

Einstieg in die Gamma-Spektroskopie

Bernd Laquai 9.1.2015, Update 6.1.2022

Früher oder später juckt es doch in den Fingern: Wenn man sich einmal mit Radioaktivität und Geigerzählern beschäftigt hat, dann will man einfach auch mal eine Gamma-Spektroskopie probieren. Aber als „normaler“ Elektronikbastler hat man üblicherweise viel Respekt vor dem reinen „Physik-Kram“, mit optischer Elektronenverstärkung, Photomultipliern, Szintillatoren und so weiter. Doch wenn man diese Barriere einmal gewagt hat zu überschreiten, dann fragt man sich danach, warum man nicht einfach damit angefangen hat, das ist doch viel einfacher als Elektronik!

Nun ja, es ist nur einfacher, wenn man heimliche Helfer hat. Irgend jemand, der einem sagt, welchen Szintillations-Kristall man am besten kauft und welche Photomultiplerröhre und jemand, der einem den Tipp gibt mal bei einer einzigartigen Webseite mit dem skurrilen Namen „The real modular input output“ oder kurz Theremino reinzuschauen:

<http://www.theremino.com>

Da steht nämlich so gut wie alles geschrieben, was man wissen muss. Man kann dort eine einfach geniale Software runterladen, die das teuerste Gerät, das man für die Gamma-Spektroskopie braucht, einfach durch den PC mit einer guten Soundkarte ersetzt: Den Vielkanalanalysator (englisch: multi channel analyzer, MCA), der die Impulshöhen digitalisiert und in ein Energie-Histogramm umwandelt. Wieder einmal waren es einige pfiffige Italiener, die irgendwie der Lehre nahestehen, ähnlich wie beim Arduino, die das einfach so gut aufbereitet haben, dass es gar nicht schief gehen kann, wenn man sich an die Anweisungen hält und sich an das Italienglisch gewöhnt hat. Und all diese entscheidenden Hinweise habe ich zwei netten Bekannten zu verdanken: Bertrand und Andi (auch keine Physiker), ohne deren gutes Zureden und materielle Unterstützung ich mich vielleicht noch bis heute geziert hätte, aus Respekt vor der reinen Physik an das Thema heranzugehen.

Mit einer Photomultiplerröhre (Photomultiplier-Tube, PMT) vom Typ R5070 von Hamamatsu, einem Hochspannungsmodul (C4900 von Hamamatsu) und einem rechteckigen BGO Kristall und einem russischen 1cm Ø Natrium-Iodid (NaI)-Kristall ausgestattet, begann also die Erkundung. Das PMT war bereits mit einem Sockel versehen, so dass die Bestückung der Dynoden mit den passenden Vorwiderständen nicht gemacht werden musste. Auch das kleine Hochspannungsmodul war ganz praktisch, da man 1250V nicht so mit links mal kurz erzeugen kann und das noch ohne Ripple und Störungen. Da alles mit BNC Steckern ausgestattet war, ließen sich die Komponenten einfach zusammenstecken. Das R5070 PMT hat einen 1“ großen Photoneneintritt, so dass das 1cm Kristall sehr gut draufpasst. Hier war aber noch mal ein wichtiger Tipp nötig: Um Reflexionen an der optischen Stoßstelle zwischen Kristall und PMT-Glas zu vermeiden, sollte man etwas Silikonöl/fett für einen guten optischen Kontakt zwischen Kristall und PMT geben. Der NaI-Kristall erwies sich schnell als geeigneter als der BGO-Kristall, sowohl von der mechanischen Fixierung her, wie von der Signalausbeute, so dass dieser im weiteren verwendet wurde.

Das PMT muss sehr gut gegen Licht geschützt sein, sonst wird es leicht blind. Deswegen wird es zuerst gut gegen Erschütterungen gepolstert und dann mit schwarzem Klebeband und

Alufolie gegen Fremdlicht abgeschirmt. Als externe elektrische Anschlüsse hat man an einem Photomultiplier nur den Signalanschluss und den Hochspannungsanschluss.



