

Ein Theremino-kompatibler PMT-Adapter für die Gammaskopie mit einer PC-Soundkarte

Bernd Laquai, 28.11.2016, updated 05.06.2023

Die Entwickler des Theremino Teams (Theremino – The real modular in out) leisten mit ihrem Internet-Auftritt wirklich Großartiges. Sie zeigen nämlich der interessierten und einigermaßen bastlerisch begabten Community (unter anderem) sehr anschaulich, wie auch eine Gamma-Spektroskopie mit relativ geringen Kosten auf der Hardware-Seite möglich ist, wenn man eine Soundkarte für den PC als A/D-Wandler einsetzt und die Impulse eines Szintillationsdetektors per PC-Software in den Kanälen eines softwaretechnisch implementierten Multi-Channel-Analyzers zum Spektrum sortiert. Solche Gamma-Spektren sind zur Nuklididentifikation radioaktiver Proben fast unabdingbar. Das großartige an der Theremino-Entwicklungsleistung ist, dass auf diese Weise ein sehr kostspieliger Teil der Gamma-Spektroskopie in eine mittlerweile doch recht komplexe und leistungsfähige Software verlagert wurde, die kostenfrei zur Verfügung gestellt wird. Gerade die Begeisterung über dieses doch sehr gelungene Citizen Science Projekt reizt allerdings auch, die Idee auf ihrer Hardwareseite zugunsten der Qualität doch noch etwas weiterzuentwickeln, auch wenn sie dann vielleicht von den Bauteilekosten nicht mehr ganz so kostengünstig bleibt und auch der Aufbau etwas mehr Mühe kostet.

Der Theremino PMT-Adapter zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass nur ein Verbindungskabel zum Photomultiplier (PMT) verwendet wird und damit Hochspannung und Signal auf dem gleichen Kabel vom Photomultiplier zum Adapter übertragen werden können. Die Hochspannungserzeugung und die Signalauswertung werden gemeinsam auf einer Karte untergebracht und werden auch gemeinsam geschirmt. Die Masse liegt dabei auf der Seite der Kathode am PMT. Das heißt aber auch, dass das Signal für die Impulsformung über einen Hochspannungs-Auskoppelkondensator abgetrennt werden müssen. Da die Anode eines PMT in dieser Beschaltung im Wesentlichen eine Stromquelle darstellt, ist ein Lastwiderstand in der Auswerteschaltung nötig, der das Stromsignal in ein Spannungssignal überführt. Impulshöhe und Impulsdauer der Impulse hängen stark von diesem Lastwiderstand ab. Beim Theremino PMT Adapter sind das zwei 1 Megohm Widerstände auf der Platine, die in Serie zum 1Megohm Anodenwiderstand am PMT-Sockel geschaltet sind und seriell vom Anodenstrom durchflossen werden. An den Lastwiderständen entsteht das Spannungssignal, das von der 4.7nF Hochspannungs-Kapazität ausgekoppelt wird. Die darauffolgende Schaltung besteht beim Theremino-Adapter aus einem passiven Tiefpassfilter zur Impulsformung, gefolgt von einem 2-stufigen Transistorverstärker. Die Hochspannung wird von einem Transistor-Sperrwandler mit Hochspannungskaskade geliefert.

Um die Schaltung in ihrer Funktion besser verstehen zu können, kann man sich das PMT durch eine Stromquelle ersetzt denken. Dann spielt auch der Anodenwiderstand keine Rolle mehr, da er genau wie die Vorwiderstände in Serie zur unendlich hochohmigen Stromquelle liegt und vom gleichen Strom durchflossen wird. Für das AC-Signal alleine ist schließlich auch die Hochspannung irrelevant, so dass man die Hochspannungsquelle im funktionalen Modell durch einen Kurzschluss oder eine Spannungsquelle mit 0V ersetzen kann. Für das Spannungssignal, das vom Auskoppelkondensator übertragen wird, sind daher nur die zwei 1 Megohm Vorwiderstände und die Stromquelle des PMT selbst zusammen mit der Eingangsimpedanz des PMT-Adapters als Last entscheidend. Stromquelle und Vorwiderstände lassen sich schließlich in eine Spannungsquelle mit 2Megohm Innenwiderstand transformieren, was nun für die Rechnung ein deutlich einfacheres Modell darstellt als die real vorhandene Anordnung.

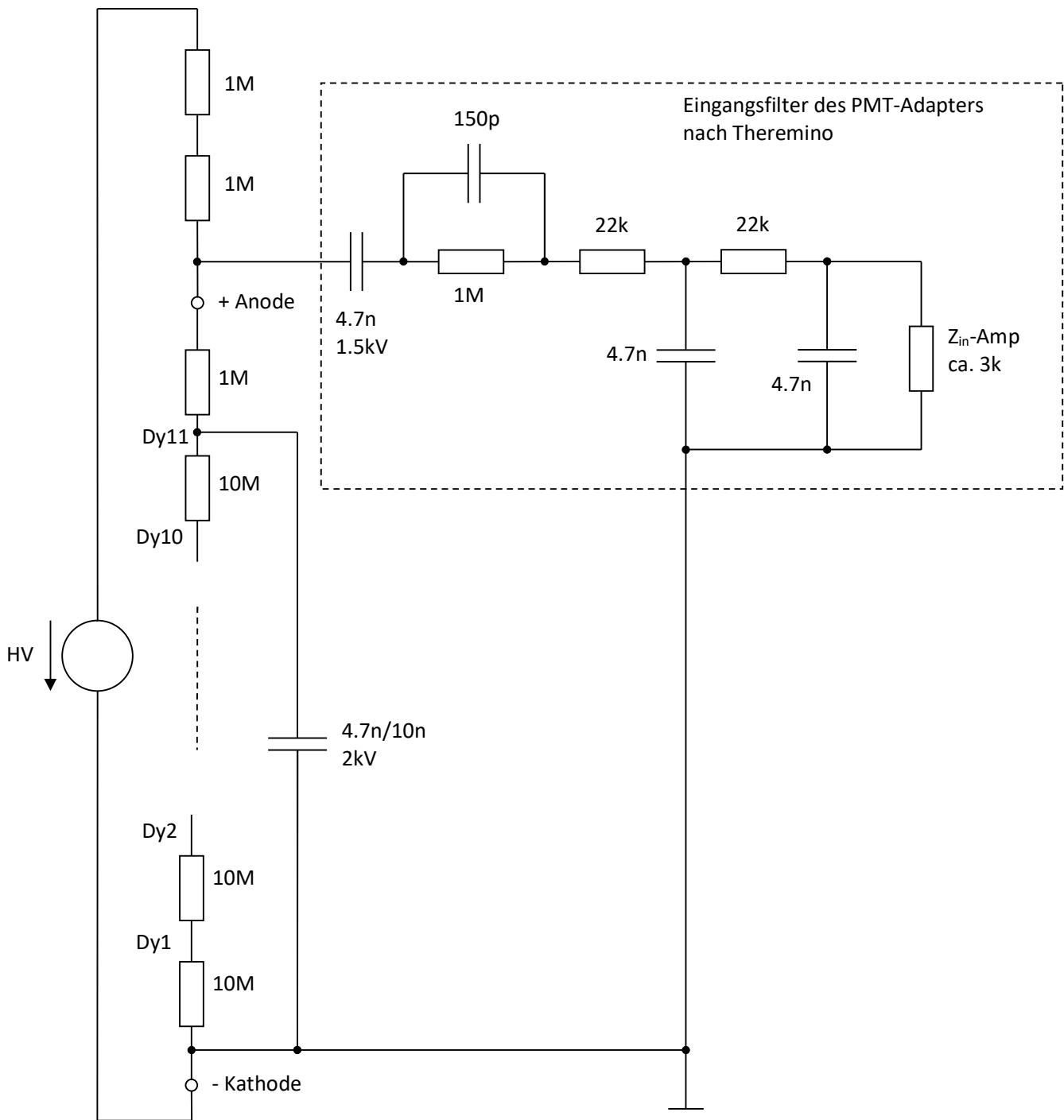


Abb. 1: Beschaltung des Photomultipliers nach der Theremino-Anleitung und Eingangsfiter des Theremino-PMT Adapters

