Gehäuse bietet Analog Devices ein Evaluations-Platine an, wobei man aufpassen muss, denn es gibt mehrere Varianten, eine neuere für invertierende und nicht invertierende Beschaltung (SO8 SINGLE AMP, siehe auch Application Note UG-755), eine ältere für die invertierende Beschaltung (EVAL-ADOPAMP-1R-IN, hier benutzt) und eine weitere ältere für die nicht-invertierende Beschaltung (EVAL-ADOPAMP-1R-NI, beide siehe Application Note AN720). Diese Platinen sind natürlich vom Hersteller als Mehrlagen-Platine für SMD-Bauteile so entworfen, dass man die bestmöglichste Performance erwarten kann. Verwendet man so ein Evaluation Board dann muss man ebenfalls beachten, dass dieses für eine bipolare Strom-Versorgung entworfen ist. Man kann es aber mit einem schwimmenden Power-Supply über einen Spannungsteiler aus 2x100Ohm betreiben, bei dem die Mittelanzapfung des Spannungsteilers mit der Masse des Boards verbunden wird. Entwirft man das Board dagegen selbst, ist eine unipolare Versorgung günstiger, da man das Signal später ohne Probleme kapazitiv auskoppeln kann.

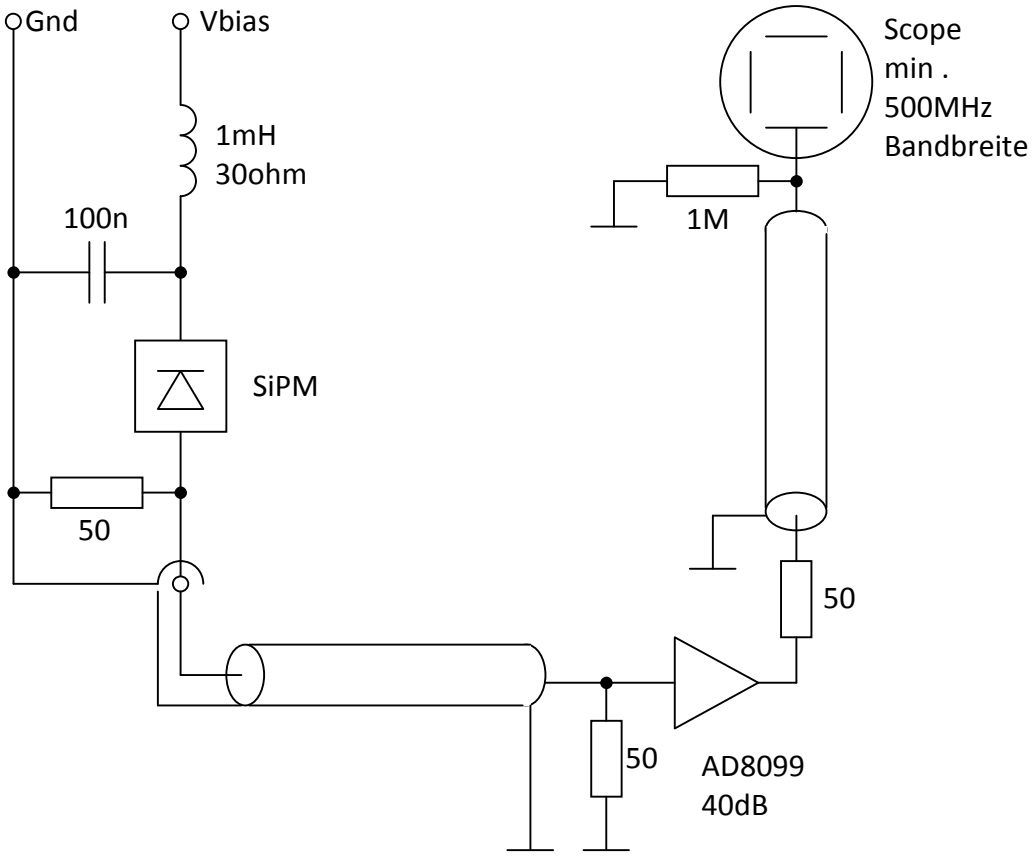


Abb. 3: SiPM Adapter und Anordnung des Front-End Verstärkers.

Untersucht man nun dieses Board, das wie oben beschaltet ist, an einem Network-Analyzer, kann man den Frequenzgang aus dem Frequenzverlauf des S21-Parameters ablesen. Die Verstärkung beträgt bei 1MHz etwa 34dB, da der Ausgangs-Port ebenfalls mit 50 Ohm terminiert ist und die Spannung so um den Faktor 2 geteilt wird. Infolge der Auskoppelkapazität werden ganz niedrige Frequenzen nicht übertragen, so dass der Übertragungsbereich etwa 4kHz bis 20MHz beträgt und in diesem Bereich auch sehr schön sehr flach verläuft.

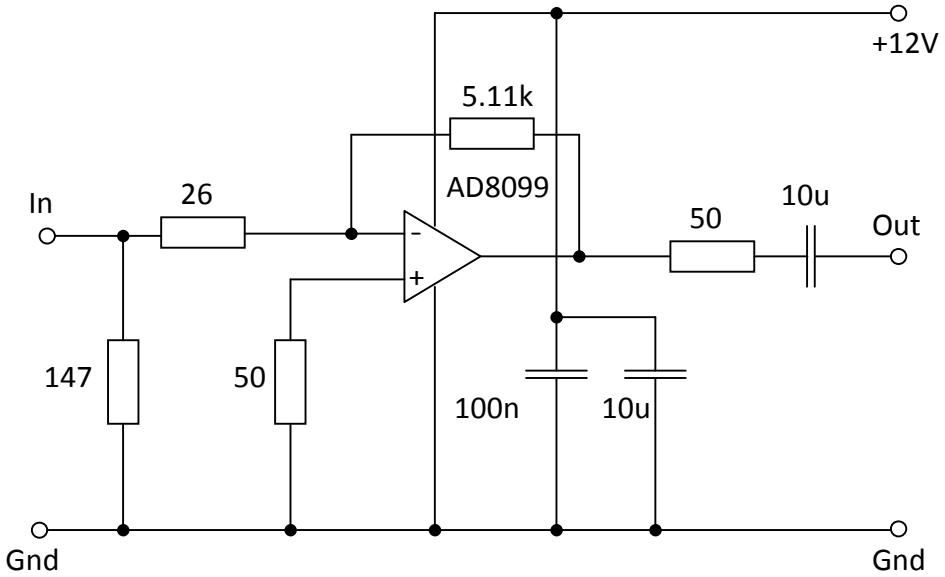


Abb. 4: Äussere Beschaltung des AD8099 für invertierenden Betrieb mit unipolarer Stromversorgung

Schließt man den Verstärker ohne Eingangssignal an einen Spektrumanalyzer an, dann lässt sich eine Rauschleistungsdichte von –131dBm/Hz messen, was etwa 61nV/rtHz entspricht und die schon recht gute Rausch-Performance des OP darstellt. Geht man von 20MHz aus, dann kann man mit einer Rauschspannung in dieser Bandbreite von etwa 274uVrms (oder -58dBm) rechnen. Das ist also weit unter den erwarteten Amplituden der Pulse und daher trägt der Verstärker selbst nicht wesentlich zum Rauschen bei.

Selbst bei einem recht schnellen Oszilloskop kann man ohne Probleme mit hohem Eingangswiderstand arbeiten, solange man eine 50Ohm Leitung verwendet, da der Verstärker quellenseitig die Leitung terminiert. Wenn es das Oszilloskop erlaubt ist es auch vorteilhalft das Signal digital zu filtern, wobei eine Tiefpass-Filterung mit 20MHz ein guter Startwert ist.

Sobald man die Overvoltage des SiPMs in den Bereich von 1-2V bringt sieht man unterschiedlich hohe Impulse. Je nachdem wo man den Trigger-Level hinlegt, kann man größere oder kleinere Amplituden sehen. Fokussiert man sich auf kleine Impulse sieht man Impulsdauern bis herunter zu 200ns. Die Rate kleiner Impulse ist auch ungleich höher als die großer Impulse und liegt im Mittel deutlich über 100 pro Sekunde. Große Impulse haben dann Impulsdauern von 400-800ns und eine Höhe von bis zu 4V. Durch sukzessives digitales Filtern mit immer tieferer Grenzfrequenz kann man erkennen, dass eine Bandbreite von 1MHz ausreichend ist und noch keinen nennenswerten Impulshöhenverlust erzeugt. Dafür werden die Pulse aber deutlich symmetrischer und glatter. D.h. man kann damit die Funktion eines Puls-Shapers nachbilden.

