Eigenbau eines Szintillations-Detektors mit NaI-Szintillator und Photomultiplier als empfindlicher, mobiler Sensor für Umwelt-Radioaktivität

Bernd Laquai, 24.1.16, Update 2.2.16

Ein Geiger-Müller Zählrohr ist sicher ein günstiger, robuster und universeller Detektor für radioaktive Strahlung, der oft auch ausreichend empfindlich für Gamma- und Betastrahlung ist. Manchmal bekommt man auch noch eine zusätzliche Empfindlichkeit für Alphastrahlung dazu, wenn das Zählrohr mit einem speziellen, sehr dünnen Fenster versehen ist. Die Zählraten sind liegen bei normal großen zylindrischen Rohren im Bereich von 100-200cpm/(uSv/h) für die Strahlung von Cäsium 137. Im praktischen Einsatz stellen Geiger-Müller Zählgeräte oft ein Ergebnis für die Summe aller gleichzeitig detektierten Strahlungsarten und Energien in uSv/h dar, was in vielen Situationen kein ganz richtiges Ergebnis ist. Nun gibt es aber Situationen, da ist man wirklich nur an der Gamma-Strahlung interessiert und man möchte eine möglichst hohe Zählrate, damit man schon in kurzer Zeit eine brauchbare Statistik bekommt und das Ergebnis möglichst stabil und wiederholbar bleibt. Das gilt besonders für die Messung der Radioaktivität in der Umwelt, wo vor allem eine relativ schwache Gammastrahlung die stärkste äußere Exposition darstellt und dabei teilweise sogar dickere Schichten des Oberbodens durchdringt.

In solchen Fällen ist ein Szintillationsdetektor, bestehend aus Szintillationskristall und Photomultiplier, die günstigste Wahl als Detektor. Das liegt hauptsächlich daran, dass bei einem Szintillationszähler ein Volumeneffekt im Kristall genutzt werden kann, während der Detektionsmechanismus beim Zählrohr nur ein Flächeneffekt an der Zählrohroberfläche ist (das Auslösen von Photoelektronen aus dem Metall). Das hat zwei Konsequenzen: Einmal kann man im Volumen sehr viel mehr Quanten detektieren, damit ist die Zählrate höher und andererseits ist auch die Wahrscheinlichkeit größer, insbesondere bei hohen Energien, dass es im Volumen eines (großen) Szintillationskristalls zu einer Wechselwirkung kommt, im Vergleich zu der Wand eines Zählrohrs. Deswegen kann man mit sehr großen Kristallen aus speziellen Materialien sogar Gammaquanten bis über 10MeV detektieren. Bei der Gamma-Aero-Radiometrie kann man mit sehr großen Szintillatoren aus dem Hubschrauber sogar noch in 100m Höhe eine erhöhte Gamma-Strahlung am Boden nachweisen, was oft auch zur Prospektion von Uranlagerstätten ausgenutzt wird.

Die am besten für den Eigenbau geeigneten Kristalle sind aus Natrium-Jodid (NaI) künstlich gezüchtet und mit Thallium aktiviert. Sie geben pro hochenergetischem Gammaquantum relativ viele niederenergetische Photonen im UV- und sichtbaren Bereich des Lichts ab. Sie sind recht zahlreich über Ebay erhältlich, wobei die günstigsten Angebote in der Regel aus Russland oder der Ukraine kommen. Zunächst kostet es natürlich etwas Überwindung z.B. aus der Ukraine teurere Waren zu bestellen, aber interessanterweise klappt das doch ganz gut. Die Szintillationskristalle werden entweder gebraucht oder neu angeboten. Bei Gebrauchten sollte man vorsichtig sein, Natrium-Jodid ist hygroskopisch und manchmal sind gebrauchte Kristalle dann milchig trüb oder die Oberfläche zerkratzt, was die Empfindlichkeit erheblich herabsetzen kann. Ein Kristall muss glasklar sein und die Oberfläche ganz glatt poliert sein, ohne Kratzer. Die Kristalle sind in der Regel in einen Alutopf eingelassen, der innen weiß beschichtet ist, so dass das Licht möglichst verlustfrei reflektiert wird. Für mobile Anwendungen und für die typischen Radionuklide der natürlichen Zerfallsketten oder auch

für Caesium-Kontaminationen reicht ein Szintillator-Kristall mit 20mm Durchmesser und 40mm Länge völlig aus und ist auch deutlich kostengünstiger als große Kristalle.