Abb. 1: 1 Zoll PMT R5070 von Hamamatsu mit 1cm NaI Kristall



Abb. 2: PMT mit bereits aufgesetztem und licht-geschirmtm BGO-Kristall, daneben der etwas bessere 1cm NaI-Kristall

Man kann nach Anlegen der Versorgungsspannung bereits direkt am PMT Ausgang sehr schöne Pulse sehen, die recht kräftig sind. Der Ausgang des PMT stellt im Prinzip eine Stromquelle dar, so dass die Spannung stark vom Lastwiderstand abhängt. Mit einem 1kOhm Widerstand lassen sich aber durchaus Pulse über 10V erzeugen. Die Pulsdauer beträgt zwischen 100 und 200usec, sind also relativ lang im Gegensatz zu einer PIN-Diode oder einem Geiger-Müllerzählrohr.

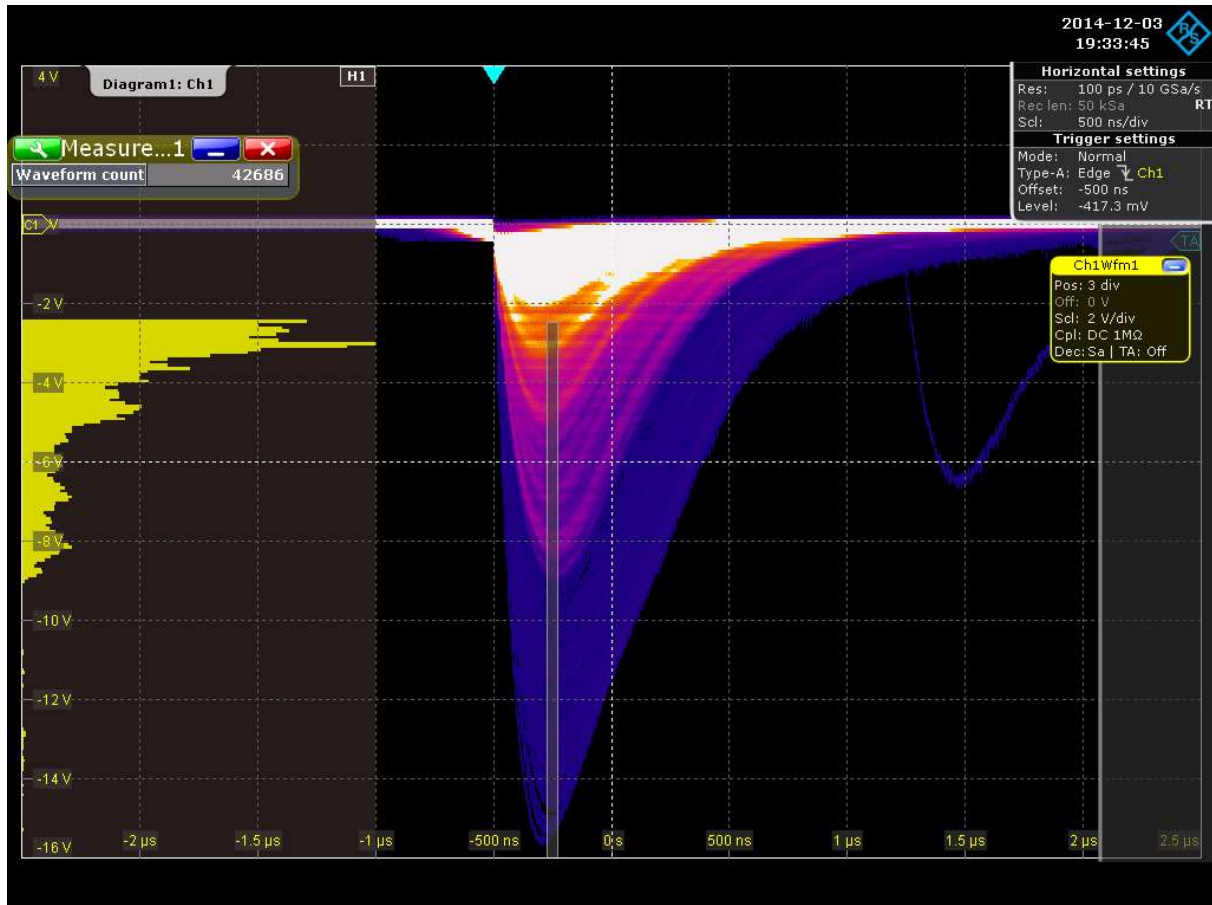


Abb. 3a: Erste Pulse mit dem R5070 PMT von einem Thorium-Glühstrumpf, deutlich erkennbar sind die Häufungen der Signalkurven, die zu Peaks im Histogramm führen