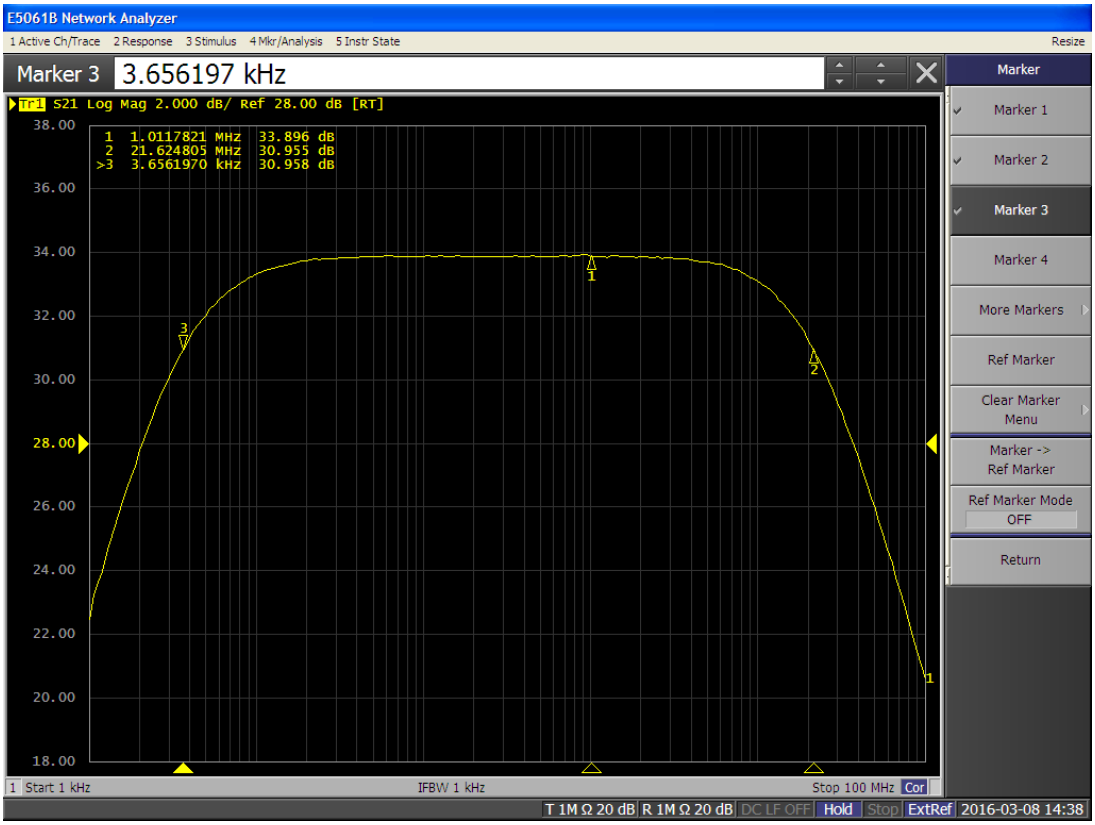


Abb. 5: Frequenzgang

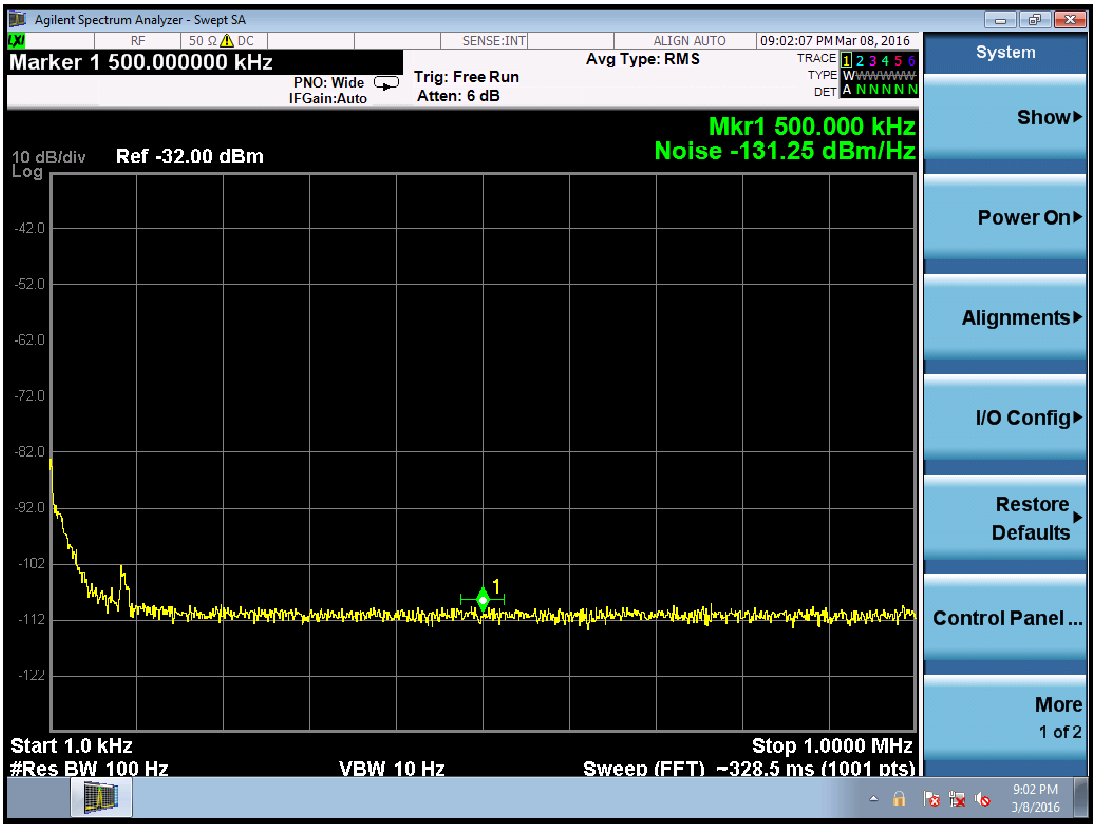


Abb. 6: Rauschleistungsdichte im Bereich 1-1000kHz

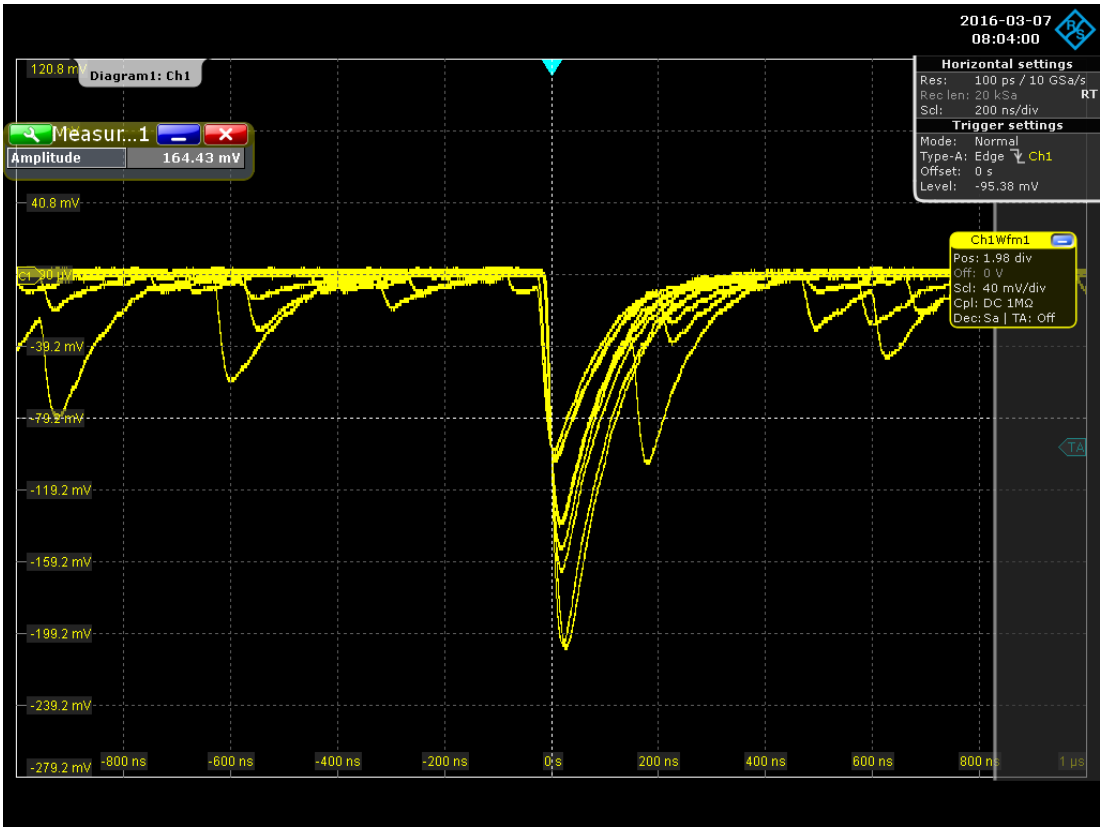


Abb. 7: Kleine Impulse des SiPM mit NaI-Kristall am Ausgang des Verstärkers

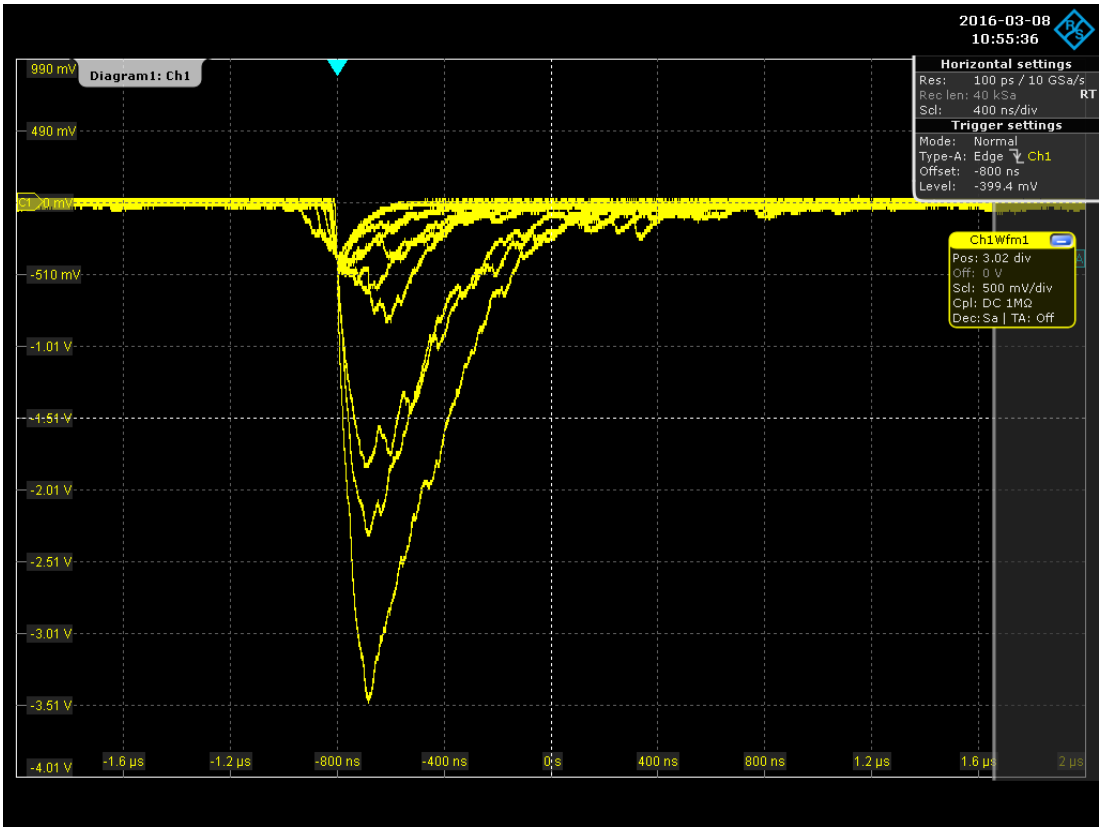


Abb. 8: Mehrere kräftige Impulse ungefiltert

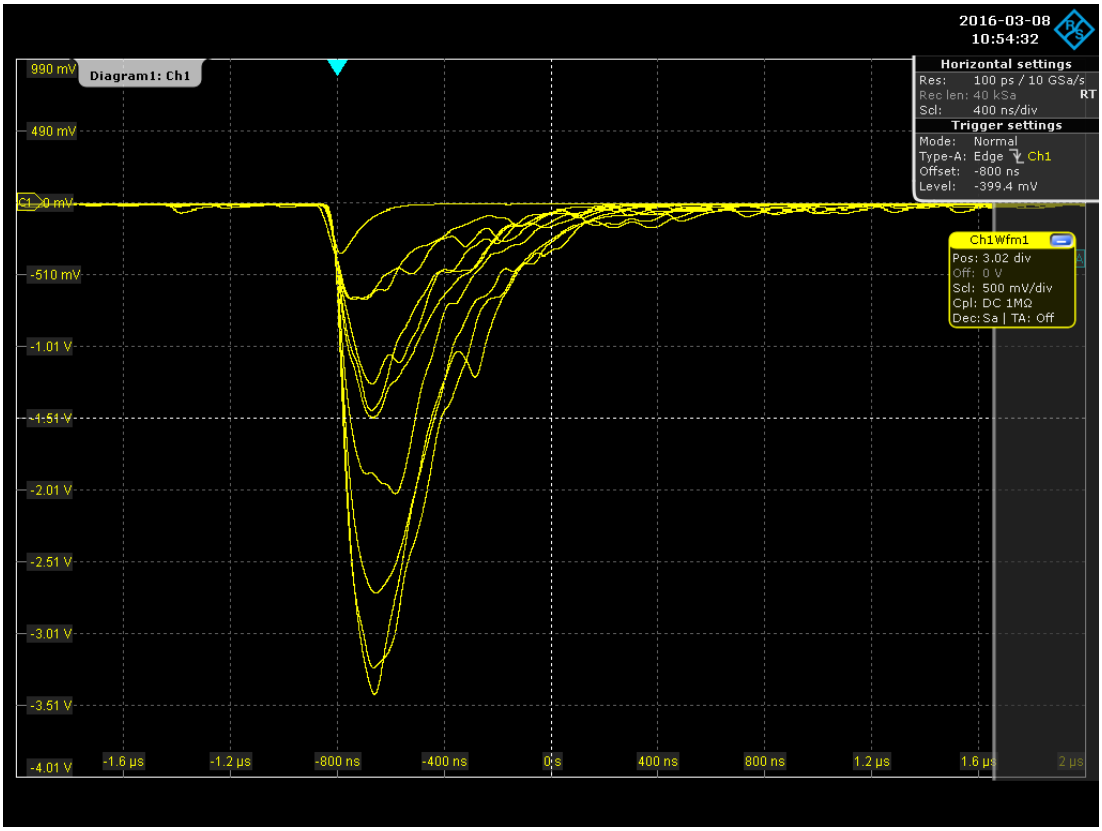

Abb. 9: Mehrere Impulse mit 10MHz Digital-Tiefpass gefiltert

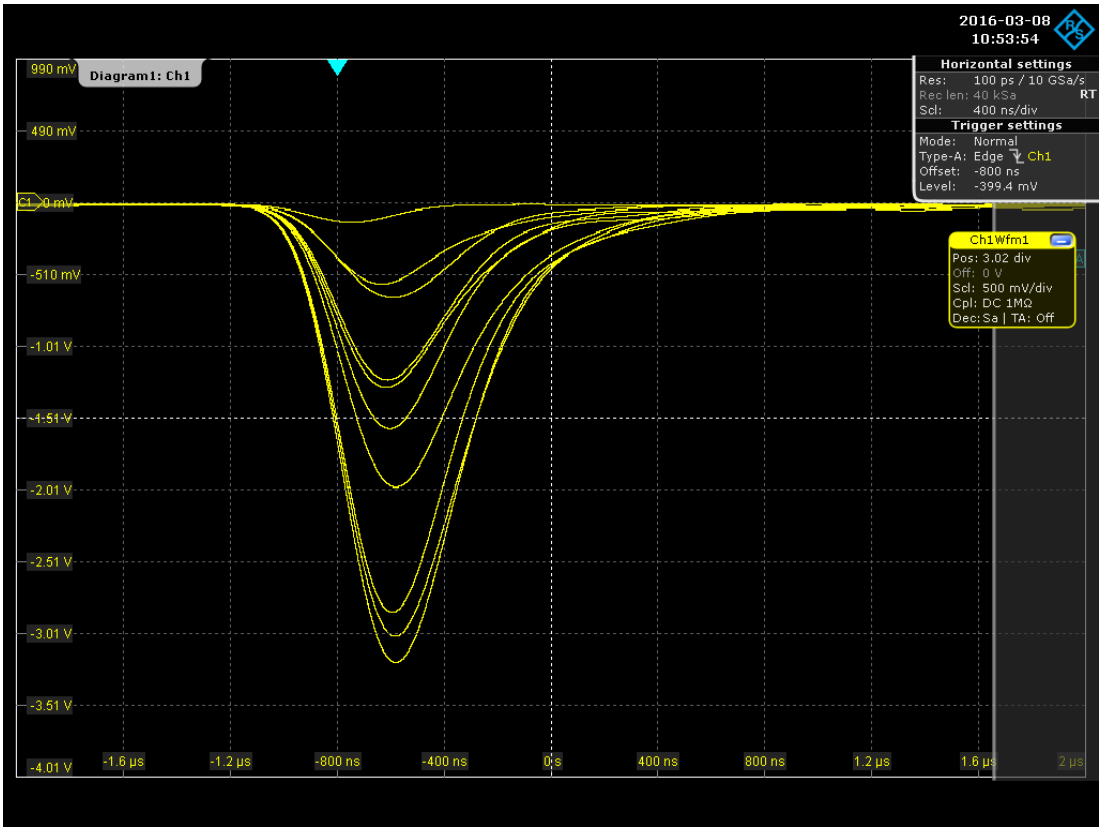

Abb. 10: Mehrere Impulse mit 1MHz Digital-Tiefpass gefiltert

Mit einem besseren Oszilloskop kann man nun die Waveform-Traces im „Infinite Persistance Mode“ akummulieren und durch Färbung (Color Grading) die Dichte darstellen. Zudem kann

man ein Fenster (smale graue Fläche) so in die Maxima der Kurven legen, dass das Pixel-Histogramm zum Impulshöhen-Histogramm wird und somit ein Impulshöhen-Spektrum darstellt, welches zu einem Energiespektrum annähernd proportional ist. Das ist dann nichts anderes als ein Gammaspektrum.

Zunächst einmal sieht man dass der Background ohne Probe um etwa 0.8V herum sein Maximum hat. Durch eine Probe verändert sich aber das Spektrum auch im Bereich wo der Background liegt. Am einfachsten sieht man die Proportionalität mit einer Spark-Gap Röhre mit Cs137 Klecks im Glas als Probe. Ganz deutlich erscheint dann eine Häufung der Linien bei etwa 3.2V so dass man grob einen Umrechnungsfaktor von 200keV/V benutzen kann. Man sieht auch schön das Compton Tal bevor zu niederen Energien hin das Compton Rauschen beginnt.