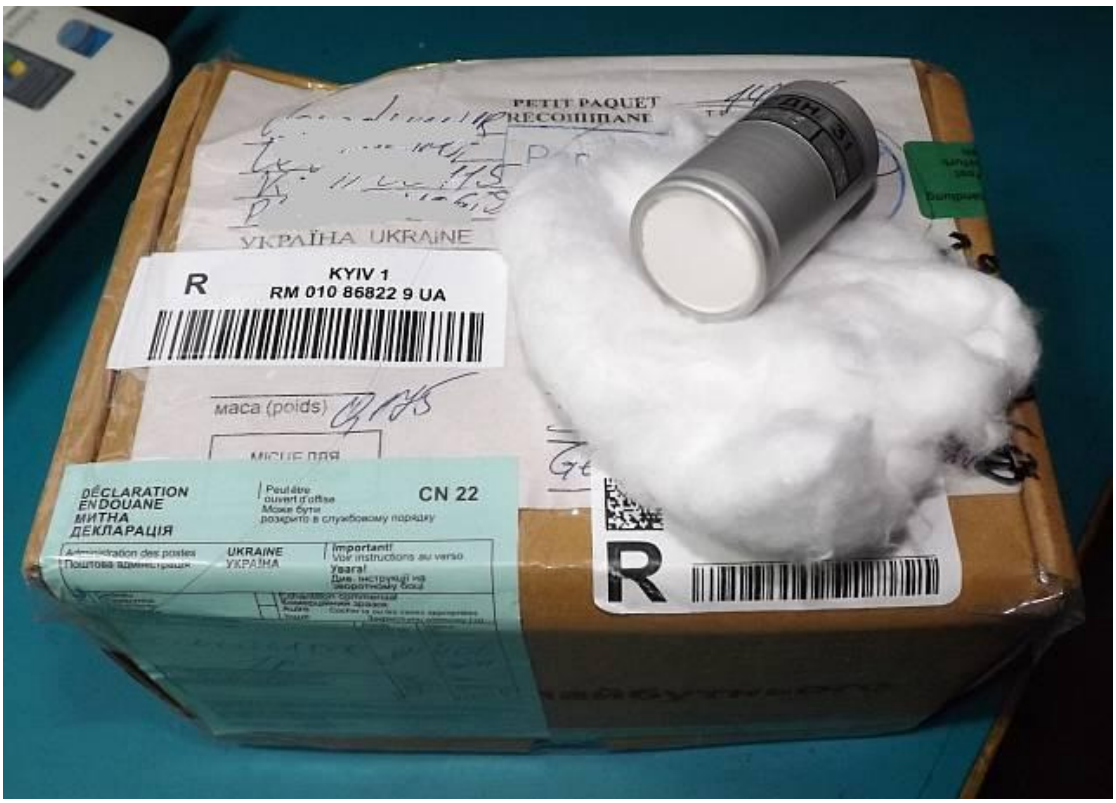

Abb. 1: Das Päckchen mit dem NaI Szintillationskristall aus Kiew, Ukraine

Abb. 2: Der 20x40mm NaI Kristall im Alutopf von oben, glasklar und ohne Kratzer

Die NaI-Szintilallationskristalle sind von den Durchmessern her in der Regel auf die gängigen Durchmesser der „Head-On“ Photomultipier Röhren (Photomultiplier Tune, PMT) angepasst. „Head-On“ heißt, der Kristall wird auf die Stirnfläche des zylindrischen PMT aufgesetzt. Hier gibt es unter den gängigen PMT vor allem 1Zoll, 2Zoll und 3Zoll PMTs. Die spektrale

Empfindlichkeit der Photokathode des PMT sollte zum Szintillator-Kristallmaterial passen. Für NaI Kristalle eignen sich Bialkalische und Multi-alkalische Photokathoden. Für diese Eignung sollte man sich das Datenblatt des PMT Herstellers vorher anschauen.

Auch PMTs gibt's natürlich bei Ebay. Hier sind die meisten gebraucht, neue sind oft sehr teuer. Manchmal hat man Pech und das PMT ist blind aber in den meisten Fällen ist die Funktionsfähigkeit noch recht gut. Kaputt gehen sie wenn man sie mit zu viel Licht betreibt bzw. zu hohe Ströme zulässt. Deswegen sollte man die Spannungsversorgung im Strom begrenzen und die Röhre nur in einem lichtdichten Behälter betreiben.

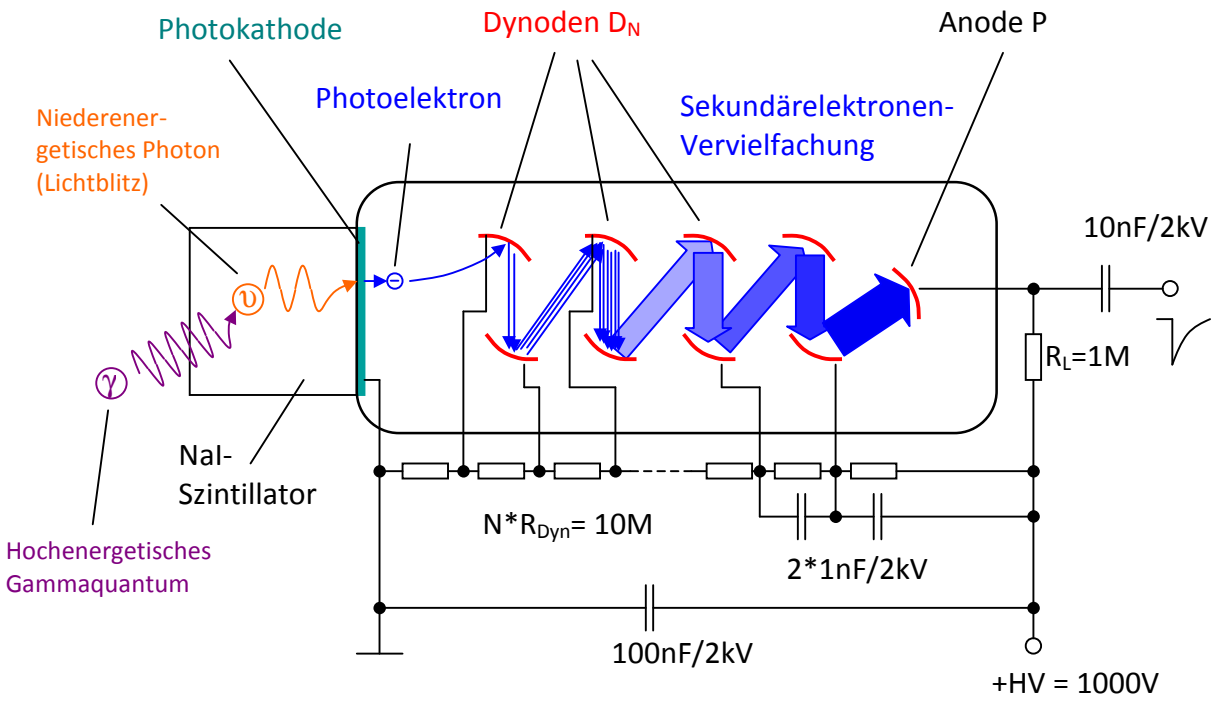

Abb. 3: Grundsätzlicher Aufbau eines Szintillations-Detektors mit Photomultiplier-Röhre

Abb. 3 zeigt einen auf einer Photomultiplier-Röhre montierten Szintillatorkristall und die allgemein übliche Beschaltung für positive Hochspannung mit separatem Anschluss für Hochspannung und Signal

Natrium-Jodid ist ein sehr gebräuchliches Szintillator-Kristallmaterial, das eine sehr hohe Lichtausbeute hat und für Durchschnittsanwendungen recht gut geeignet ist. Trifft ein hochenergetisches Gammaquantum so in den Kristall, dass eine Wechselwirkung stattfindet, dann löst das Gammaquantum niederenergetische Photonen aus, in dem es die Aktivierungszentren (Thallium) des Kristalls anregt. Die Photonen bilden einen Lichtblitz im blau bis ultravioletten Spektralbereich. Die Photokathodenbeschichtung an der Eintrittsöffnung des Photomultipliers reagiert auf den Lichtblitz mit einem photoelektrischen Effekt, der Photoelektronen aus der Kathodenschicht freisetzt. Diese werden in Richtung der Dynoden beschleunigt und setzten an diesen ein Vielfaches an Sekundärelektronen frei. Durch mehrfaches Vervielfachen erreicht man schließlich eine Verstärkung um etliche Zehnerpotenzen.

Die Hochspannung kann so angeschlossen werden, dass entweder die Anode auf Masse liegt oder die Kathode. Beides hat Vor- und Nachteile. Hier wurde die Beschaltung für eine positive Hochspannung bevorzugt um später, nach kleinen Modifikationen, mit dem Theremino PMT Adapter kompatibel zu werden. Bei der Beschaltung nach der Theremino-Anleitung wird der Spannungsteiler für die Dynoden gleichmäßig mit 10Mohm Widerständen aufgebaut. Theremino hat die Dynodenwiderstände offensichtlich deswegen so groß gewählt, damit die Hochspannungsversorgung mit weniger Strom auskommen kann. Üblicherweise sind die Dyodenwiderstände eher etwas kleiner, was aber dann mehr Strom von der Hochspannungsversorgung abverlangt.