Nun lässt sich die Therenino-Impulsformung dadurch umgestalten, dass man den Transistorverstärker, der im Durchlassbereich des Filters zur Impulsformung eine Eingangsimpedanz von etwa 3kOhm hat, durch eine sehr hochohmige Operationsverstärkerschaltung ersetzt. Für die Auslegung eines alternativen Tiefpassfilters zur Impulsformung muss auch der Einfluss der Hochspannungsauskopplkapazität beachtet werden, die man als frequenzabhängiges Koppelglied auffassen muss. Ganz prinzipiell muss die Hochspannungsquelle mit einem hochohmigen Vorwiderstand angeschlossen werden, so dass die Auskopplkapazität mit diesem eine möglichst große Zeitkonstante bildet. Nur dann werden die Signalpulse des PMT in ihrer Form nicht verändert. Dieser Vorwiderstand muss aber immer noch klein genug sein, um genug Strom an die Dynoden liefern zu können, wenn dort die Photoelektronen zu einem Strom vervielfacht werden, und die Spannung an den Dynoden trotzdem stabil bleiben soll.

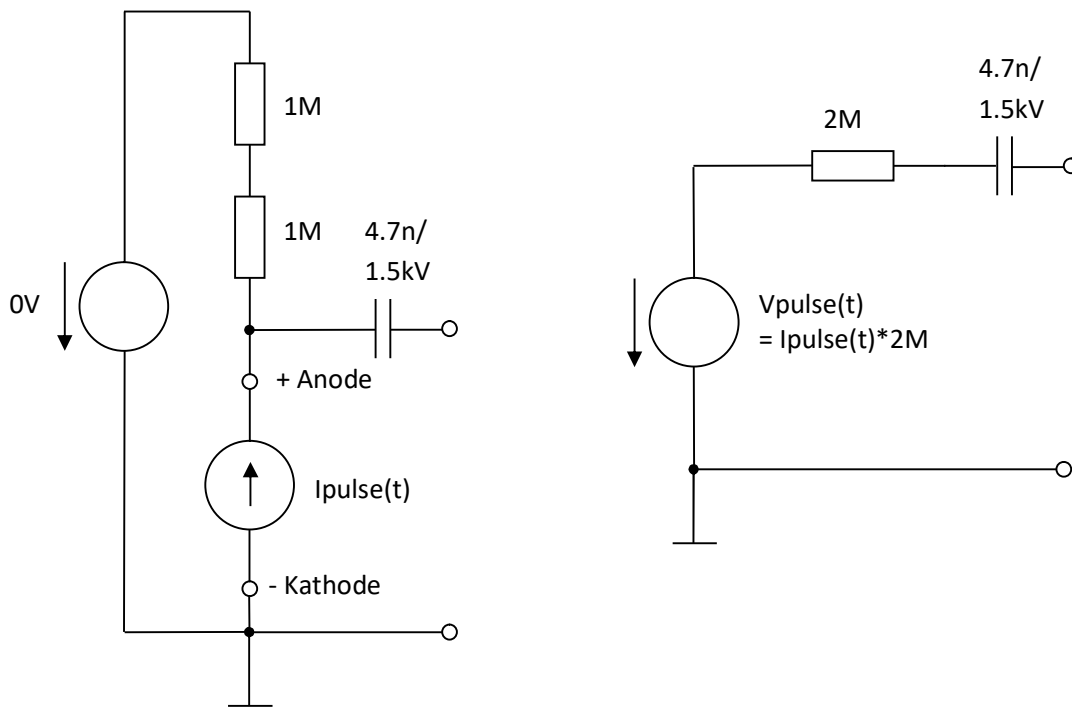


Abb. 2a, 2b: Ersatzschaltung für den Photomultiplier und die Auskopplung des Signals

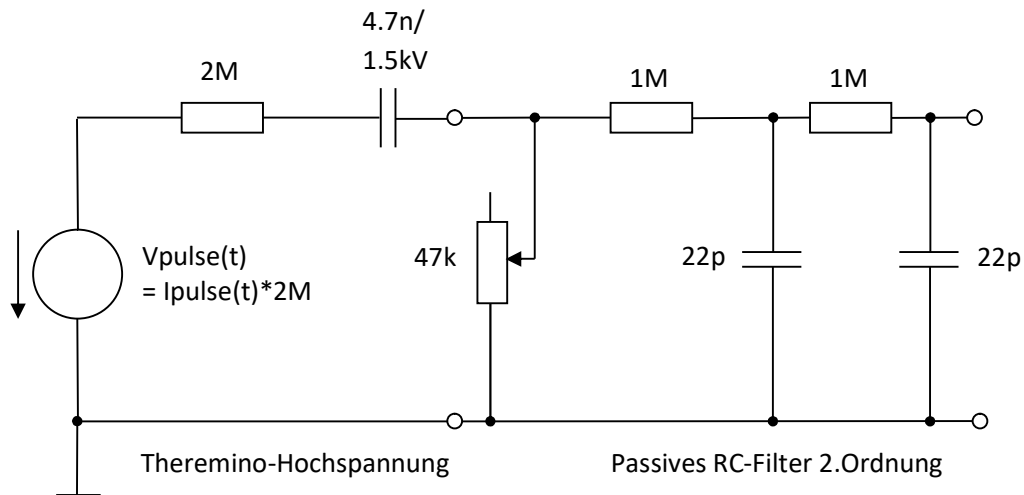


Abb. 3: 2-stufiges passives RC-Filter zur Impulsdehnung

Eine besondere Forderung an den Pulsformer ist, dass er eine Impulsantwort erzeugt, die wirklich auf die gewünschte Pulsdauer beschränkt bleibt und kein Klingeln oder Unterschwingen auf der fallenden Flanke erzeugt. Taucht beispielsweise ein Unterschwingen auf, das deutlich länger andauert als der Hauptteil des Impulses, dann setzt ein kurz darauf auftretender Impuls auf einem tieferen Pegel auf und erzeugt eine geringere Signalamplitude des Signals bei der Auswertung. Die Amplitude variiert dann abhängig vom Abstand zum vorigen Puls. Dieses Pulsraten-abhängige Unterschiesßen erzeugt also eine Pegelvariation (Baseline Wander), die sich in einer Verbreiterung der Halbwertsbreite der Linien im Spektrum äußert, wenn sie später software-technisch nicht vollständig eliminiert werden kann (baseline correction). Daher muss bei der Pulsformung darauf geachtet werden, dass der geformte Puls auf der fallenden Flanke möglichst kein Unterschwingen erzeugt. Oft wird ein solches Unterschwingen auch allein durch die Koppelkapazität zur Soundkarte erzeugt, die zusammen mit dem Eingangswiderstand der Soundkarte einen zusätzlichen Hochpass mit niedriger Grenzfrequenz bildet. Daher muss diese Koppelkapazität so groß wie möglich gewählt werden, so dass die entsprechende Grenzfrequenz möglichst tief bleibt.

Eine Pulsformung besteht in der Regel aus einer Tiefpassfilterung mit einer Zeitkonstante, die in der Größenordnung liegt, wie die gewünschte Pulsbreite. Wenn die Soundkarte mit $192kSps$ abtastet, dann beträgt die Abtastdauer $1/(192 * 10^3 \text{ Hz}) = 5.2\mu s$. Damit die Soundkarte den Puls sauber darstellen kann, sollte man den geformten Impuls mit grob 30-50 Abtastwerten erfassen, d.h. er sollte grob eine Länge von $200\mu s$ haben. Ein Tiefpass, der das leistet, hätte dann wiederum eine Bandbreite von etwa $5kHz$. Beim Dehnen der kurzen Ladungsimpulse des PMT mit einem Tiefpass auf eine Dauer von etwa $200\mu s$ geht natürlich auch Signalstärke verloren. Grob kann man dabei sagen, dass die Fläche unter dem Puls erhalten bleiben muss. Um diesen Amplituden-Verlust wieder auszugleichen braucht man in der Regel eine Verstärkung, die man jedoch weitestgehend der Soundkarte überlassen kann. Daher benötigt man

bei der Pulsformung selbst keine Verstärkung. Die Eingangspulse, welche die Photomultiplier-Röhre erzeugt, liegt bei einer 1Mohm Last und Theremino-Beschaltung bei etwa 1-5µs Dauer und mehreren 10V Impulshöhe.