Ein vergleichbares Diagramm eines Thorium-Glühstrupfes zeigt dagegen bei höheren Pegeln eine Häufung bei 1.35V und bei 2.7V und mit der aus dem Cs137 gewonnenen Umrechnung kommt man schnell darauf, dass diese Höcker zum Pb212 bei 239keV und zum Th208 bei 583keV gehören müssen.

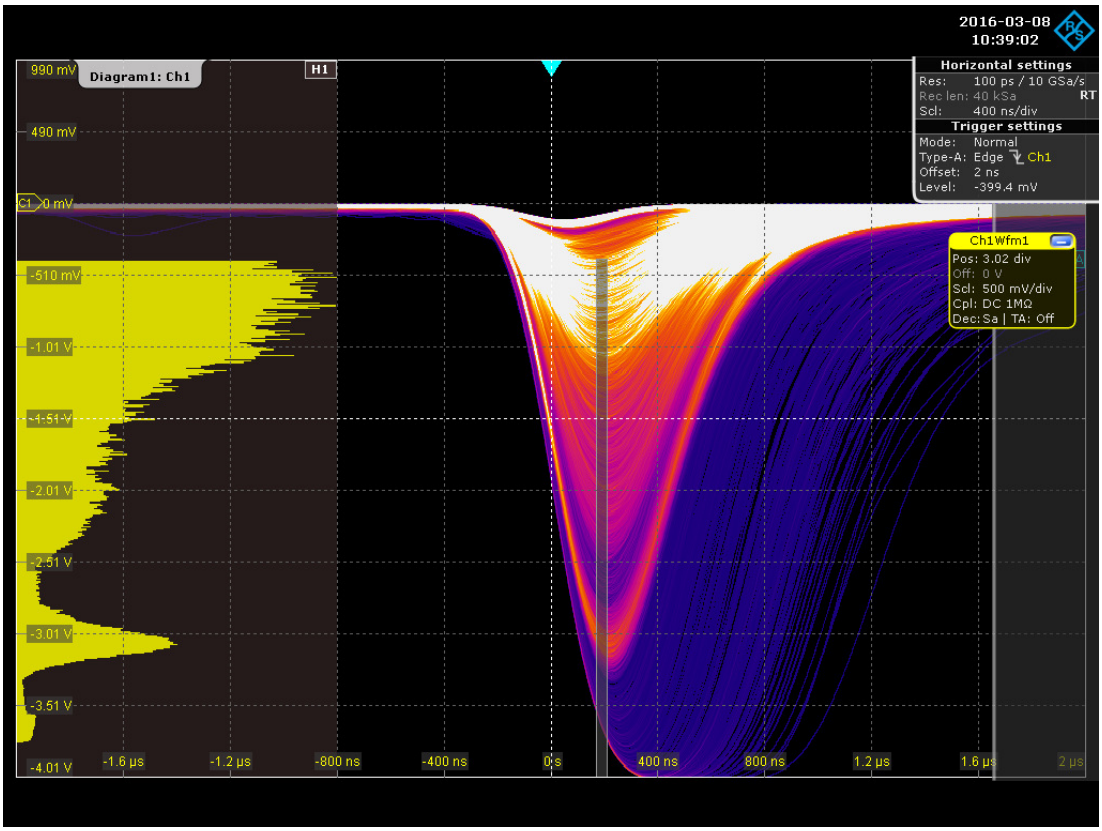

Abb. 11: Impulshöhen-Histogramm einer Spark-Gap Röhre mit Cs137 Klecks als Probe

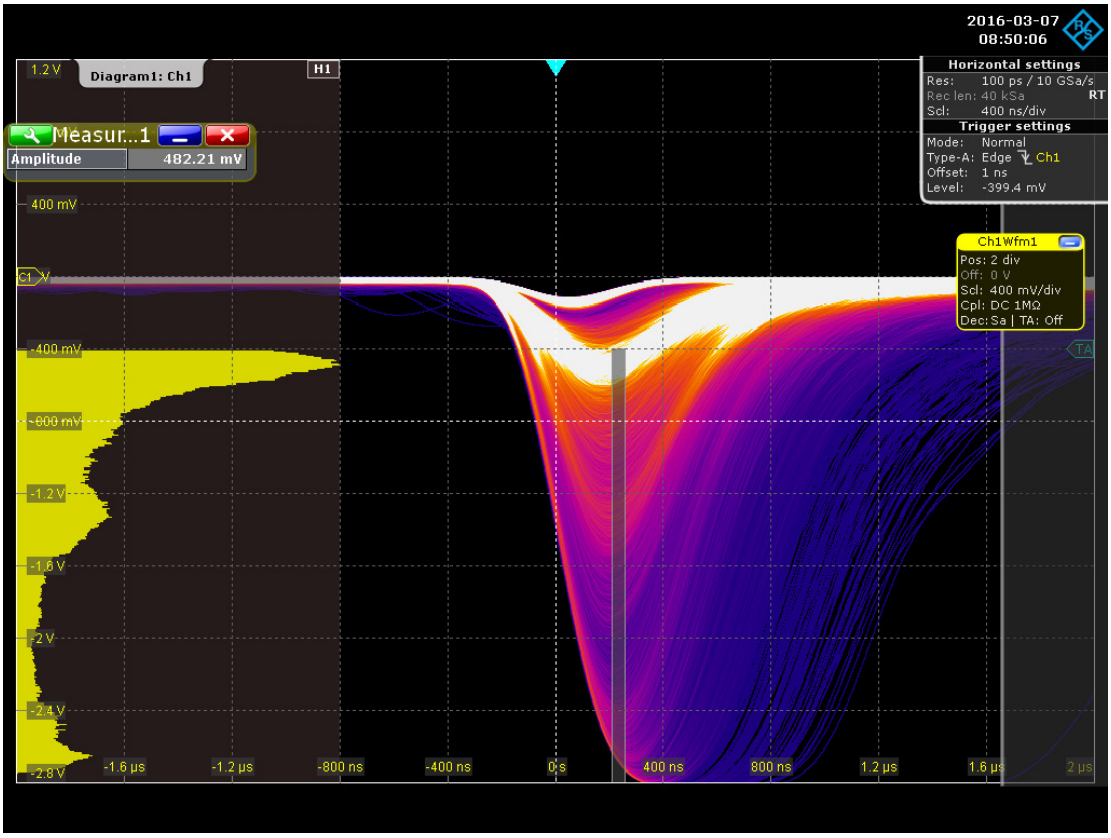

Abb. 12: Impulshöhen-Histogramm eines Thorium-Glühstrumpfes als Probe

Im Hinblick auf eine Geräteentwicklung will man natürlich die Impulsformung in Hardware machen. Dazu kann man ein Tiefpassfilter verwenden, das so gestaltet ist, dass es nicht allzu sehr schwingt, wenn es mit kurzen Impulsen angeregt wird (z.B. Gauss-Tiefpass). Dieses Filter kann man nun hinter den Verstärker schalten um die Impulse erheblich zu verlängern, so dass sie Pulsdauern bis 50us erreichen und damit mit einer PC Soundkarte bequem digitalisiert werden können. Dann kann die Multichannel-Analyzer Funktion mit einer PC Software wie beispielsweise der von Theremino sehr kostengünstig implementiert werden.

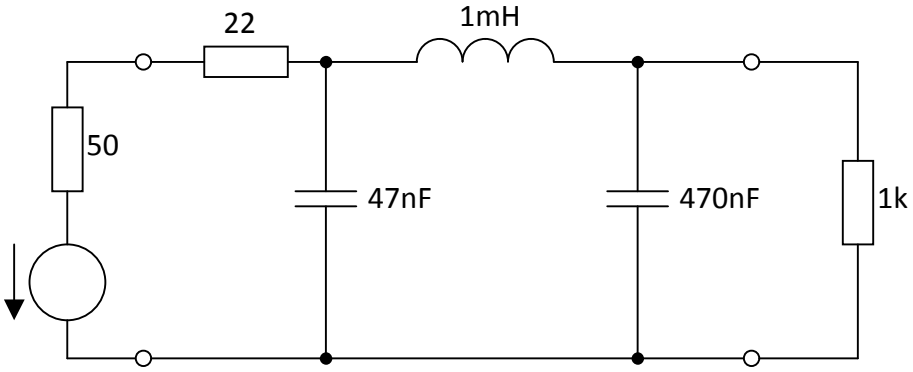


Abb. 13: Passives LC-Tiefpass-Filter als Pulse-Shaper, der die SiPM Pulse auf eine verarbeitbare Impulsdauer mit 100us und angenäherter Gauß-Form bringt.