Manchmal kann der hohe Widerstandswert aber auch dazu führen, dass die Spannung an den hinteren Dynoden einbricht, wenn starke Pulse auftreten. Die Folge ist dann eine Limitierung der Pulshöhen. Deswegen sollte man wenigstens an den beiden letzten Dynodenwiderständen eine Stützkapazität parallel schalten, die bei Bedarf Ladung nachliefern können. Das PMT verhält sich dann in erster Näherung wie eine Stromquelle (extrem hochohmig). Deswegen ist nun auch ein Lastwiderstand nötig um die Stromimpulse in Spannungsimpulse umzuwandeln. Ein großer Lastwiderstand hat den Vorteil, dass auch große Spannungspulse am Ausgang entstehen. Er hat aber auch den Nachteil, dass keine lange Leitung verwendet werden kann, da dann meist keine quellenseitige Anpassung an den Wellenwiderstand einer typischen koaxialen Leitung mit 50ohm vorliegt. Es kann also bei langen Zuleitungen zum Detektor auch zu Reflexionen kommen. Manchmal sieht man daher in Anleitungen einen Lastwiderstand von 50ohm, was dieses Reflexionsproblem vermeidet, sofern auch die Auswerteschaltung mit 50Ohm terminiert wird. Allerdings sind dann die Pulshöhen wieder sehr klein und müssten zusätzlich verstärkt werden.

Zum Abtrennen der Pulse von der Hochspannung an der Anode wird ein Hochspannungs-Koppelkondensator verwendet. Das ermöglicht es nun, dass der Ausgang auf jeden DC-Pegel eingestellt werden kann, von dem aus die Pulse mit negativer Polarität und steiler, fallender Flanke auftreten.

Wenn man ein PMT kauft, sollt man sich gleich nach dem passenden Sockel umsehen. Ein direktes Anlöten von Drähten an die Beinchen empfiehlt sich nicht, da die Löttemperaturen dazu führen, dass sich die Stifte ausdehnen und im Glas Risse und Undichtigkeiten erzeugen (ein guter Unterdruck ist zum Betrieb nötig). Der Sockel muss mit Widerständen und Kondensatoren bestückt werden. Dafür gibt es mehrere Varianten. Es ist aber sehr geschickt, wenn man den Detektor gleichzeitig auch zur Spektroskopie betreiben kann und so auch relativ schnell sieht, ob Kristall und PMT korrekt funktionieren. Im Gegensatz zur normalen Beschaltung für positive Hochspannung und Auskopplung des Signals an der Anode verwendet die Theremino-Beschaltung für Hochspannung und Signal nur eine gemeinsame Anschlussbuchse am Detektor. Dann muss aber ein zweiter Widerstand außerhalb des Detektors liegen, der mit dem inneren Teil des Lastwiderstands einen Spannungsteiler bildet. Die beiden Widerstände wurden hier zu 1Mohm gewählt und bilden gemeinsam die Anodenlast, wenn keine weitere Last R_L von der Auswerteeinheit her angeschlossen wird.

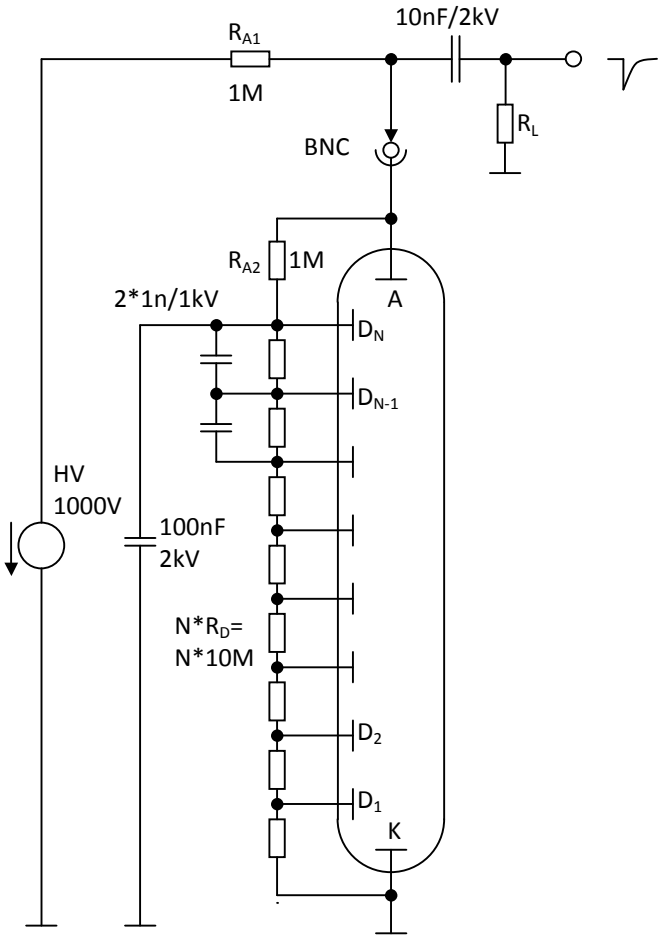

Abb. 4: Verdrahtungsschema für positive Hochspannung welches voll zu dem Theremino System kompatibel ist

Die meisten PMTs kommen mit 1000V aus, im Prinzip hängt die Ladungsverstärkung aber direkt an der Größe der Hochspannung und muss daher sehr stabil sein. Allerdings gibt es für 1000V fertige Hochspannungsmodule mit wenigen Watt Leistung, was einem den Eigenbau erspart und auch sicherer ist.

Das Theremino-Verdrahtungsschema hat den Vorteil, dass man so nur eine Buchse ins das lichtdichte Gehäuse einbauen muss, über die gleichzeitig die Hochspannung zugeführt und das Signal abgeleitet wird. Das ist sehr platzsparend und spart Kabel. Wenn man die Verdrahtung am Sockel sehr kompakt machen möchte, muss man beachten, dass sich nichts berührt, wenn man am Ende das Ganze mit Klebeband gegen Licht schützt und dazu etwas Druck ausübt. Zwischen den Drähten sollte daher immer wenigstens 1mm Platz bleiben, da bei 1000V auch schnell mal Kriechströme fließen oder gar Funken überspringen können.