Damit die Theremino-Software die Ladung der Impulse durch Integration korrekt berechnen kann, ist es zweckmäßig mit einer Impulsformung die Flanken der am Ausgang des PMT auftretenden Impulse mit exponentieller Form möglichst gleichmäßig zu verrunden. Um die eingangsseitig sehr kurzen Impulse korrekt zu bearbeiten, wäre der Aufwand für eine rein aktive Filterschaltung sehr aufwändig. Daher kann man den Weg gehen, dass man zunächst mit einem passiven, 2-stufigen RC-Filter die Impulsdauer auf etwa 200µs dehnt, ohne dabei große Rücksicht auf die Form zu nehmen, um sie erst danach mit einer zweiten aber dann aktiven Filterstufe bestmöglich zu formen. Während ein RC-Tiefpass 1.Ordnung noch relativ starke Unstetigkeiten (Ecken) im Signal belassen würde, liefert ein passiver Tiefpass 2.Ordnung bereits ein um die hohen Frequenzen schon stark bereinigtes Signal, welches der gewünschten Bandbreite von 5kHz sehr nahekommt. Daher hat der darauffolgende hochohmige Verstärker, der als reiner Impedanzwandler (Buffer) wirkt, nun keine Probleme mehr mit der Flanken-Anstiegszeit und muss auf Grund der Verstärkung 2 auch kein hohes Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (GBP) aufweisen. Das gleiche gilt für die zweite Stufe, die nun als aktives Filter (Sallen-Key Struktur) mit Verstärkung 1 ausgelegt werden kann.

Ein Spannungsteiler vor dem passiven Eingangsfilter, dient dazu die Eingangspulse in Breite und Höhe so einzustellen, dass die Soundkarte bei etwa mittlerer Verstärkung in einem vernünftigen Betriebspunkt eingestellt werden kann. Die schnellen Pulse am Eingang werden vom Hochspannungsauskoppelkondensator weitestgehend unverändert übertragen. Die gewünschte 3dB Bandbreite von 5kHz erreicht man, wenn man die beiden RC-Glieder aus 1M-Widerständen zusammen mit 22pF Kapazitäten bildet. Der nötige einstellbare Spannungsteiler wird durch die 2Mohm Widerstände im Hochspannungskreis zusammen mit einem 47kOhm Potentiometer gebildet.

Den Ausgang des passiven RC-Tiefpasses darf man natürlich nicht allzu sehr belasten. Allerdings sollte man den Gleichspannungs-Mittelwert am Eingang in die Nähe der Mittenspannung des darauffolgenden OP bringen, damit dieser sich im richtigen Arbeitspunkt befindet. Daher ist es zweckmäßig, das RC-Filter ebenfalls mit einem 1Megohm abzuschließen (wodurch sich die Grenzfrequenz leicht verändert). Bei der Auswahl des OP sollte man darauf achten, dass es sich um einen rauscharmen Verstärker handelt, da sonst das Rauschen von der Soundkarte genauso wie die Signale auch verstärkt wird. Damit würde das Rauschen dem Signal überlagert bleiben und die Linienbreite im Spektrum verbreitern. Der Verstärker sollte auch nicht unnötig viel Bandbreite haben, das würde einerseits Geld kosten und andererseits im Ausgangssignal wieder mehr hochfrequentes Rauschen erzeugen, selbst wenn das Tiefpass-gefilterte Eingangssignal kein Rauschen bei diesen Frequenzen beinhaltet. Ein einfacher OP für 5V Versorgungsspannung, den es im kleinen SOT23-5 Gehäuse gibt, ist beispielsweise der LMP7731 von Texas Instruments (22MHz GBP, 2.9nV/rtHz Rauschen für $f > 1\text{kHz}$).

Um den Puls nun noch etwas gleichmäßiger zu formen, sollte man dem passiven RC Filter ein zweites Filter mit etwa der selben Bandbreite nachschalten. Da die Flanken nun schon abgebremst genug sind, kann man dieses Filter als aktives Filter ausführen. Dabei muss man aber darauf achten, dass es einen möglichst linearen Phasengang hat, so dass kein Überspringen entsteht und die Impulsantwort auch nicht weiter verlängert wird. Besonders geeignet ist dafür ein sogenanntes Bessel-Filter, das so dimensioniert ist, dass es eine maximal lineare Phase aufweist. Da eine lineare Phase eine konstante Verzögerung für alle Frequenzen bedeutet, wird eine Flanke gleichmäßig abgebremst, ohne dass

Überschwinger auftreten. Auf diese Weise erhält man schön geformte Impulse, die in ihrer Fläche zur Eingangsladung proportional sind, und von der Soundkarte ideal gesampelt werden können.

Wenn beide Stufen mit einer Bandbreite von etwa 5kHz kombiniert werden, dann sinkt natürlich die Gesamtbandbreite gegenüber einer einzelnen Stufe etwas, so dass die finale Impulsdauer unter Umständen etwas größer ausfallen kann als die anvisierten 200µs. Hier ist es dann möglich ohne große Änderung an der sonstigen Impulsform die Impulsbreite durch eine geringfügige Veränderung der RC Zeitkonstanten in beiden Stufen anzupassen.

Die Schaltung lässt sich sehr gut mit einem Analogsimulator (zum Beispiel mit LTSpice) unabhängig vom verwendeten OP simulieren, wenn dieser einfach nur als gesteuerte Quelle mit hoher Verstärkung modelliert wird. Wichtig dabei ist, dass man bei der unipolaren Spannungsversorgung darauf achtet, dass alle Signale auf die Mittenspannung von 2.5V bezogen sind. Baut man die Schaltung auf, dann muss zum Austesten das Eingangssignal wie in der Anwendung kapazitiv eingespeist werden, am besten ebenfalls über einen 2Megohm und 4.7nF, so dass die Quelle einer AC gekoppelten Stromquelle ähnelt. Die Soundkarte sollte man als Last ganz entsprechend ihrer Eingangs-Ersatzschaltung am besten gleich mit simulieren. Möchte man dagegen die Impulsantwort mit einer Ansteuerung vom Pulsgenerator und einem Oszilloskop vergleichen, kann man die entsprechenden Teile in der Simulation (Stromquelle am Eingang bzw. Soundkarte als Last) durch Abtrennwiderstände per Werteänderung deaktivieren.