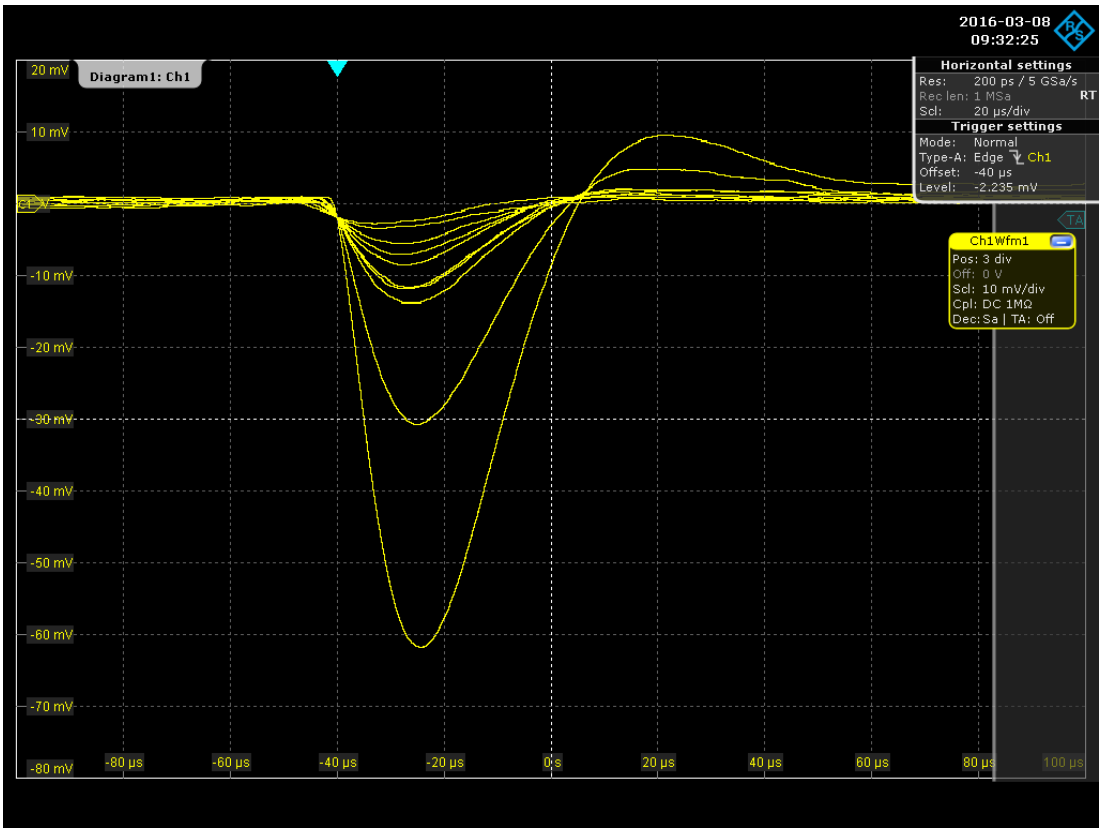


Abb. 14: Impulse nach dem passiven Hardware-Shaper, ein leichtes Unterschwingen nach den Pulsen ist zu erkennen

Analysiert man nun wieder die Impulshöhen im Vergleich zu den Energien bekannter Linien, dann sieht man dass die Cs137 Linie bei 43mV liegt und beim Glühstrumpf das Pb212 bei 16mV und das Tl208 bei 37mV liegt. Die Uranlinie zeigt die charakteristische Linie des Bi214 bei 39mV. Beim natururan könnte man auch hinter der starken Häufung bei niederen Pegeln (ca. 6mV), die weit über den Background herausragt das Th234 bei 93keV vermuten. Allerdings treten in diesem Bereich oft auch Röntgenfluoreszenzen auf, die nicht immer einfach von niederenergetischen Linien zu trennen sind.

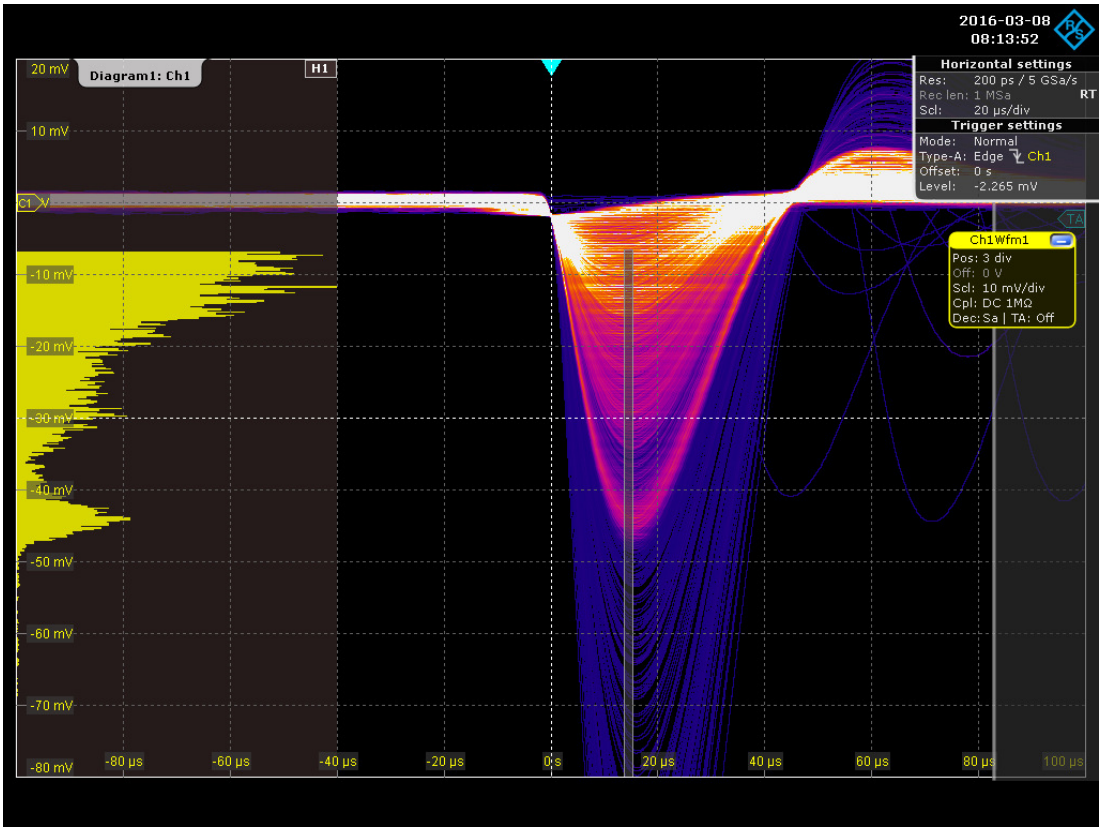

Abb. 15: Impulshöhen-Histogramm der Spark-Gap Röhre mit Shaper

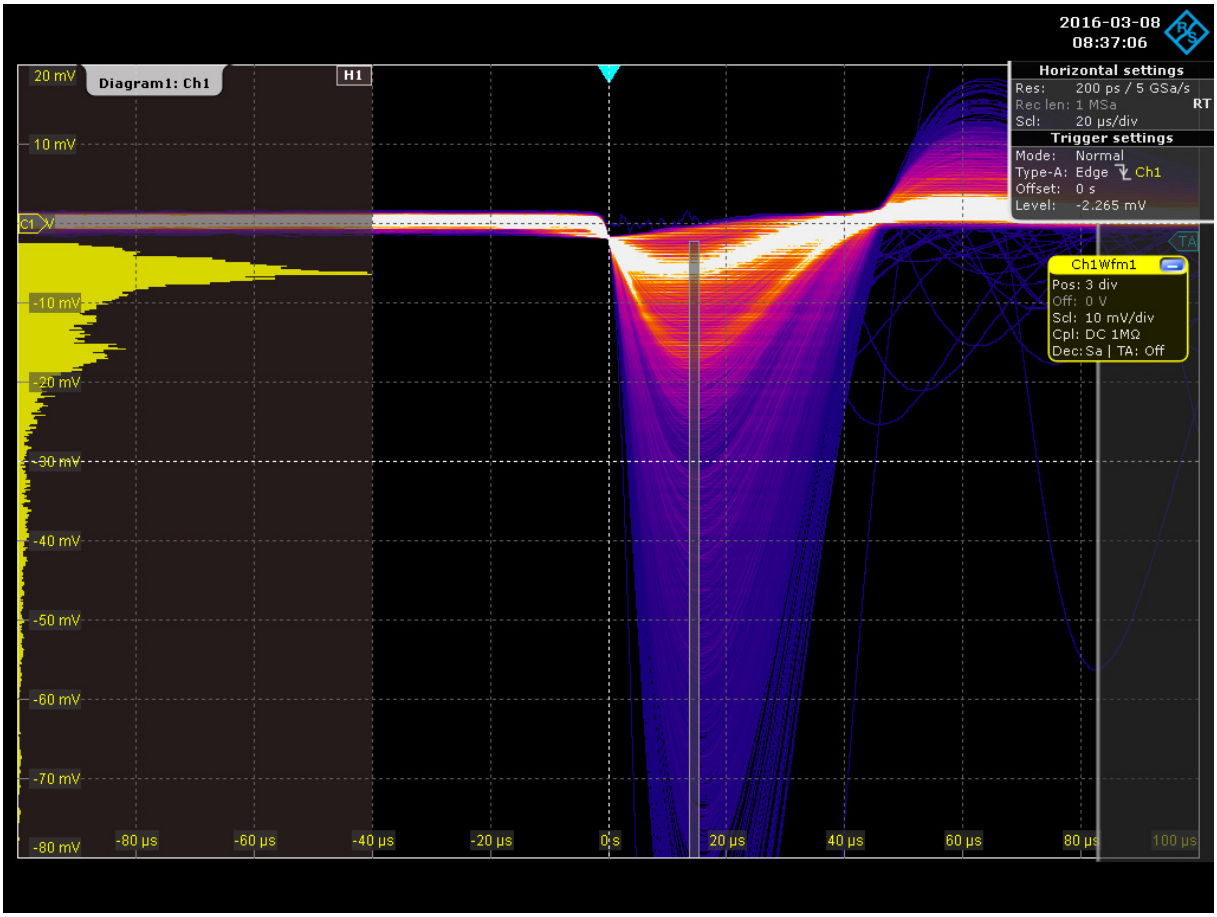

Abb. 16: Impulshöhen-Histogramm des Glühstrumpfes mit Shaper

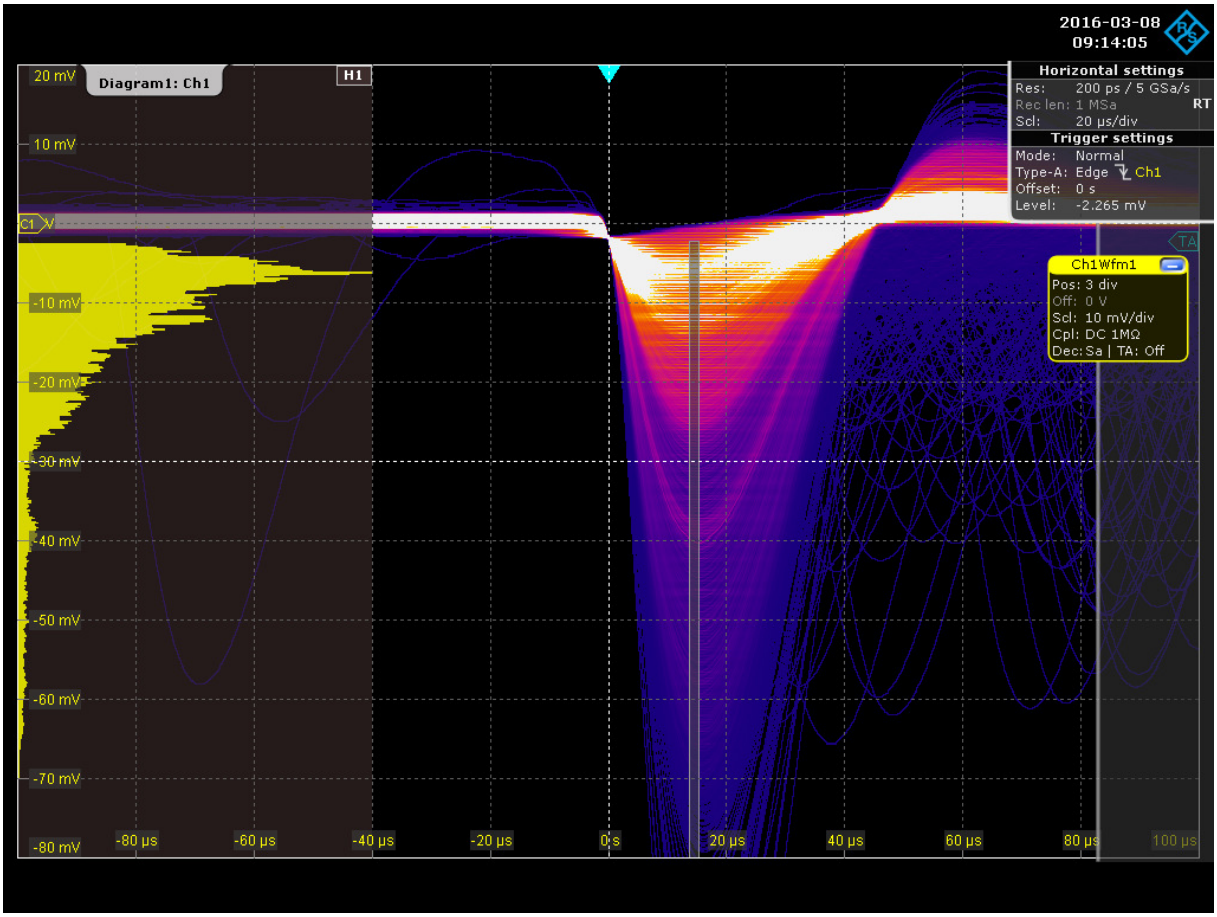

Abb. 17: Impulshöhen-Histogramm eines Uranerz-Brockens mit Shaper

Nachdem sich nun doch ganz deutlich abzeichnet, dass man mit dieser Signalverarbeitung durchaus brauchbare energieproportionale Signale erhält kann man nun das Ganze zu einer provisorischen Gamma-Spektroskopieanlage verschalten, bei der ein schneller Vorverstärker von einem Puls-Shaper gefolgt wird der Pulse für die Soundkarte eines PC liefert. Alternativ kann man den Shaper durch einen schnellen Komparator ersetzen und so einen Szintillationszähler aufbauen.