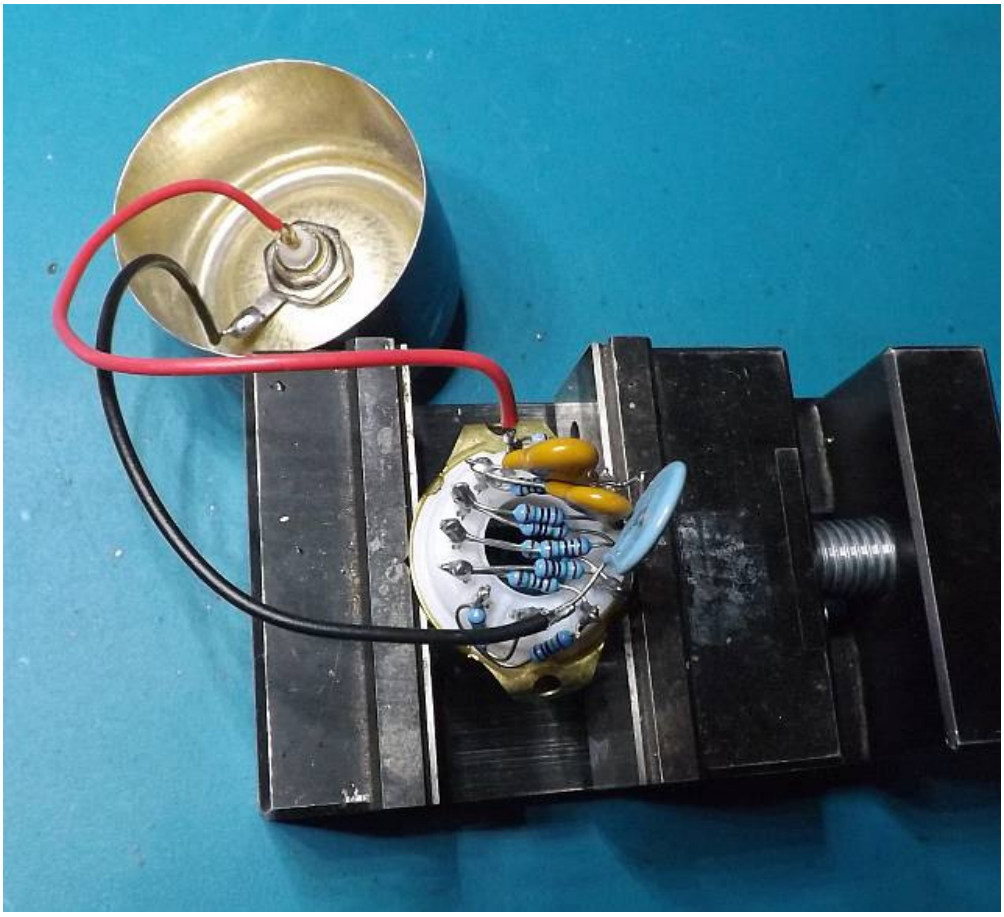
Abb. 5: Verdrahtung des PMT Sockels nach der Theremino-Anleitung

Für ein 1 Zoll System findet man auch noch leicht geeignete Gehäuse vor allem unter den Verpackungen von Kosmetika. Aluminium ist für Gammastrahlung gut transparent und es gibt vor allem bei den Deo-Sprays Alubehälter mit geeignetem Durchmesser und dünner Wandstärke. Nutzt man zwei leere Behälter, die man mit einer Modellbau-Trennscheibe aufschneidet (vorher ganz entleeren) kann man sie nachher mit einer Manschette zusammenfügen und mit Klebeband stabil und lichtdicht abkleben. Die BNC-Buchse kann im abgetrennten Unterteil eines der Alu-Deobehälter untergebracht. Die dünne Aluwand ist natürlich auch für Betastrahlung noch etwas durchlässig, aber bei Messungen ohne den Anspruch einer guten Energieauflösung in etwa 1m Höhe über dem Boden (Gonadenabstand) ist der Einfluss der Betastrahlung gering. Der Alutopf, in dem der Kristall sitzt, hat zudem auch noch mal eine gewisse Wandstärke, so dass die Betastrahlung in der Regel nicht mehr sichtbar wird.

Der Szintillator-Kristall sollte eine maximal gute optische Ankopplung an die Röhre haben. Dazu empfiehlt es sich einige Tropfen Silikonöl auf die Frontscheibe des PMTs zu tropfen. Da sowohl dieses Fenster, wie auch die Kristalloberfläche absolut plan sind, entstehen mit dem Öl gleichzeitig Kapillarkräfte, die den Kristall auf dem Glas halten. Man sollte aber darauf achten, dass sich keine Luftblasen bilden. Der Ölfilm reduziert gleichzeitig die Reflexionen am Kristall/Glas Übergang. Seitwärts lässt sich der Kristall noch leicht verschieben, was man am einfachsten mit einigen Tesastreifen verhindern kann, die den Kristall mittig auf dem PMT Fenster halten (siehe Bild).

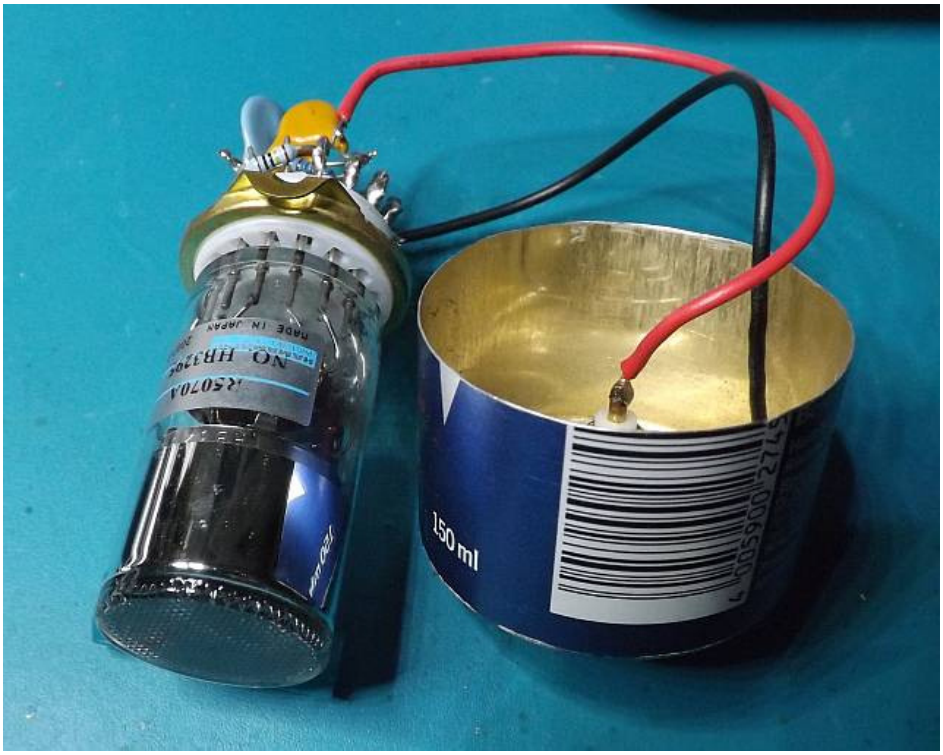

Abb. 6: Eingesteckte Photomultiplier-Röhre R5070A von Hamamatsu

Danach wird die PMT-Kristallkombination mit einer Lage dünnem, festem Schaummaterial gepolstert und überlappend mit breitem, elastischem und schwarzen PVC-Klebeband lichtdicht verklebt. Auf dem Boden des Kristalls kann zusätzlich noch ein kleines Polster gegen Stöße angebracht werden. Auch der Sockel sollte möglichst lichtdicht verklebt werden.