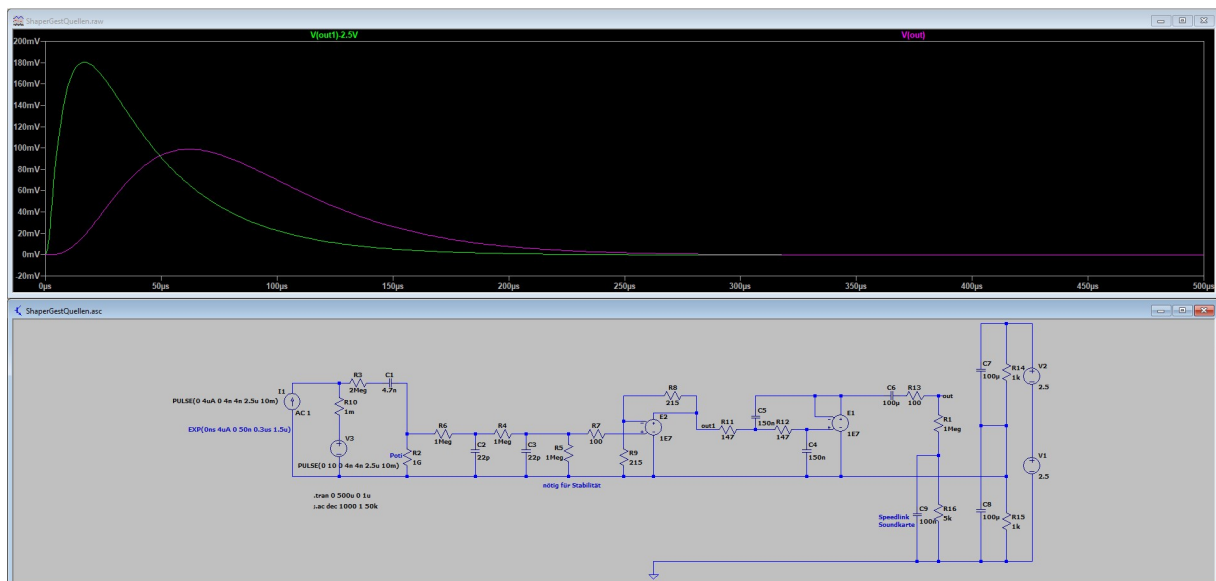


Abb. 3: Simulation des Impulsformers mit aktivem Besselfilter mit LT-Spice

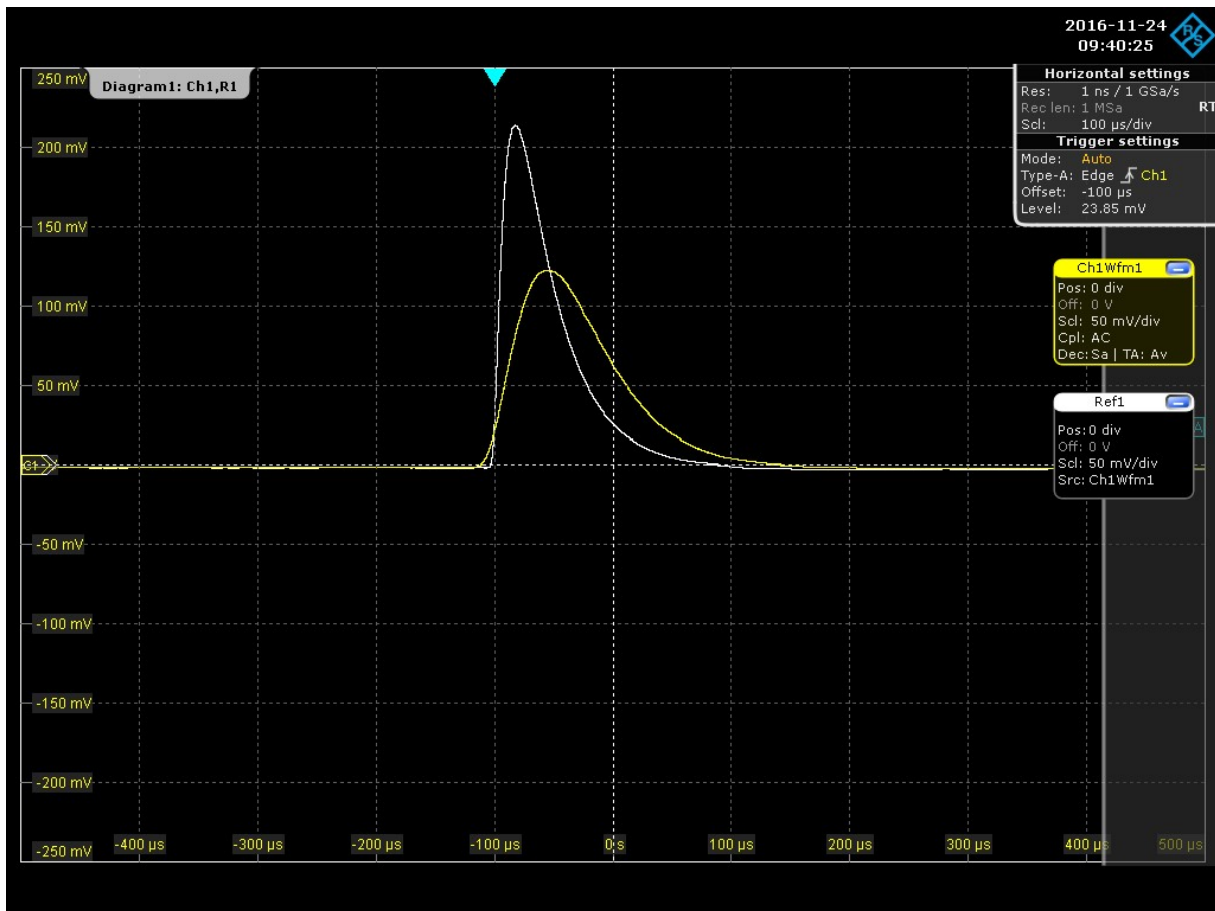


Abb. 4: Mit einem Pulsgenerator gemessene Impulsantwort der ersten und zweiten Stufe (Impulse mit 10V Amplitude, 5V Offset, 2.5μs Pulsdauer, und 4ns Anstiegszeit)

Als Stromversorgung benötigt man eine stabile 5V Quelle, die wenig Rauschen aufweist, welches sich natürlich wieder direkt den Ausgangsimpulsen überlagern würde. Daher sollte man als Spannungsversorgung einen guten 5V Spannungsregler vorsehen (z.B. LT1129-5), den man auch einansseitig gut abgeblockt haben sollte.

Der Theremino-Adapter erzeugt die Hochspannung über eine einfache diskrete Oszillatorschaltung in unmittelbarer Nähe zum Impulsformer. Auch das kann man natürlich anders machen. Allerdings macht es wenig Sinn hier das Rad neu zu erfinden. Es gibt heute sehr gute fertige Hochspannungsmodule, die für sich voll geschirmt sind. Diese sind intern präzise geregelt, temperaturstabilisiert und weisen einen nur minimalen Ripple (Störung durch den Schaltwandler) am Ausgang auf. Meist sind sie auch in der Spannung über einen speziellen Kontrollpin einstellbar. Man muss sich dabei klar machen, dass die Verstärkung des Photomultiplier direkt zur Hochspannung proportional ist und sich jede Schwankung auf der Versorgungsspannung unmittelbar auf eine Amplitudenschwankung der Impulse abbildet. Dieses wiederum sieht man genauso wie andere Amplituden-Störungen als Verbreiterung der Linien im Spektrum, was wiederum die Auflösung begrenzt. Diese Module (zum Beispiel das Modul THV 12-1000P von Tracopower) kosten fast 200Euro, dennoch muss man auch klar sehen, dass man am Ende sicher deutlich mehr Geld ausgegeben hat, bis man etwas mit vergleichbaren Leistungsmerkmalen selbst entwickelt und gebaut hat.

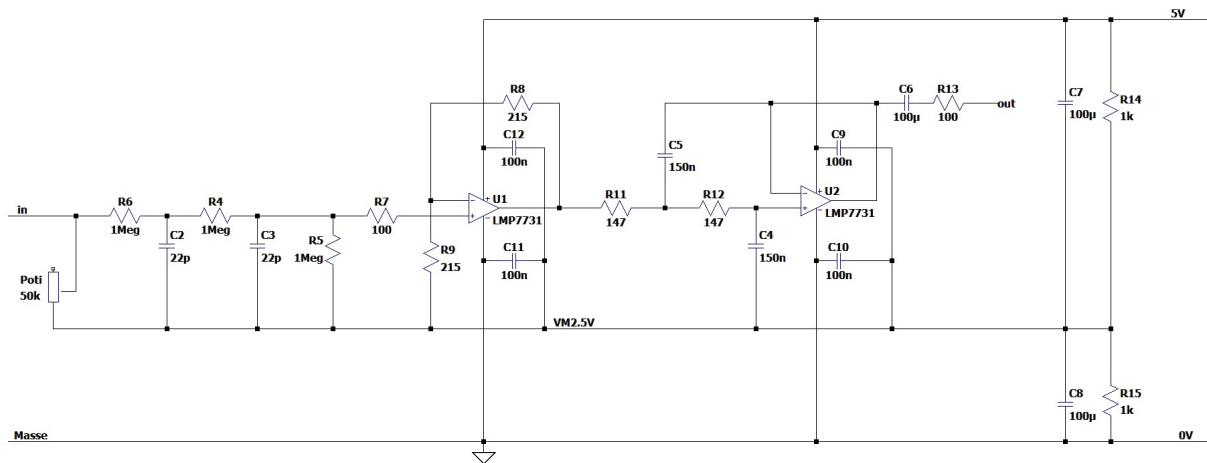


Abb. 5: Gesamtschaltung des Impulsformers aus 2-stufigem RC-Filter, Pufferverstärker und aktivem Bessel-Filter (finale Version)