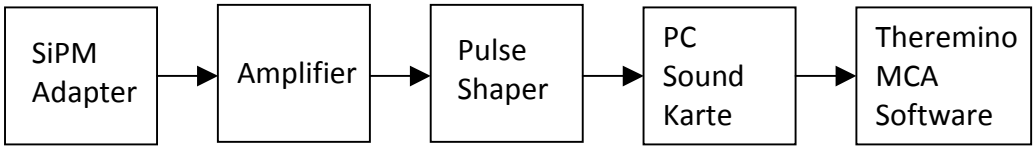


Abb. 18: Signalverarbeitungskette mit dem AD8099 Front-End Verstärker für das SiPM mit NaI Kristall

Die ganze Komponenten werden zum Schutz vor Störfeldern wieder am besten in eine Keksdose aus leitendem Blech verstaut. Damit ist auch bei dieser provisorischen Anordnung ein Störungsfreier Betrieb möglich. Die Versorgung des SiPMs empfiehlt sich aber nach wie vor besser über Batterien mit nachgeschaltetem Längsregler zu machen als aus einem ungefilterten Netzgerät.

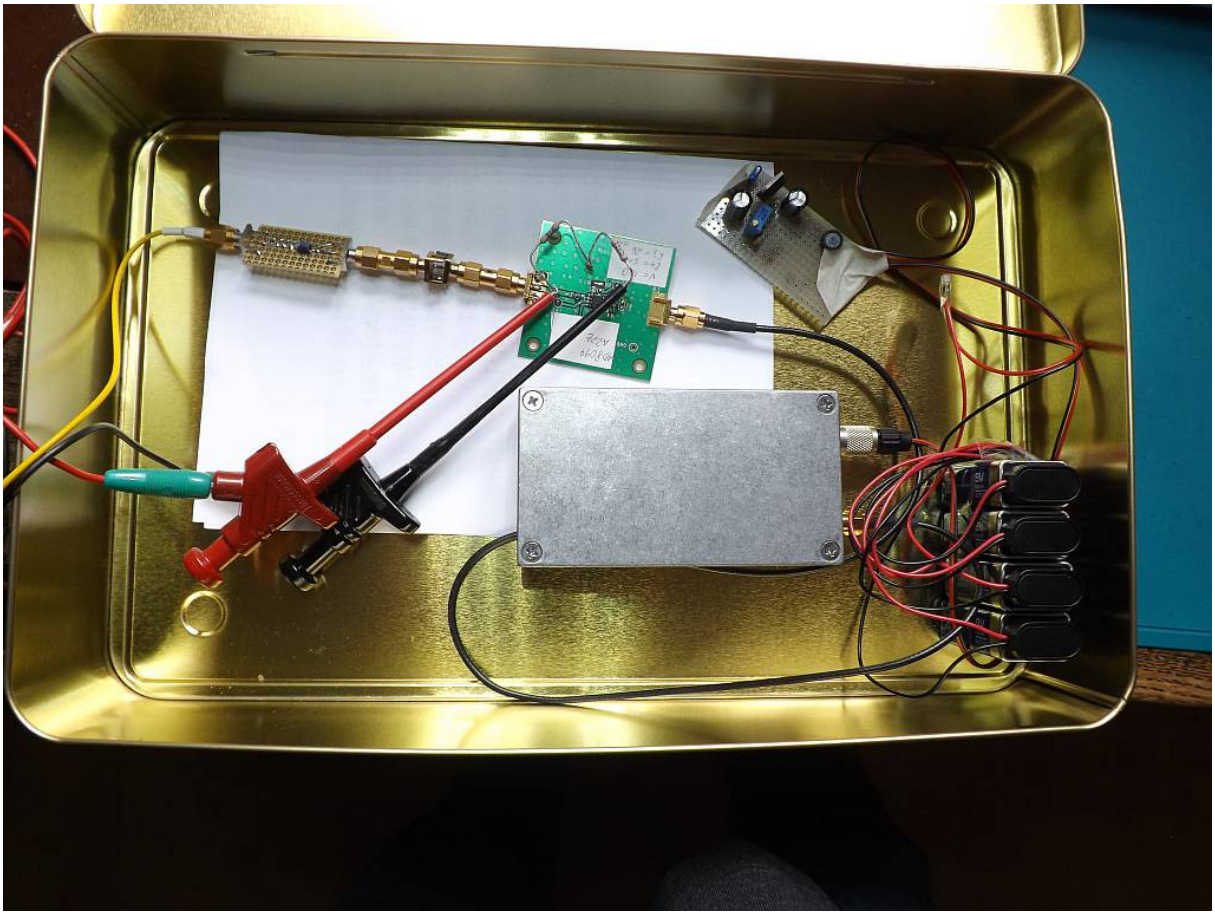

Abb. 19: Provisorischer Aufbau für den Prototypentest in einer Keksdose als Schirmung (der Verstärker befindet sich auf der grünen Platine)

Die Theremino-Software muss natürlich auf die Signalparameter eingestellt werden, das erfordert etwas Geduld. Man bekommt aber bei Verwendung der Rauschfilter sehr schöne fast symmetrische Impulse mit 50-100us Dauer. Die USB-Soundkarte (Vigo Speedlink) muss dazu aber fast 100% ausgesteuert werden.

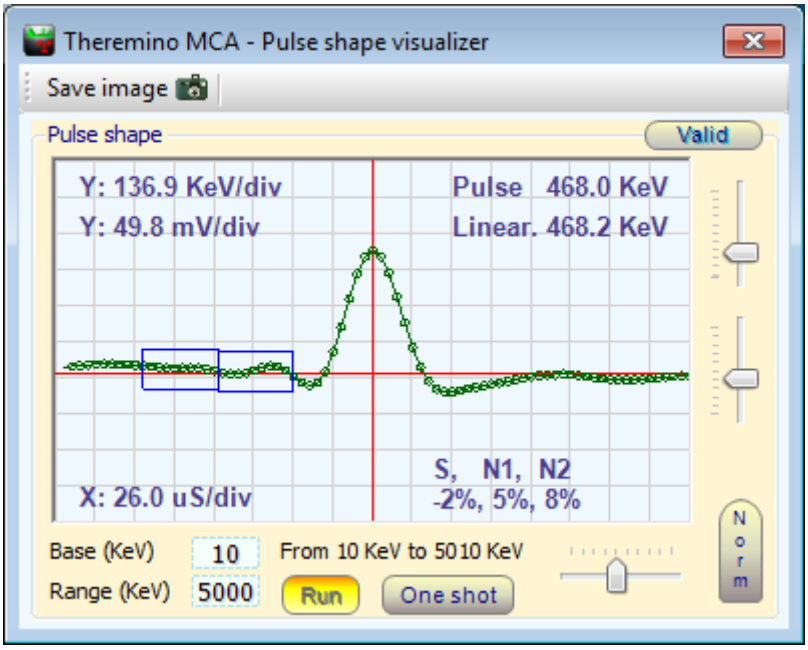


Abb. 20: Von der Theremino-Software selektierte und verarbeitete Impulse

Die hervorragende Linearität der gesamten Signalverarbeitungskette sieht erkennt man mit den ersten Gamma-Spektren, die man erzeugt. Den berühmt-berüchtigten Energy-Linearizer kann man gänzlich ausgeschaltet lassen. Man muss lediglich eine Proportionale Anpassung mit dem unteren Gesamt-Energie-Regler auf der rechten Seite machen.

Zum Kalibrieren lassen sich alle bekannten Kalibrierproben bis etwa 1MeV verwenden, danach schwächelt das ganze System dann recht schnell. Die Kalium Linie bei 1460keV lässt sich leider nicht mehr abbilden, dazu ist vermutlich der Kristall zu klein.

Aber insgesamt kann man sehen, dass das SiPM mit einem kleinen Kristall bereits spektroskopiefähig ist und sich für eine mobile „In-Situ-Spektroskopie“ mit Nuklididentifikation auch im Eigenbau sehr gut eignet.