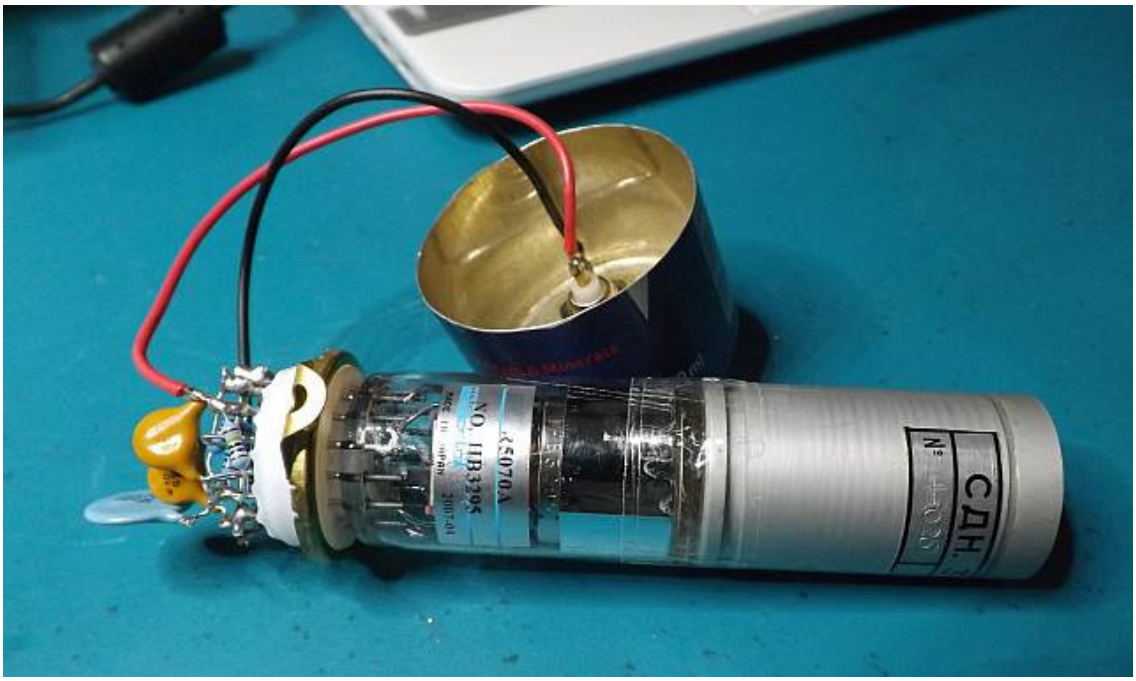
Abb. 7: Ein Tesastreifen um die optische Schnittstelle des Kristalls zum PMT fixiert den Kristall gegen seitliches Verschieben auf dem Silikon-Ölfilm

Abb. 8: Erste Polsterung mit Schaum und anschließendem lichtdichten Verkleben mit schwarzem PVC-Isolierband

Danach kann der verbleibende Raum zwischen Detektoranordnung und Alubehälter mit weiterem Schaummaterial aufgefüllt werden, was zusätzlich gegen Stöße schützt und die Anordnung stabil im Alugefäß fixiert. Dann wird aus dem zweiten Behälter ein Stück des Zylinders abgeschnitten und geschlitzt, so dass es als Manschette benutzt werden kann. Der Aluzylinder des ersten Behälters mit der Detektoranordnung wird nun bündig auf das Unterteil des zweiten Behälters gesetzt, die Manschette darüber geschoben und ebenfalls mit schwarzem PVC-Klebeband verklebt.

Abb. 9: Zweite Polsterung und Fixierung im Alubehälter

Abb. 10: In den Alubehälter eingeführte Detektoranordnung

Abb. 11: Manschette zur Justierung von Ober- und Unterteil

Abb. 12: Lichtdicht abgeklebte Manschette

Abb. 13: Der fertige Detektor mit BNC Buchse

Auf Grund der Theremino-Kompatibilität ist nun eine einfache Funktionskontrolle durch eine Gamma-Spektroskopie am Theremino-System möglich. Es empfiehlt sich dabei alle typischen

Kalibrierpunkte mit den gängigen Proben auszumessen. Dazu gehört der Rauchmelder mit Am241 (59keV), Lutetium Oxid (202keV und 307 keV), eine Spark Gap Röhre mit Cäsium Klecks (662keV), natürliches Uran und Thorium mit ihren typischen Signaturen sowie das Kalium mit dem Kalium-40 Peak bei 1460keV. Alle Peaks werden sauber abgebildet mit Ausnahme des Kalium-40 Peaks. Hier ist nur ein schwacher Höcker zu sehen, was an der Größe des Kristalls liegt. Die Absorption der K-40 Gammaquanten bei 1460keV liegt bei einem 1 Zoll Kristall im Bereich von nur noch etwa 10% . Da der Detektor später aber nicht zur Spektroskopie eingesetzt werden soll, sondern nur als Zähl-Detektor ist die mangelnde Empfindlichkeit für Energien größer 1200keV unerheblich. Die meisten natürlichen Radionuklide und die wichtigen technischen Radionuklide sind mit diesem Energiebereich gut abgedeckt.

Die folgenden Messungen zeigen die Gamma-Spektren mit subtrahierter Untergrundstrahlung. An dem Spektrum der Untergrundstrahlung selbst erkennt man einmal eine Gesamtzählrate von ca. 34 Pulse pro Sekunde und eine Häufigkeitsverteilung, bei der vor allem kleine Energien häufig vorkommen. Mit einer Bleiabschirmung (ca. 2cm Dicke), lässt sich die Zählrate noch einmal auf etwa die Hälfte reduzieren.