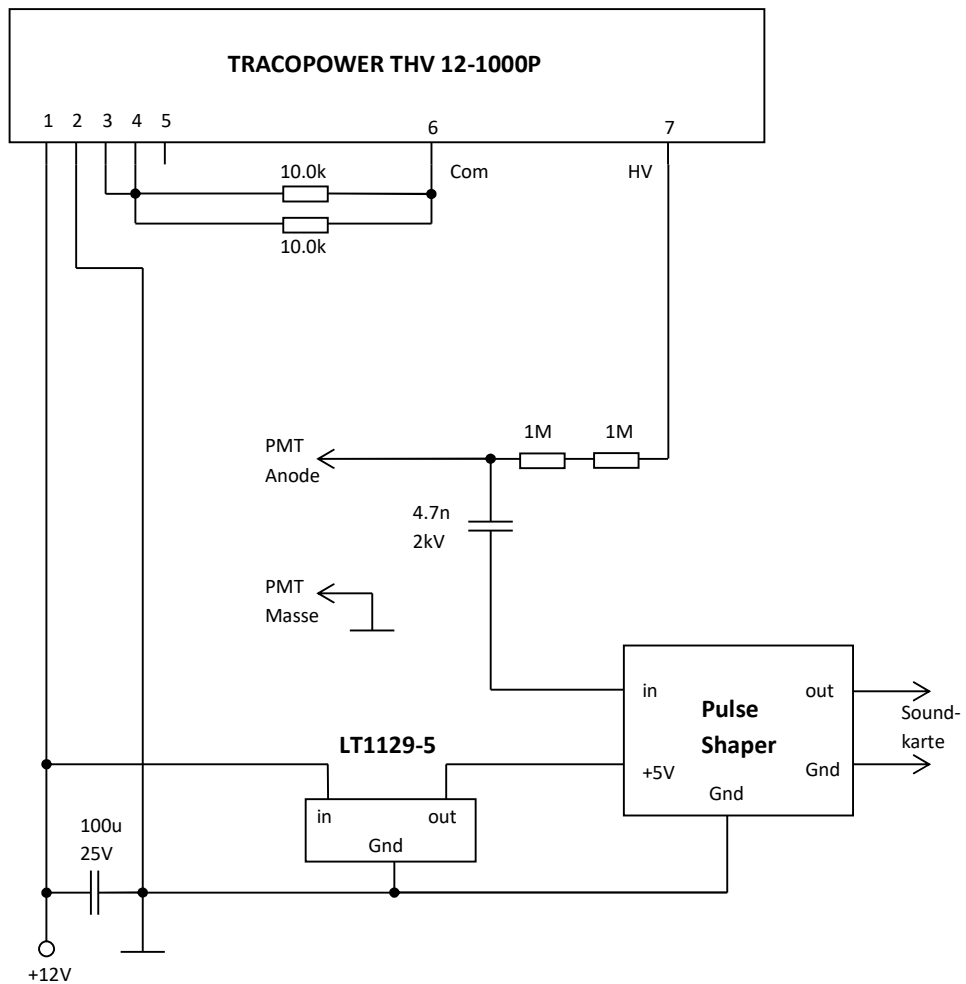


Abb. 6: Gesamtschaltung des Theremino-kompatiblen PMT-Adapters

Versucht man in laufendem Betrieb des Detektors die Impulse am Impulsformer nachzumessen, merkt man schnell, dass es kaum möglich ist mit einem hochohmigen Tastkopf brauchbare Signale abzugreifen, dazu sind einfach die Flanken am Eingang zu steil und die Amplituden am Ausgang zu klein. Beim Aufbau des Prototyps wurden daher SMA-Buchsen vorgesehen, so das man die Signale mit einem T-Stück mit guter Abschirmung auskoppeln kann. Die ganze Platine muss in einem leitfähigen Gehäuse untergebracht werden, um die Einstrahlung von Störungen zu verhindern. Man erkennt dann, dass die Eingangsimpulse bei einem Lastwiderstand von 1Mohm doch beträchtliche Amplituden erreichen, allerdings aber nur eine Impulsdauer von etwa 1-5us haben. Diese Amplitude reduziert sich massiv nach der ersten Stufe und kann je nach Einstellung des Spannungsteilers am Eingang noch Amplituden bis 500mV erreichen, wobei nun ein Impuls eine Dauer von fast 200us erreicht.