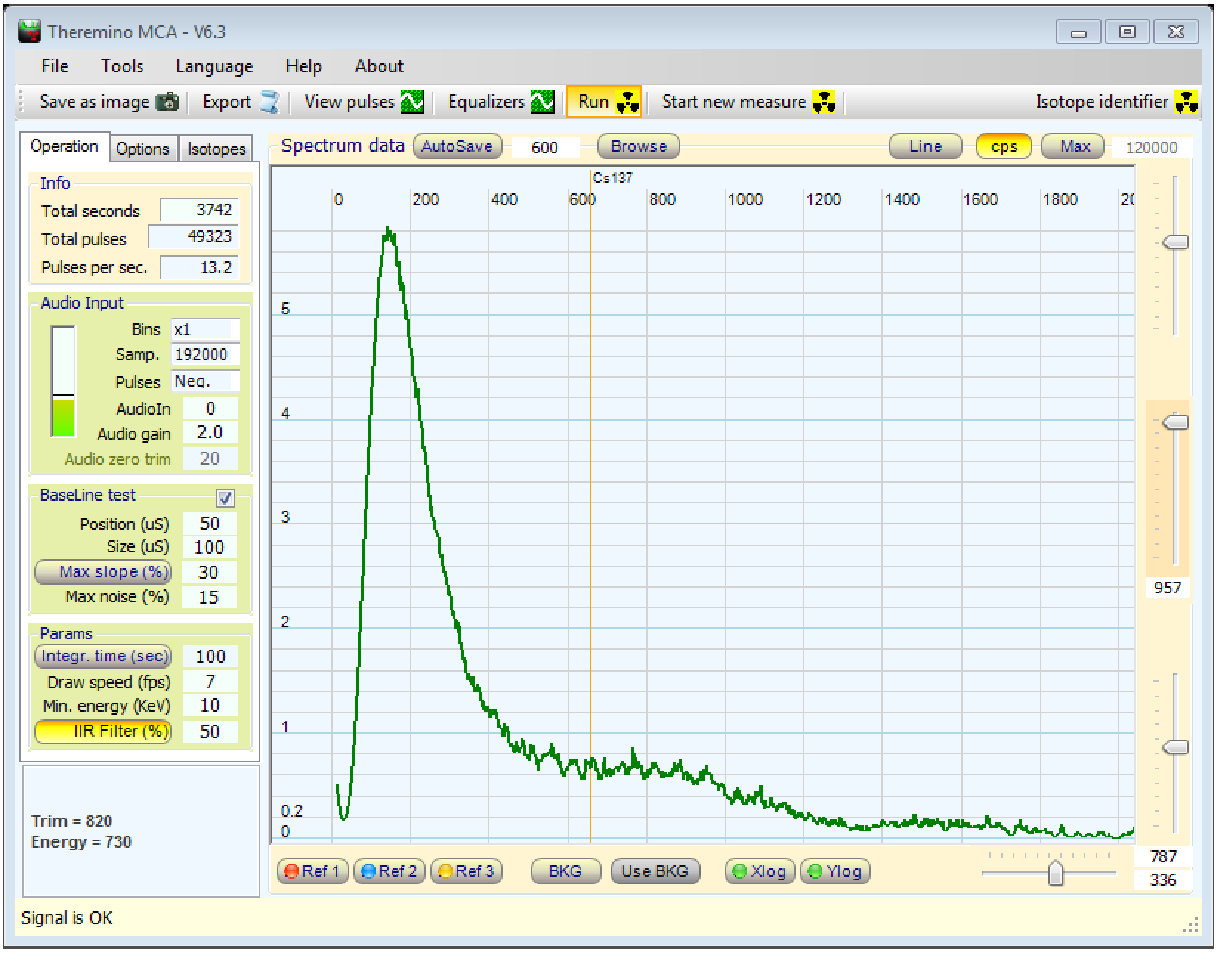

Abb. 21: Gamma-Spektrum des Background

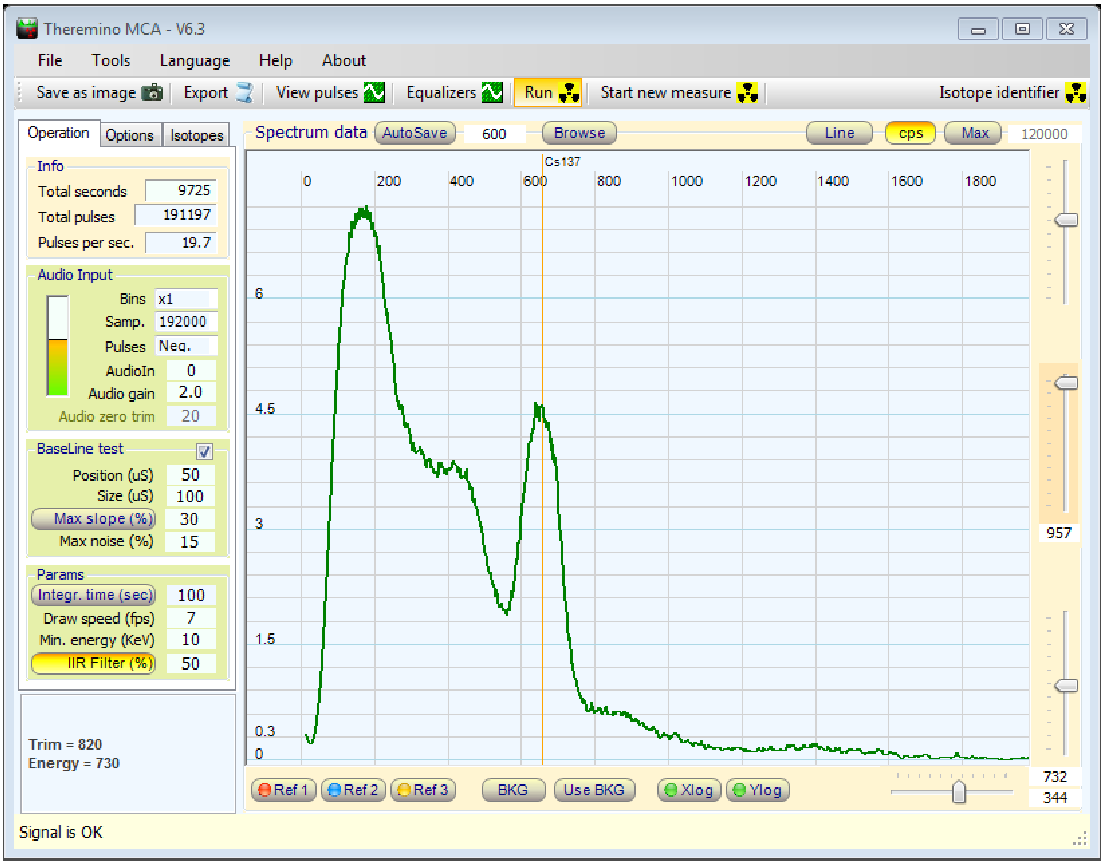

Abb. 22: Gamma-Spektrum der Spark-Gap Röhre (Cs137 Klecks)

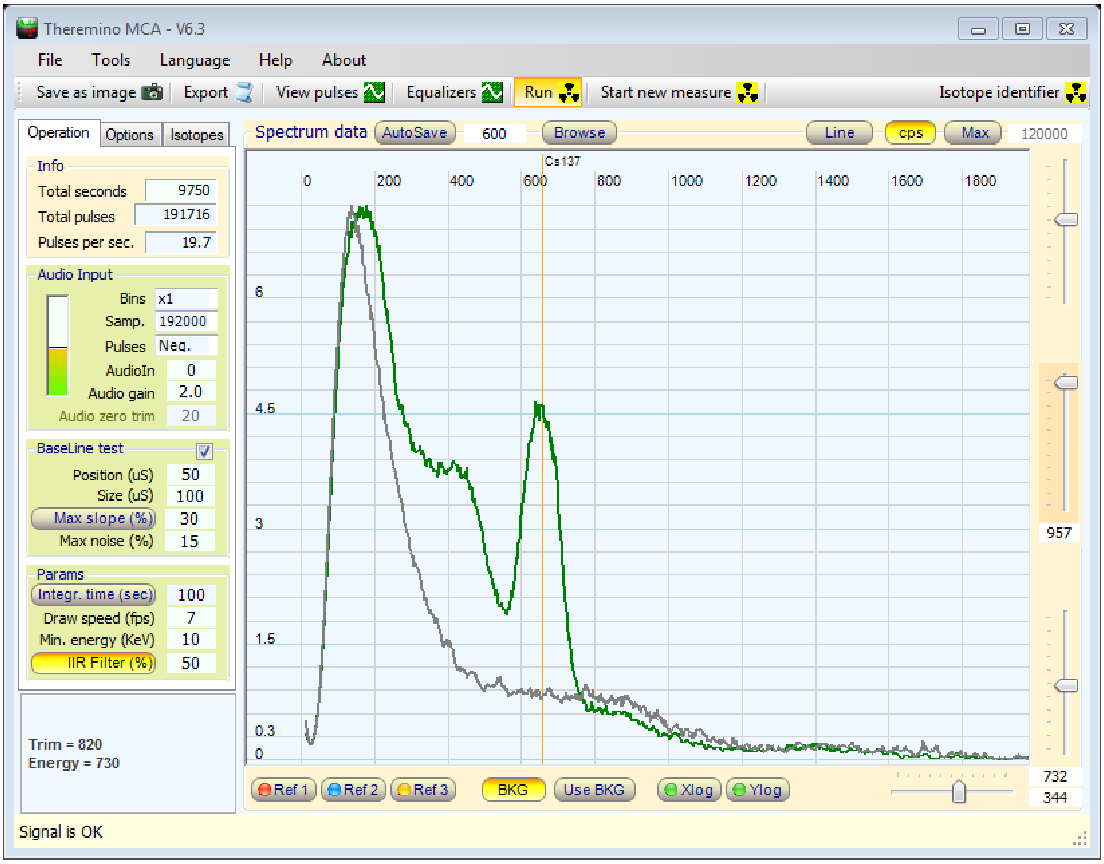

Abb. 23: Gamma-Spektrum der Spark-Gap Röhre (Cs137 Klecks) und Background

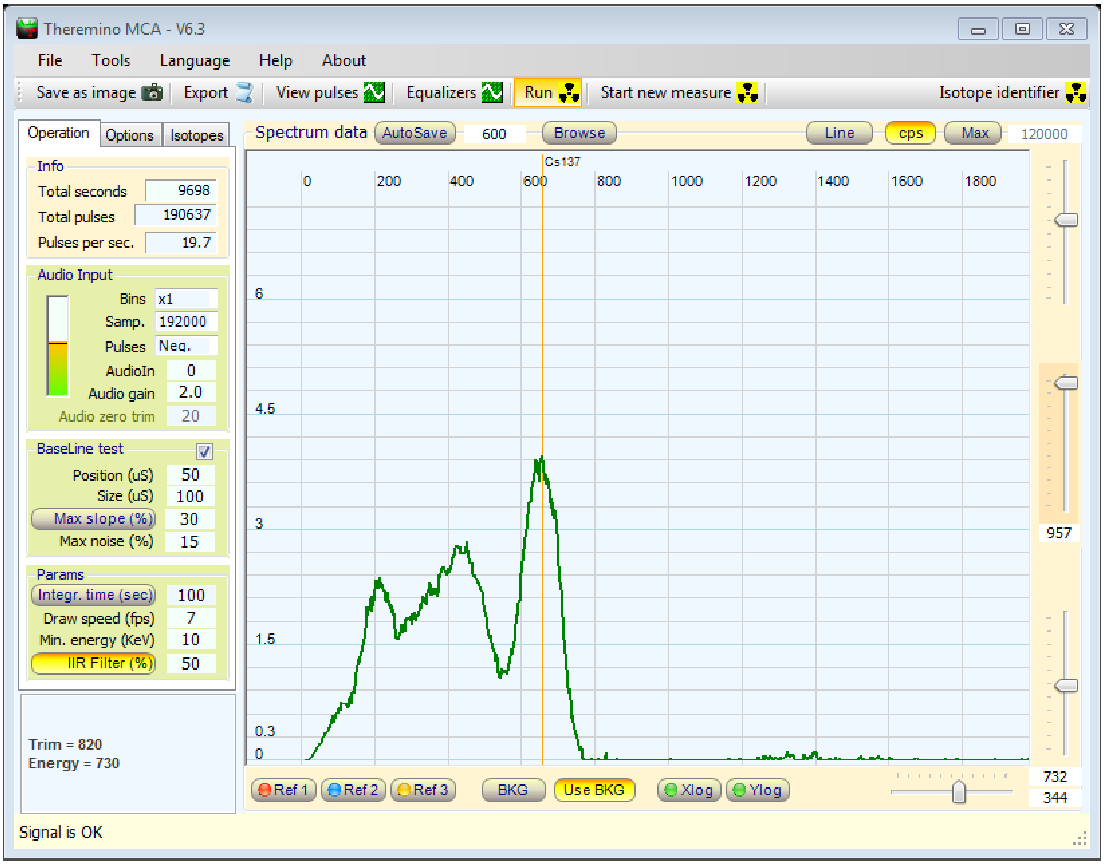


Abb. 24: Gamma-Spektrum der Spark-Gap Röhre (Cs137 Klecks) mit subtrahiertem Background