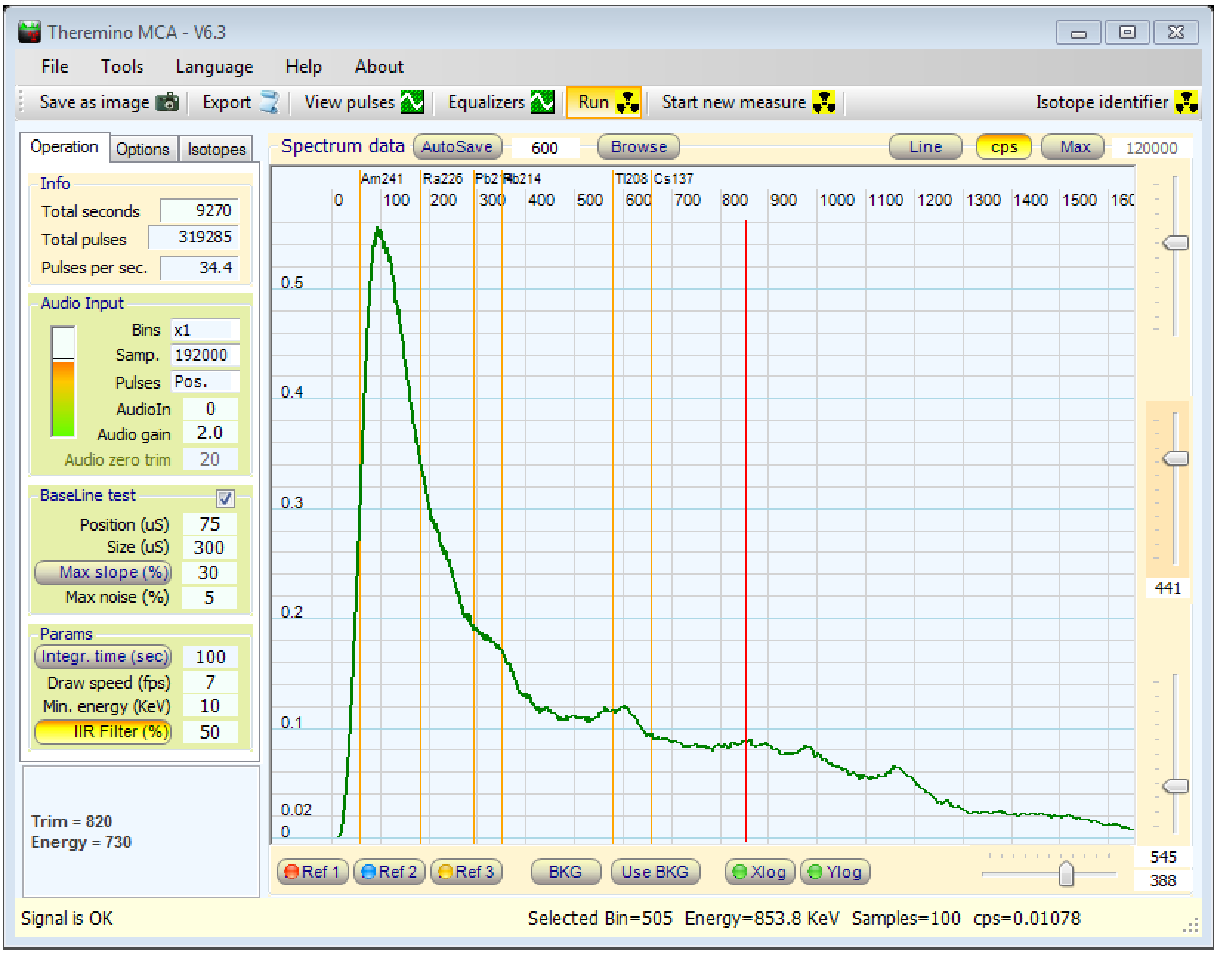

Abb. 14: Gamma-Spektrum Hintergrundstrahlung

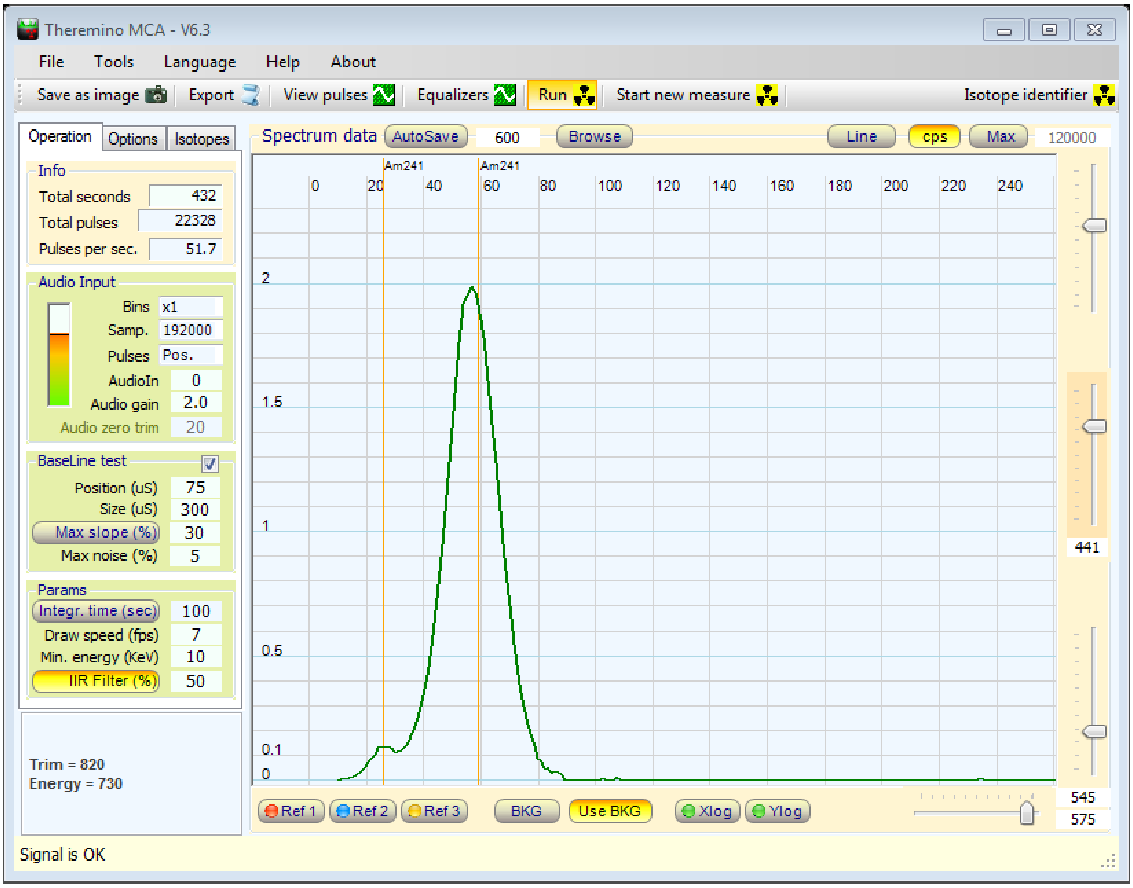

Abb. 15: Gamma-Spektrum Rauchmelder (Am214)