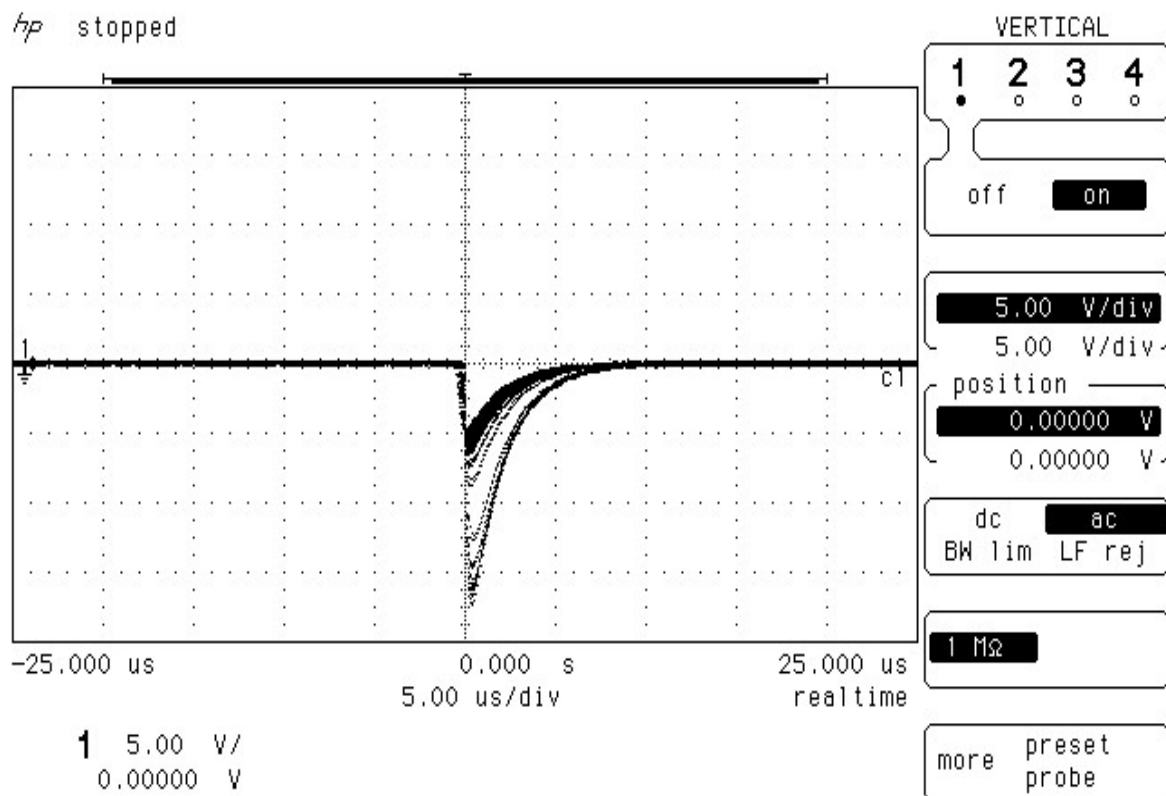


Abb. 7: Impulse am Eingang des PMT-Adapters

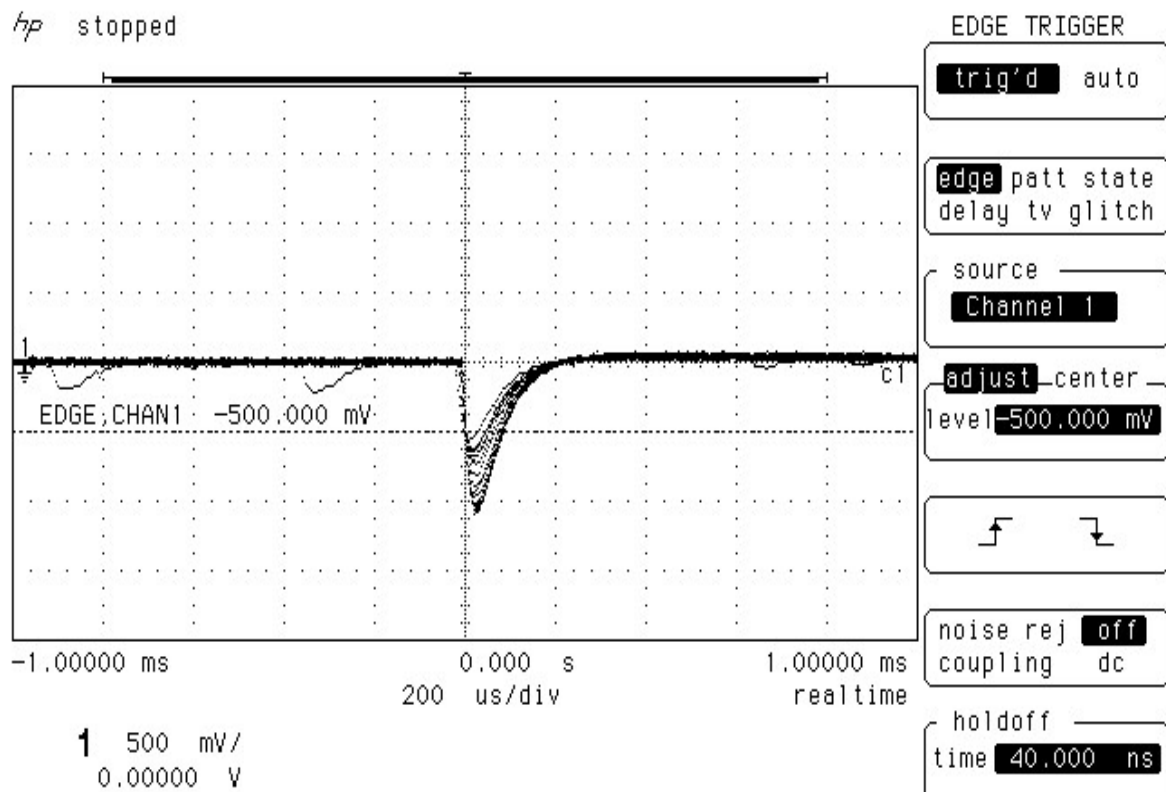


Abb. 8: Impulse nach dem Pufferverstärker der passiven RC-Filter-Stufe (ursprünglich 1Mohm, 47pF)

Jetzt ist es auch möglich die Impulse mit dem Theremino Pulse Shape Visualizer mit der Soundkarte zusammen zu verifizieren. Durch eine entsprechende Anpassung der RC-Zeitkonstanten und der Grenzfrequenz des Besselfilters kann man, wenn erforderlich, noch Feinkorrekturen an der Impulsdauer vornehmen. Beim diesem Prototyp wurde die Pulsdauer durch eine weitere Bauteileanpassung nochmals auf etwa 150us gesenkt. In der finalen Version (1Mohm, 22pF für das RC Filter und 150nF, 147Ohm für das Besselfilter) fallen dann auf die steigende Flanke nicht zu wenig und auch nicht zu viele Abtastwerte und man hat den Eindruck, dass die Software damit die Fläche unter dem Puls mit guter Genauigkeit berechnen kann. Ein Klingeln oder Unterschwingen der Pulse ist wie gewünscht nicht sichtbar.

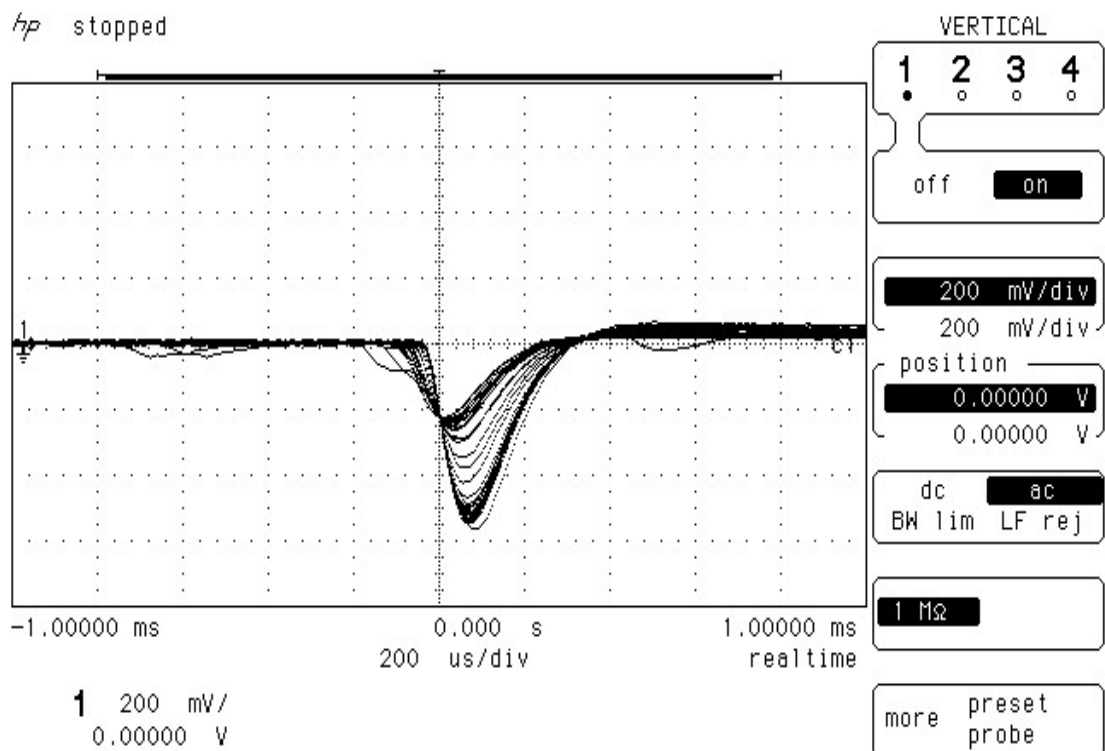


Abb. 9: Impulse am Ausgang des PMT-Adapters, nur mit Oszilloskop als Last (1M Ω m Eingangsimpedanz, ohne Tastkopf) und Besselfilter, mit anfänglich 150nF und 330nF