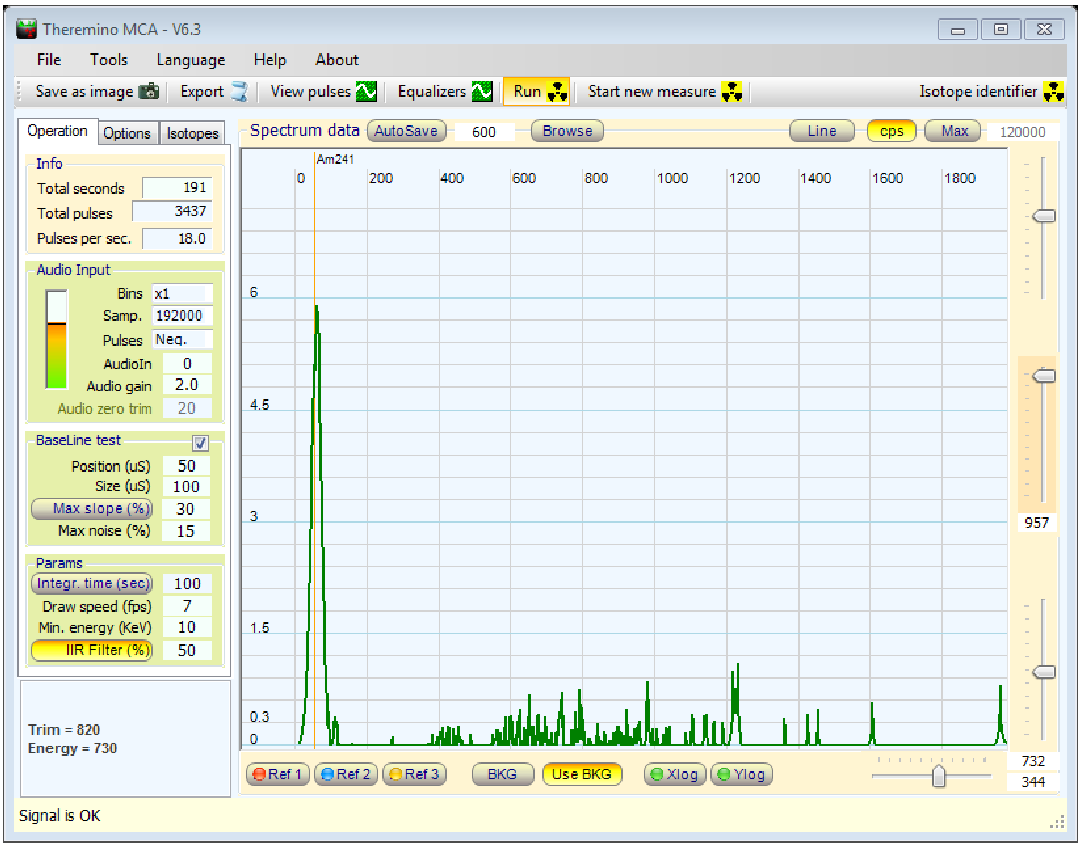


Abb. 25: Gamma-Spektrum eines Am241 Rauchmelders mit subtrahiertem Background

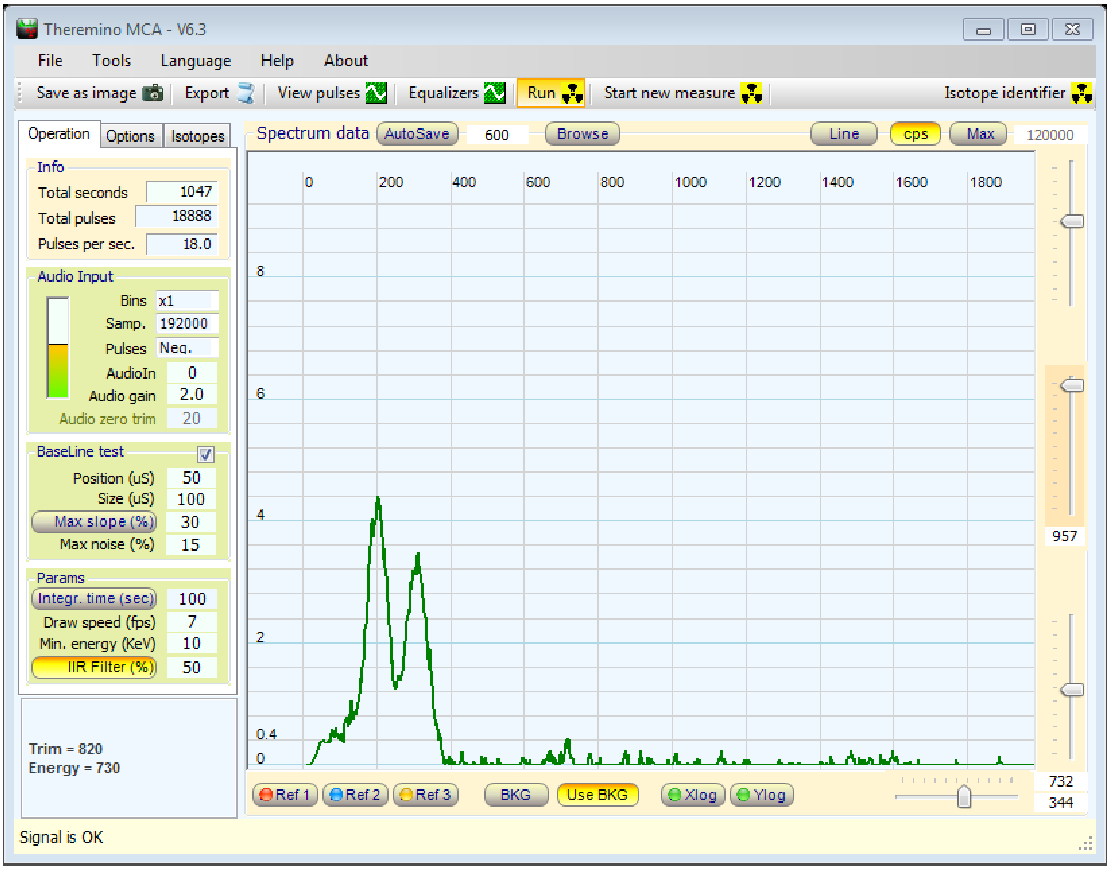


Abb. 26: Gamma-Spektrum von Lutetiumoxid mit subtrahiertem Background

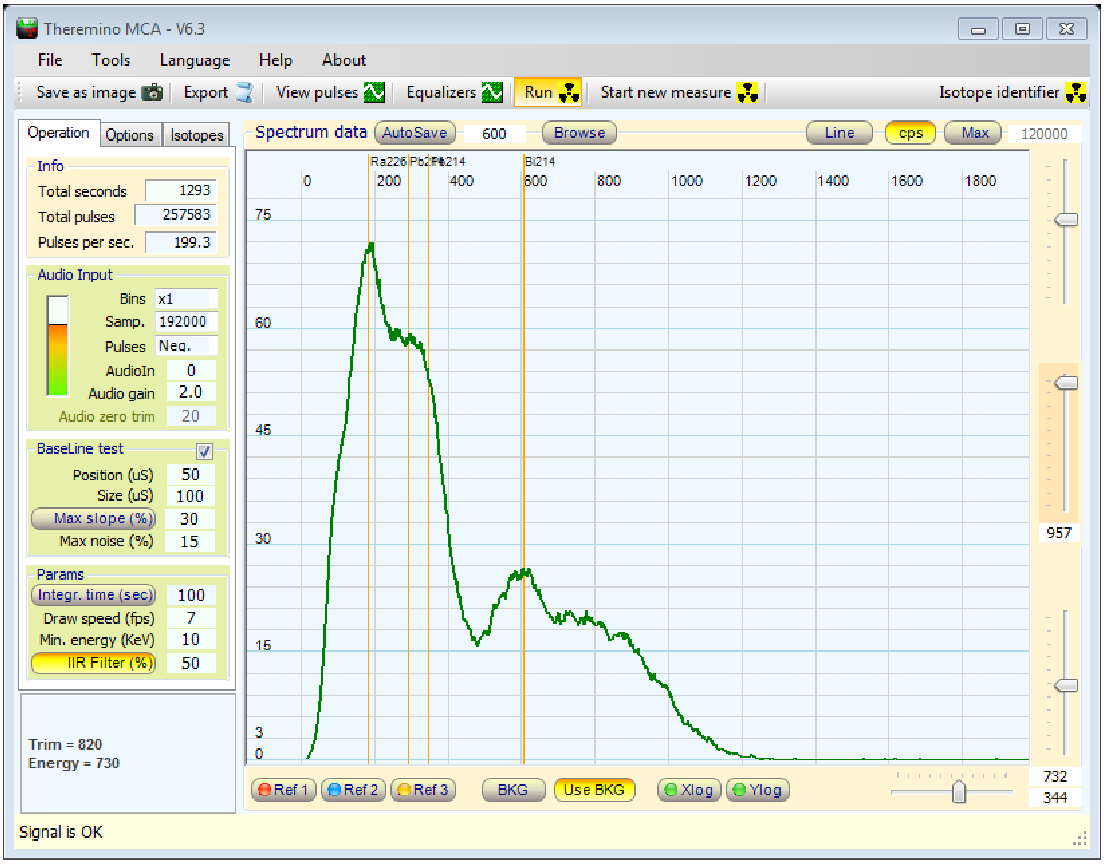


Abb. 27: Gamma-Spektrum von Uranerz mit subtrahiertem Background

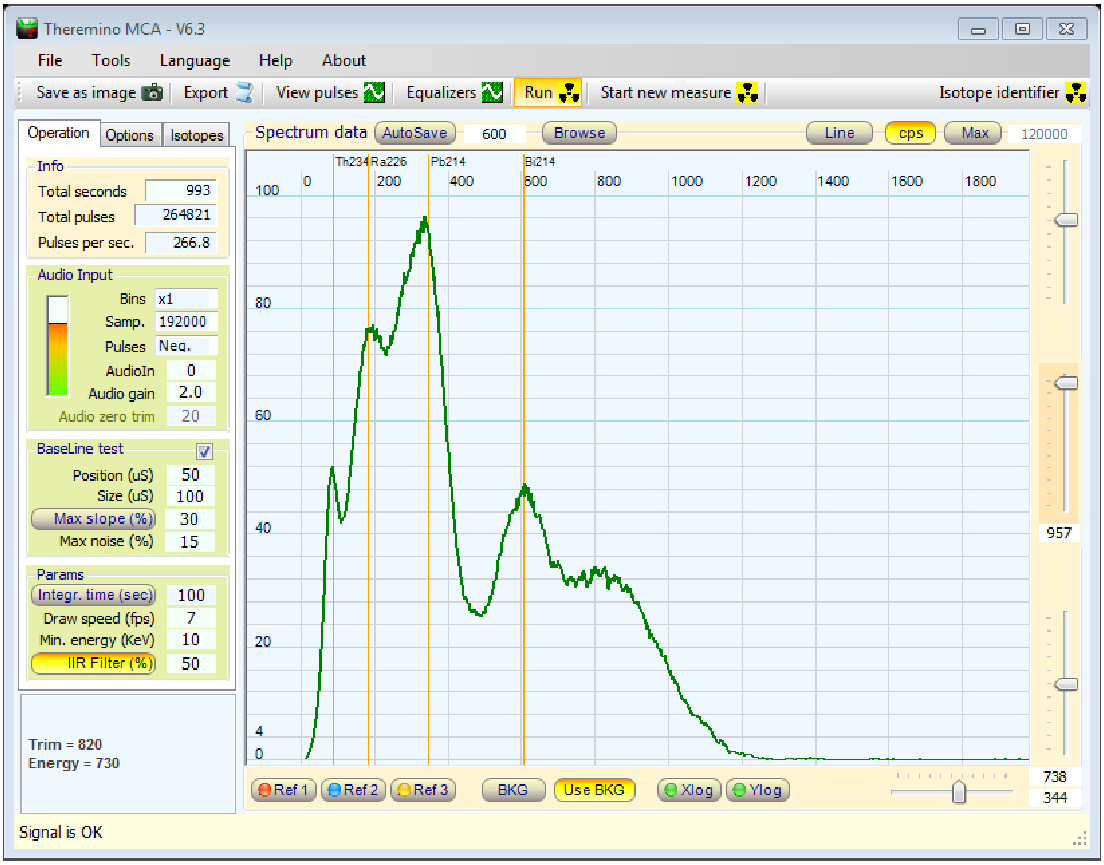


Abb. 26: Gamma-Spektrum von Ra226 Leuchtzeigern mit subtrahiertem Background

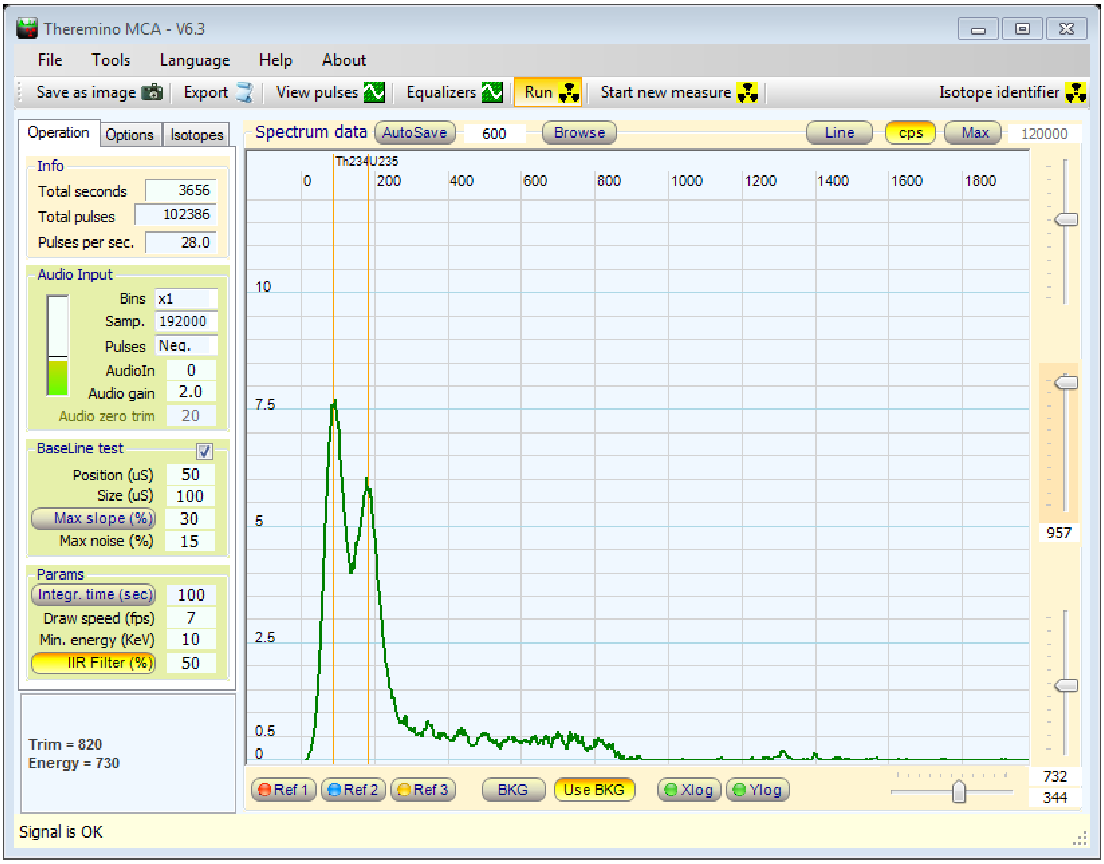


Abb. 27: Gamma-Spektrum einer Uranglasur mit subtrahiertem Background

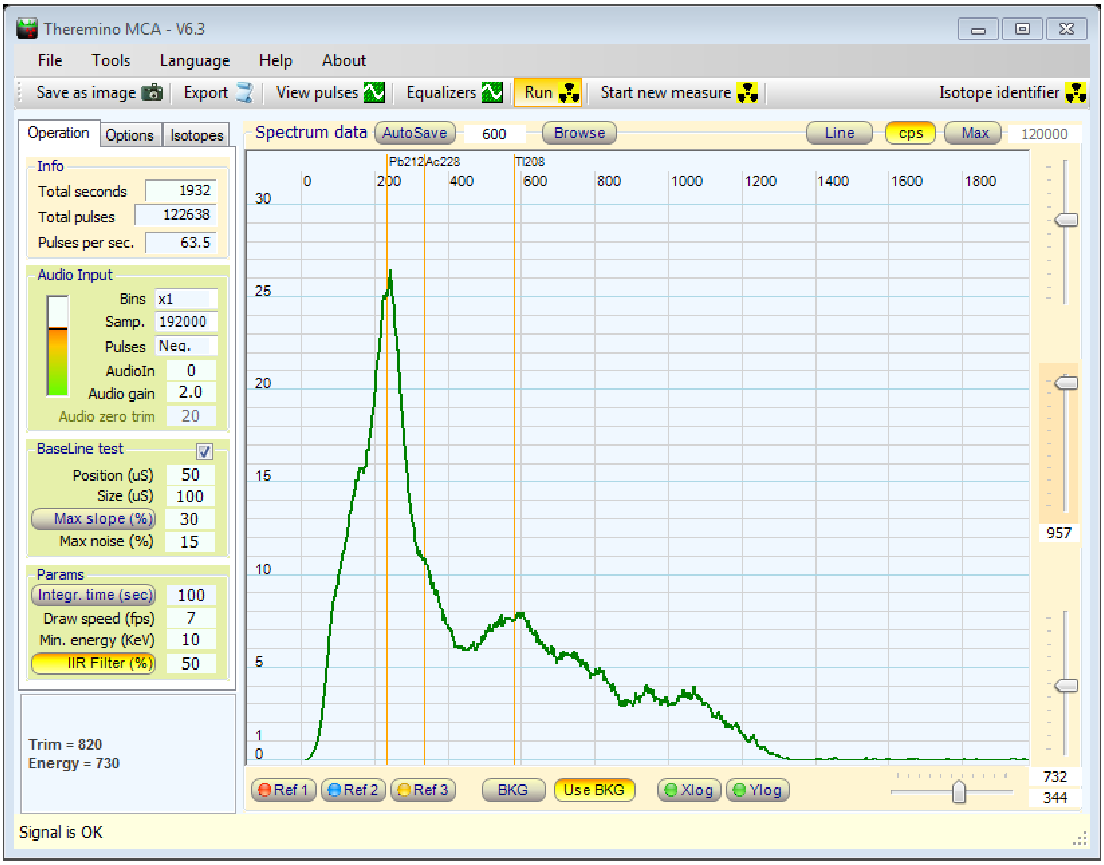

Abb. 28: Gamma-Spektrum von Thoriumsand mit subtrahiertem Background

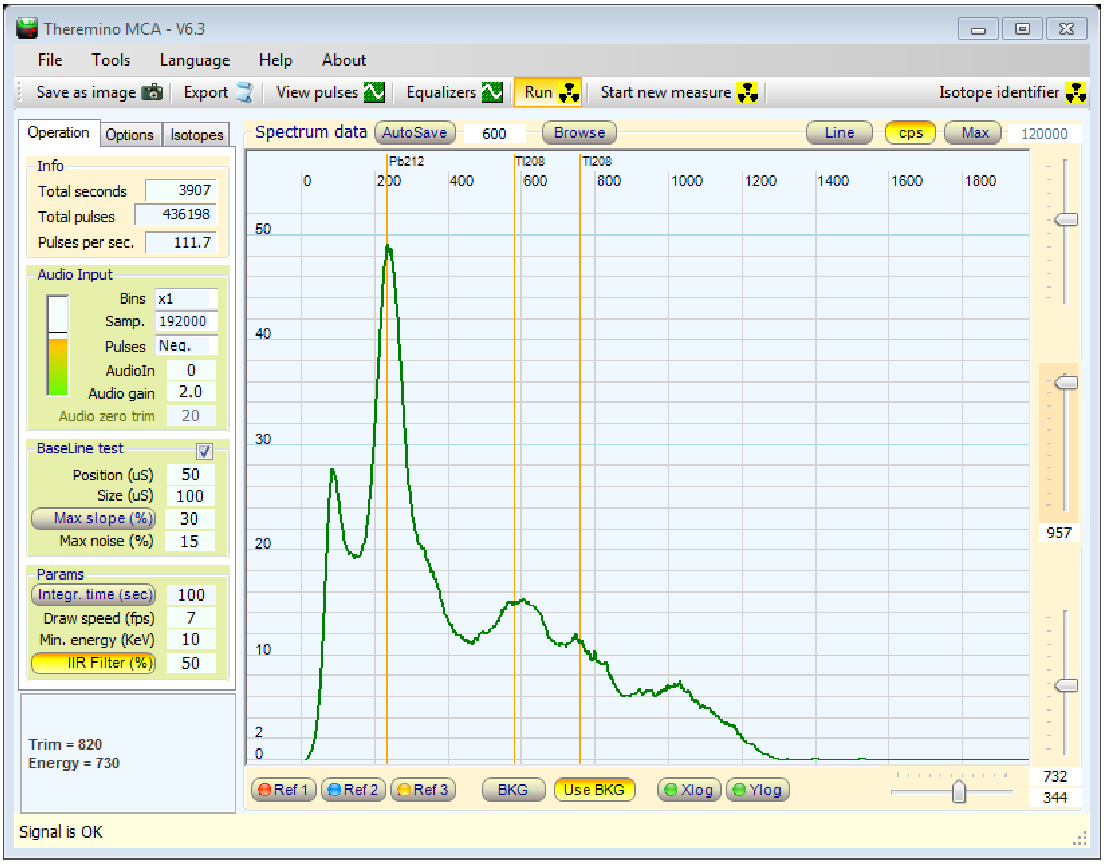

Abb. 29: Gamma-Spektrum eines Glühstrumpfs mit subtrahiertem Background

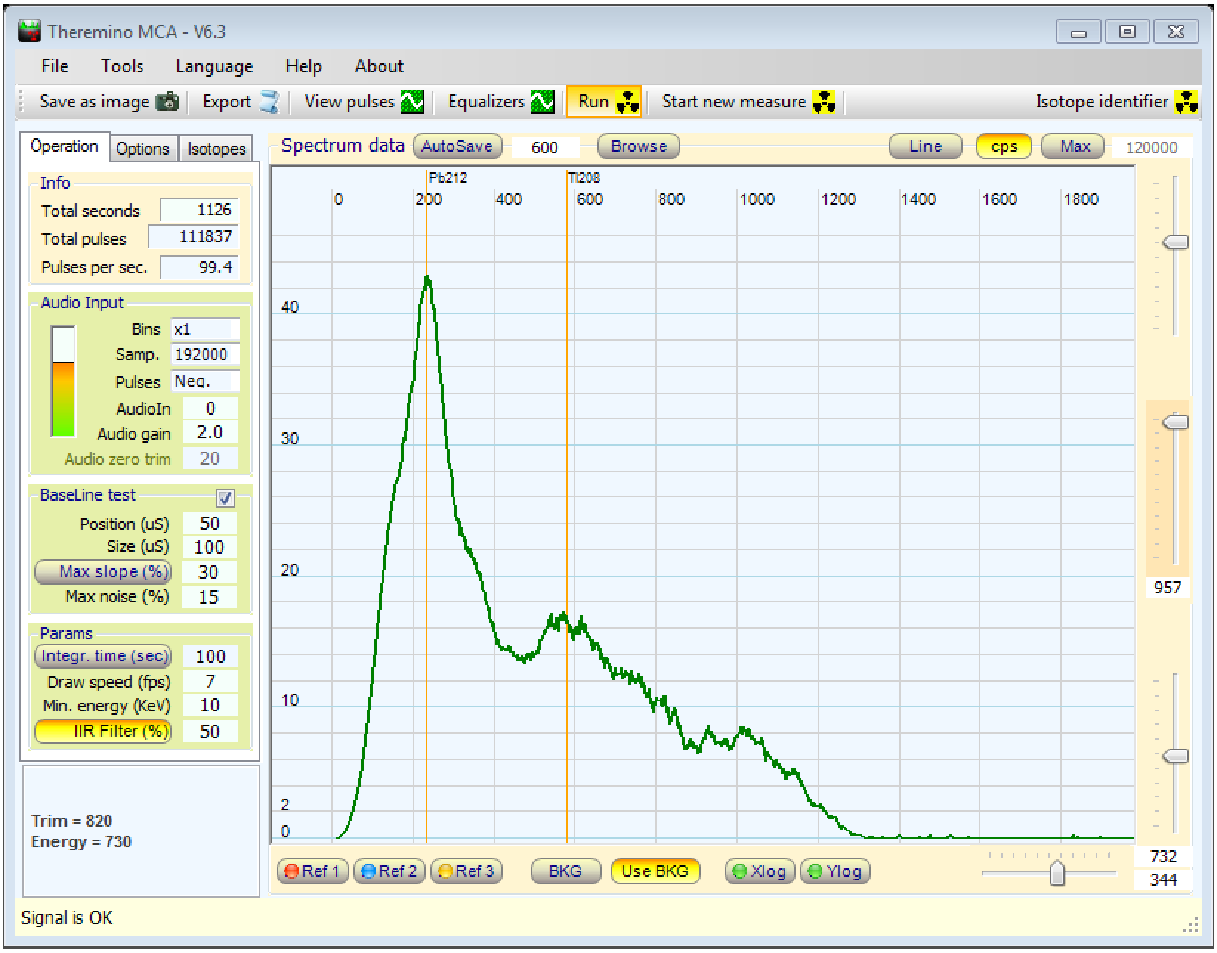


Abb. 25: Gamma-Spektrum eines Fotoobjektivs mit thorierter Linse mit subtrahiertem Background

## Literatur


/1/ Ein Miniatur-Detektor für Gamma-Strahlung auf der Basis eines Szintillators mit Silicon Photomultiplier (SiPM)
http://opengeiger.de/SiPMDoku.pdf

/2/ 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

/3/ 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

/4/ First Sensor
Introduction to silicon photomultipliers (SiPMs)
http://www.first-sensor.com/cms/upload/appnotes/AN_SiPM_Introduction_E.pdf

/5/AvanSiD
Introduction to SiPMs – AdvanSiD
http://advansid.com/attachment/get/up_89_1411030571.pdf

/6/ Hamamatsu
What is an MPPC?
http://www.hamamatsu.com/jp/en/community/optical_sensors/sipm/what_is_mppc/index.html

/7/ 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

/8/ Hamamatsu
MPPC® , MPPC Modules
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9003e.pdf

/9/ Theremino - The real modular input output
http://www.theremino.com

/10/ Theremino Gamma-Spectroscopy Blog
http://www.theremino.com/en/blog/gamma-spectrometry