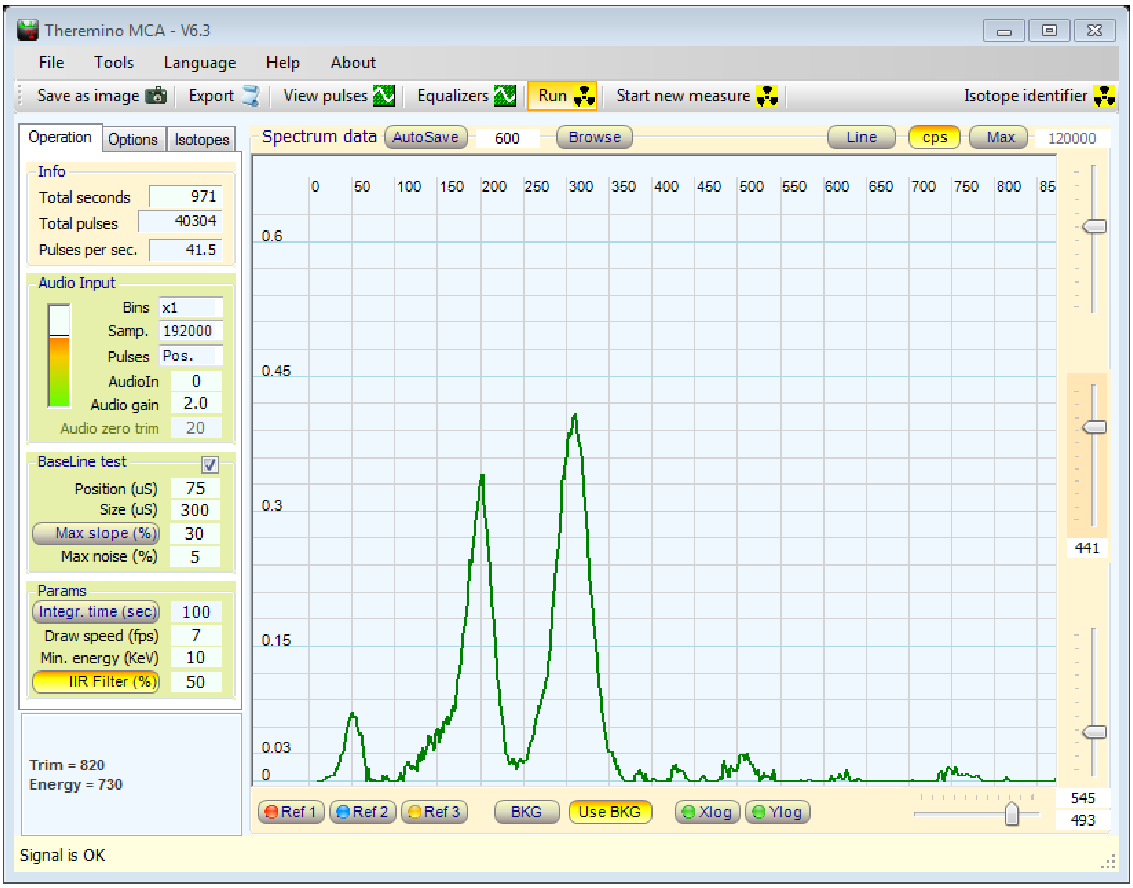

Abb. 16: Gamma-Spektrum Lutetium-Oxid (Lu176)

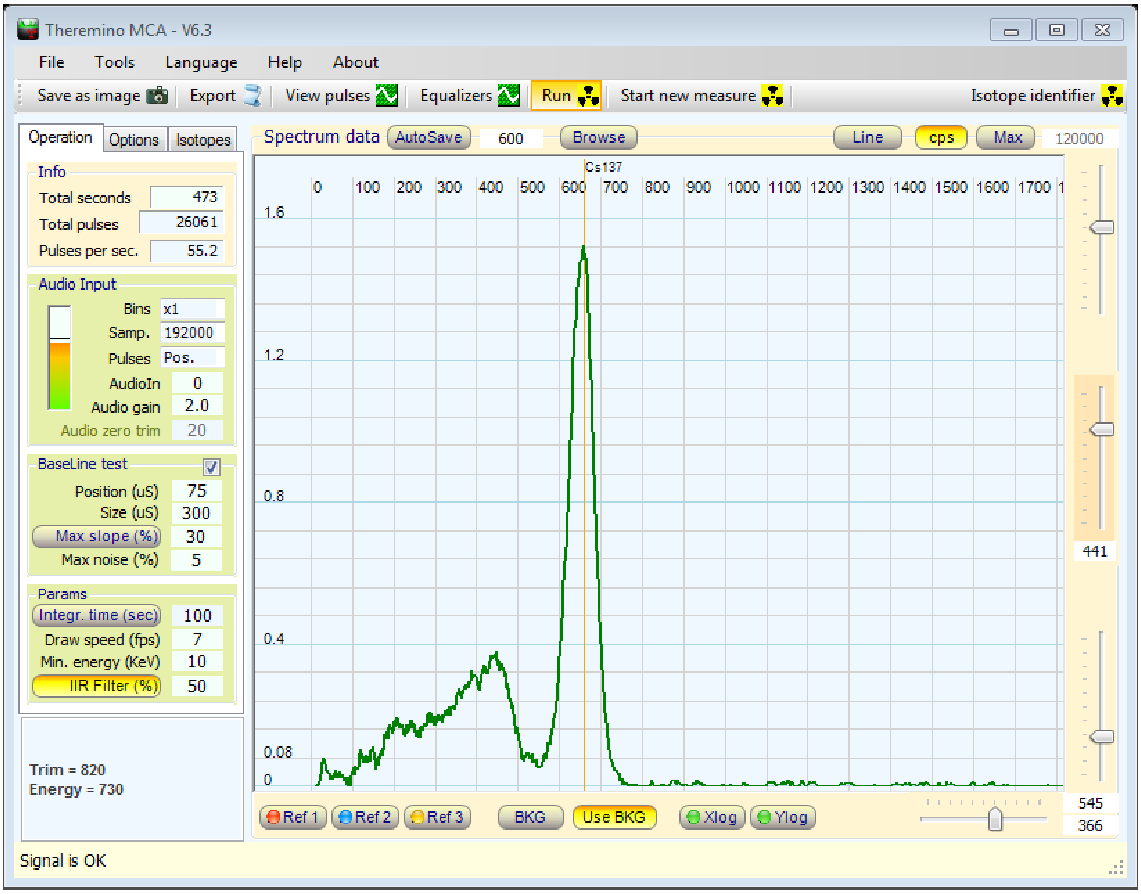

Abb. 17: Gamma-Spektrum Cs137 (Spark Gap Röhre)