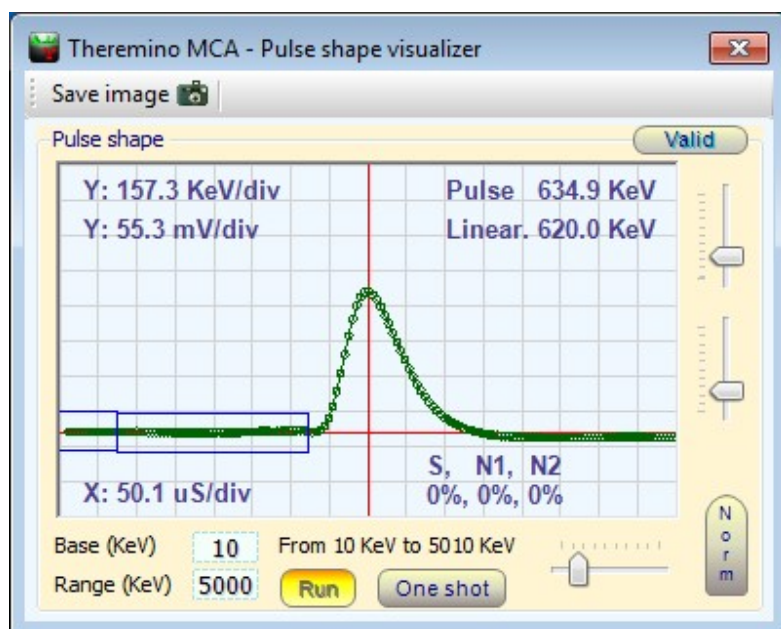


Abb. 10: Impulse wie sie von der Theremino-Software dargestellt werden (finale Version: 1Mohm, 22pF für das RC Filter und 150nF, 1470hm für das Besselfilter)

Erzeugt man damit nun Gamma-Spektren bekannter radioaktiver Proben, so hängen die Ergebnisse natürlich auch noch stark von der verwendeten Photomultiplier-Röhre und dem Kristall ab. Möchte man die Kalium-Linie bei 1460keV noch gut erkennen, ist ein System mit 3" Durchmesser zu empfehlen, mit einem 1" System und NaJ-Kristall wird das sehr schwierig, da die Absorptionswahrscheinlichkeit der hochenergetischen Gammaquanten in dem kleinen Durchmesser zu gering ist.

Die sehr hochohmige Beschaltung gemäß der Theremino-Anleitung (10M Ω zwischen den Dynoden) hat noch den Nachteil, dass die Spannung an den Dynoden nicht sonderlich stabil ist. Man kann versuchen eine Verbesserung dadurch zu erreichen, dass man den letzten 3 oder 4 Dynodenwiderständen eine Kapazität von 10nF / 500V parallelschaltet und damit Spannungsschwankungen infolge der impulsförmigen Ströme abblockt. Allerdings muss man dann sicherstellen, dass die Hochspannungsquelle inklusive der Vorwiderstände genug Strom liefern kann.

Man sollte dabei aber auch daran denken, dass die auf Hochspannung geladenen Kondensatoren schnell gefährlich werden können. Die Stärke und Gefährlichkeit des Stromschlags hängen für hohe Spannungen stark von der Ladung ab, die im Kondensator gespeichert ist und die proportional zu Spannung und zur Größe der Kapazität ist. Ganz grundsätzlich besteht bei diesen Spannungen Lebensgefahr und man sollte entsprechend umsichtig vorgehen!

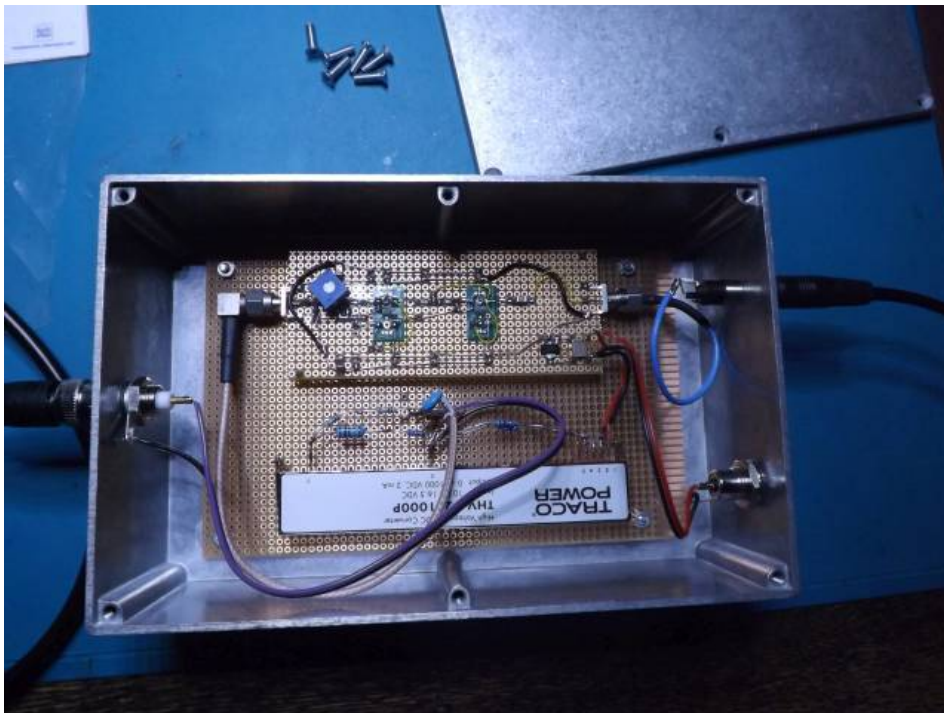


Abb. 11: Prototyp des Theremino-kompatiblen PMT-Adapters mit Hochspannungserzeugung und Impulsformung im Alu-Druckguss-Gehäuse

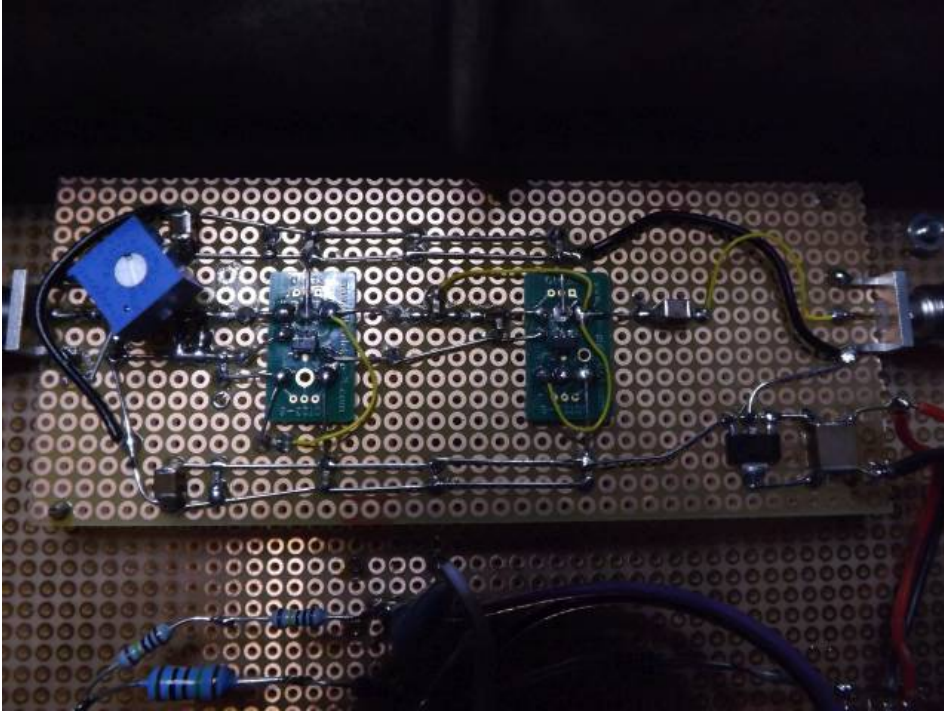


Abb. 12: Detailaufnahme des Impulsformers aufgebaut als Prototyp mit 0603 SMT-Bauteilen auf Lochraster und OPs auf Adapterplatinen der Firma Rohm

Für ein durchschnittliches 3" System sollte man nun für die Cäsium-Linie (Cs137 bei 662keV) eine Halbwertsbreite von unter 10% erreichen. Beim Natururan sollten sich die Ra226/U235 (186keV) und die darauffolgenden 3 Linien des Pb214 (242, 295 und 352keV) auch sauber trennen lassen. Beim natürlichen Thorium war es aber auch mit diesem System nicht möglich die AC228-Linien bei 911, 964 und 969 völlig getrennt darzustellen. Wo dieser PMT-Adapter jedoch einen besonders großen Vorteil zeigt, ist bei der Langzeitstabilität. Man kann tagelang ein Spektrum akkumulieren, ohne dass man eine Verschiebung oder Verbreiterung erkennen kann. Auch nach dem Einschalten, ist die richtige Lage der Linien sofort vorhanden, ein zeitaufwändiges Warmlaufen lassen entfällt völlig.