Bereits jetzt lassen sich auf dem Oszilloskop bei korrekt eingestelltem Trigger, infinite Persistence und color grading „Verdichtungen der Signalkurven erkennen, welche von häufig auftretenden Impulshöhen stammen. Legt man ein schmales Histogrammfenster in die Kurvenschar, berechnet das Oszilloskop ein Histogramm auf der Basis der Häufigkeit mit der die Pixel getroffen werden. Dies entspricht genau dem, was ein Vielkanalanalysator auch macht. Man bekommt also auf diese Weise ein Vorgeschmack eines Rohspektrums, das für den Thorium-Glühstrumpf und die Uranerzprobe bereits am Oszilloskop unterschiedlich aussieht.

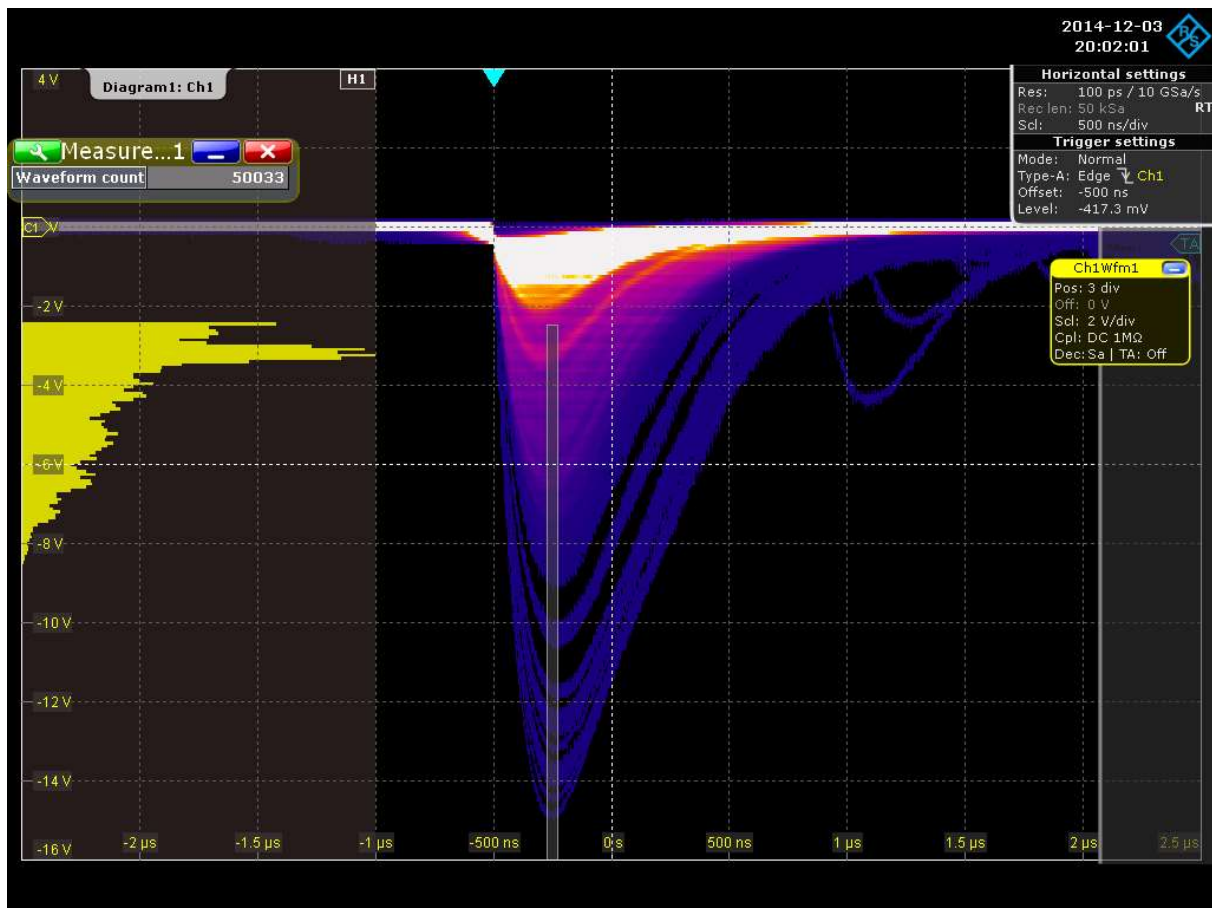


Abb. 3b: Pulse vom R5070 PMT von einer Uranerzprobe

Der Hauptnachteil des R5070 PMT ist die negative Versorgungsspannung und damit die negativen Pulse gegenüber der Signalmasse. Aus diesem Grund ist dieses PMT für eine einfache Signalverarbeitung schlechter geeignet, da Verstärker und Software meist für positive Signale ausgelegt sind. Außerdem ist es mit einem 1cm Kristall sehr schwierig höhere Energien mit mehr als 1MeV nachzuweisen. Im Prinzip wird die Obergrenze der Energie durch das Kristallvolumen festgelegt, genau wie die Zählrate. Ein großer Kristall ist damit bei gleicher Messzeit deutlich empfindlicher. PMTs gibt es in vielen unterschiedlichen Größen, genau wie Kristalle und es wird schnell deutlich, dass auch der Preis mit der Größe korreliert. Obwohl sich die Suche nach einem günstigen 3" Kristall noch etwas schwierig gestaltet, stand eine 3" PMT Röhre dank freundlicher Unterstützung netter Bekannter relativ schnell zur Verfügung. Dieses 3" PMT stammt auch aus dem Hause Hamamatsu und trägt die Bezeichnung R6233. Es hat den Vorteil, dass es mit positiver Versorgung arbeitet und positive Pulse gegenüber Signal-Ground erzeugt.

Allerdings stand für dieses PMT kein Spannungsversorgungsmodul zur Verfügung. Da aber von vorneherein klar war, dass die Signalverarbeitung nach dem Theremino-Konzept erfolgen sollte, wurde ein Theremino-PMT Adapter mit integrierter Spannungsversorgung (Theremino-PMT-Adapter) benutzt und in einer Blechschachtel zur besseren Schirmung ganz entsprechend der Theremino Anleitung aufgebaut.