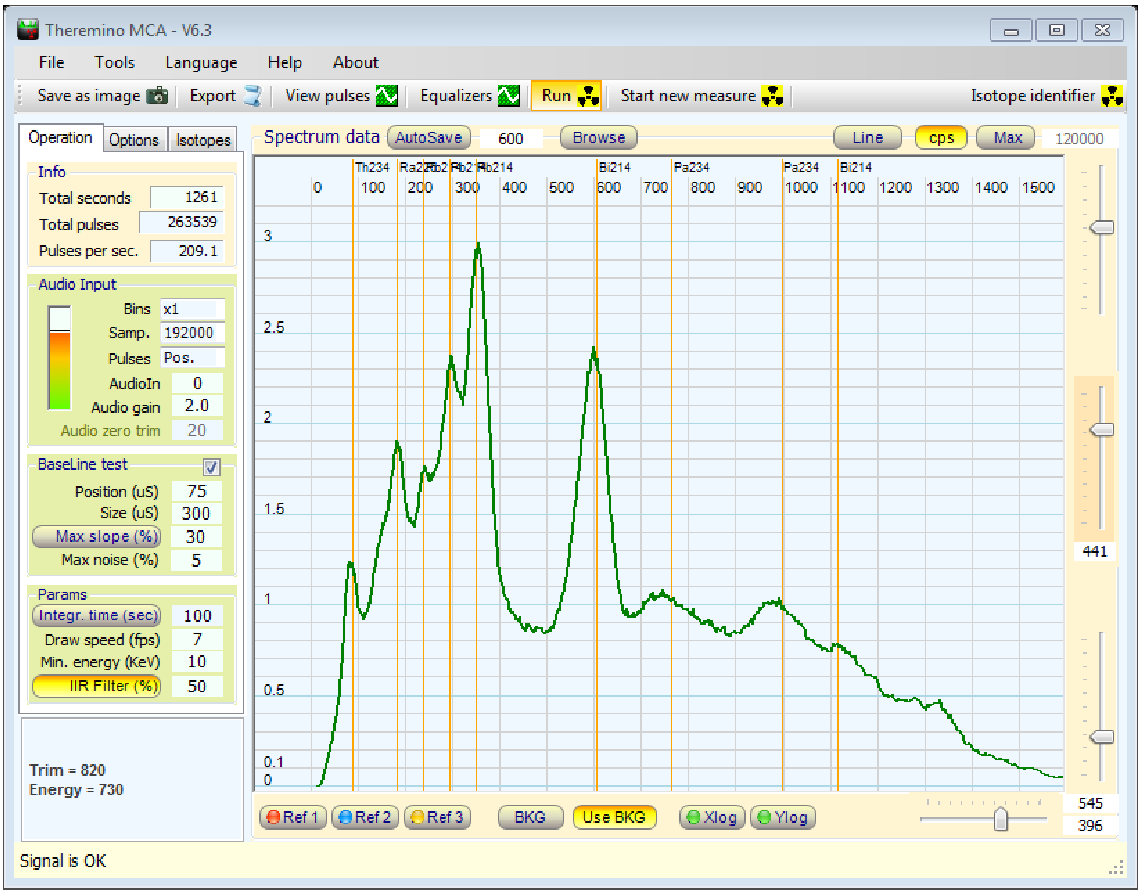

Abb. 18: Gamma-Spektrum natürliches Uran mit Zerfallsprodukten (U-nat)

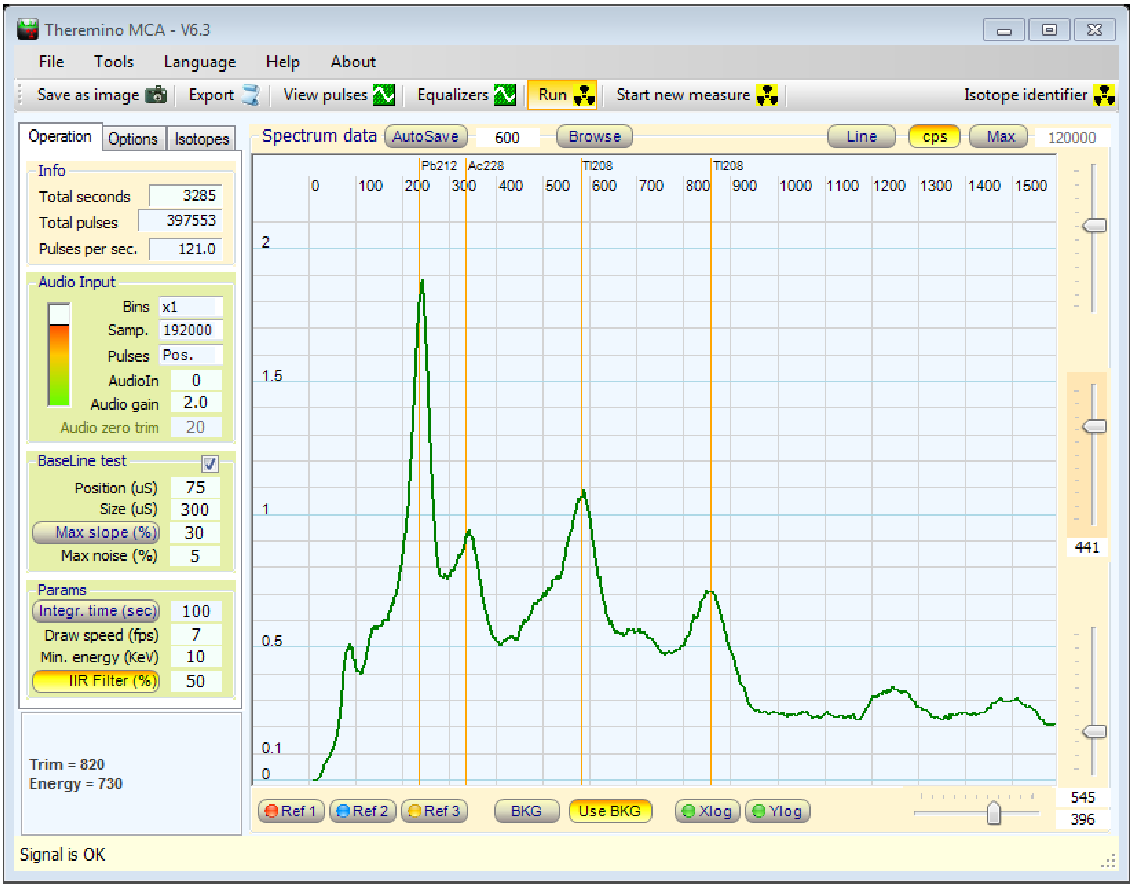

Abb. 19: Gamma-Spektrum natürliches Thorium mit Zerfallsprodukten (Th-nat)

Abb. 20: Gamma-Spektrum natürliches Kalium mit K-40 Isotop

Das Ausgangssignal des Detektors ähnelt dem Signal eines Geiger-Müller Zählrohrs sehr stark und kann ach ähnlich wie dieses aufbereitet werden um digitale Zählpulse zu erzeugen. Sind die Pulse in ein digitales Format gewandelt, kann schließlich ein Mikrocontroller verwendet werden um die Zählrate auszuwerten und anzuzeigen.

Literatur

/1/ Scintillation Detectors Particle Detection via Luminescence
Kirchhoff-Institut für Physik (KIP), Heidelberg
http://www.kip.uni-heidelberg.de/~coulon/Lectures/Detectors/Free_PDFs/Lecture4.pdf

/2/ Hamamatsu PHOTOMULTIPLIER TUBES Basics and Applications
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

/3/ Manfred Krammer; Szintillatoren - Detektoren in der Hochenergiephysik; Institut für Hochenergiephysik der ÖAW, Wien
http://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-5-Szintillatoren.pdf

/4/ The real modular input output
http://www.theremino.com

/5/ Theremino MCA, Pmt Adapter V3.3, Audio Adapter, Pmt tube connections
http://www.theremino.com/wp-content/uploads/2012/02/PmtAdapters_ENG.pdf