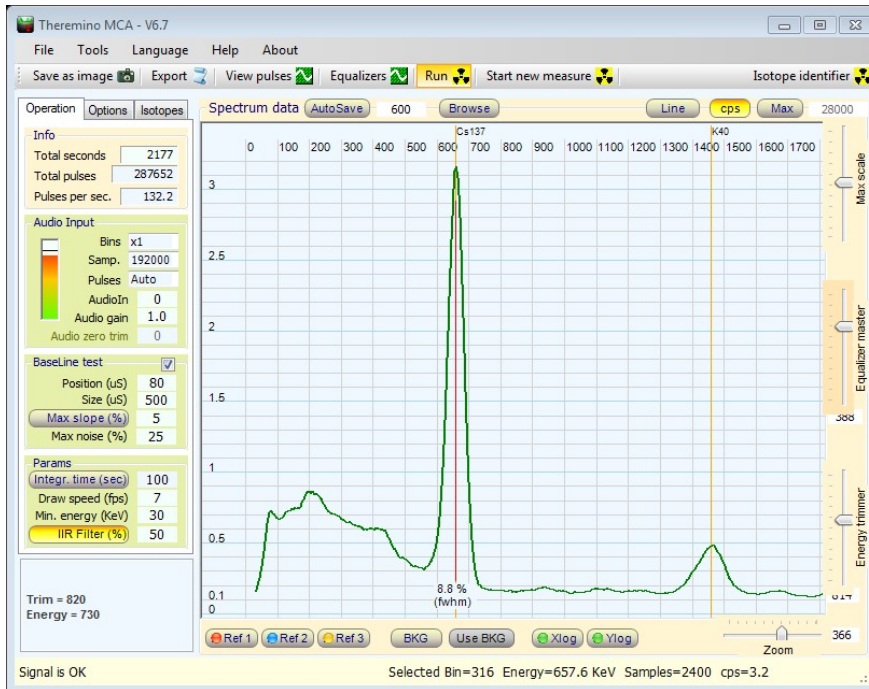


Abb. 13: Mit dem PMT-Adapter und einem 3-Zoll Detektor aufgenommenes Gamma-Spektrum einer Spark-Gap Röhre mit Cs137-Klecks zur Vorionisation

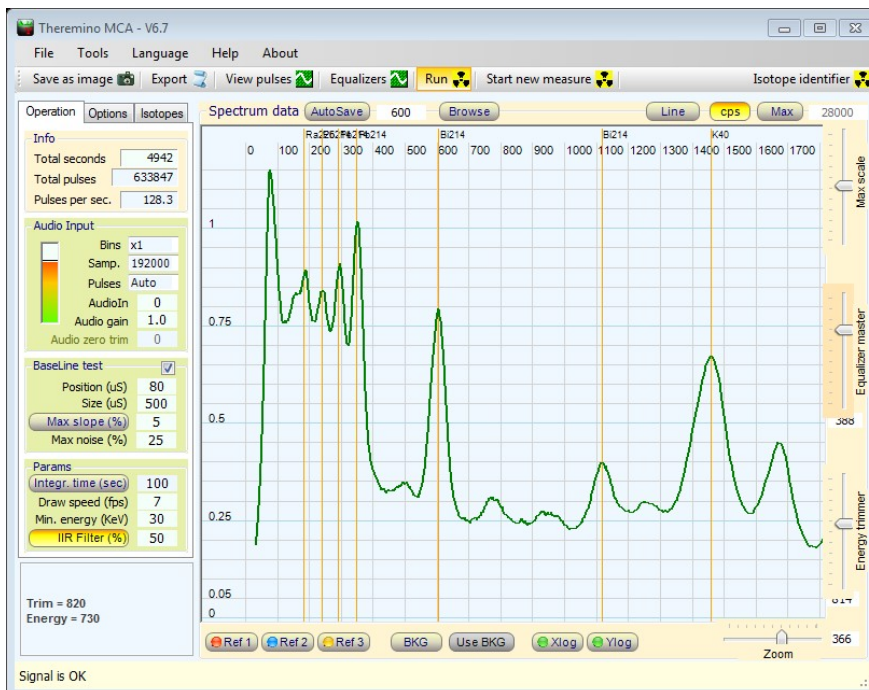


Abb. 14: Mit dem PMT-Adapter und einem 3-Zoll Detektor aufgenommenes Gamma-Spektrum eines Erzstückchens das Natururan enthält (Fundort Menzenschwand)

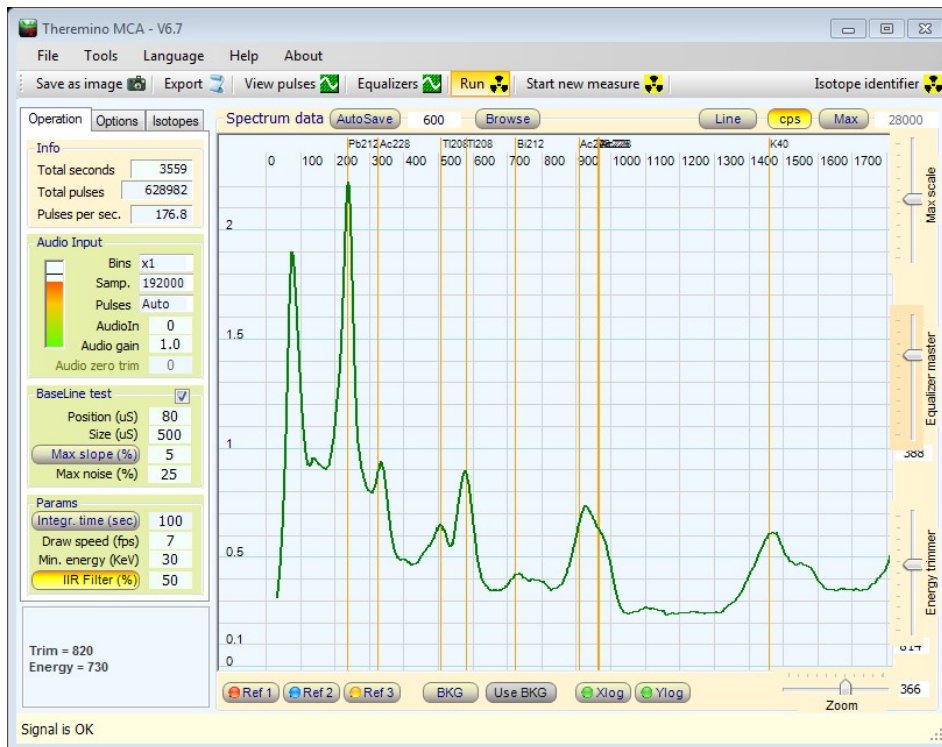


Abb. 15: Mit dem PMT-Adapter und einem 3-Zoll Detektor aufgenommenes Gamma-Spektrum eines alten Thorium-Glühstrumpf einer Gaslaterne

Literatur

/1/ Theremino MCA

PMT-Adapter V3.3

Audio Adapter, PMT tube connections

System Theremino - PMT Adapters V3.3 - March 5, 2013

http://www.theremino.com/wp-content/uploads/2013/03/PmtAdapters_ENG.pdf

/2/ Texas Instruments Application Report

SNOA387C–September 1997–Revised May 2013

OA-26 Designing Active High Speed Filters

/3/ Texas Instrments Datasheet LMP7731

SNOSAT6E –JULY 2007–REVISED MARCH 2013

2.9 nV/sqrt(Hz) Low Noise, Precision, RRIO Amplifier

/4/ Tracopower

High Voltage Power Supplies

THV Series, 2 – 3 Watt