Abb. 4: Thermino PMT-Adapter mit Hochspannungserzeugung und Impulsformung

Der Sinn hinter dem Theremino-PMT Adapter ist neben der Spannungserzeugung (bis ca. 1300V) auch eine Impulsformung, so dass die anschließende Audiosignalverarbeitung die mit Sampling-Raten bis 192kSa/s arbeitet (gute USB Soundkarte), die richtigen Pulse liefert. Die Software macht dann eine absolut ausgefeilte Impulserkennung mit Baseline-Korrektur und hat viele Einstellmöglichkeiten, die man am Anfang gar nicht richtig übersieht. Deswegen verlässt man sich am besten auf die voreingestellten Werte und baut den Adapter genau so auf, wie es in der Beschreibung steht. Dann kann man auch davon ausgehen, dass alles gleich nach dem ersten Einschalten grob funktioniert.

Als erster Test für das 3" PMT wurde ein Plastik-Szintillator verwendet. Mit diesem kann man zwar nicht viel Energieauflösung erwarten, aber er ist billig und liefert eine hohe Impulsrate. Dieser Plastik-Szintillator wurde einfach mit Tesa-Streifen und wieder unter Verwendung von Silikonöl an der Grenzfläche zwischen Plastik und Glas befestigt. Danach wurde das Rohr etwas mit Schaumgummi gepolstert und mit schwarzem Klebeband und mit Alufolie lichtdicht eingepackt. Eine erste Messung zeigte dann auch sofort brauchbare Pulse ohne jede Störung. Deswegen wurde bei der Verwendung der USB-Soundkarte (Vigo-Speedlink SL-8850-BK) ganz mutig von der Anleitung abgewichen und die Stromversorgung für den PMT Adapter nicht vom USB-Port abgezweigt, sondern über ein linear geregeltes 5V Netzteil bereitgestellt. Die im Pulse-Shape-Visualizer der Theremino MCA Software dargestellten Pulse sahen auch gleich „wie geschleckt“ aus, so dass keine Veranlassung bestand, die Stromversorgung irgendwie anders zu machen. Die Qualität der Pulse erwies sich auch so gut, dass keine Baseline-Korrektur nötig war, lediglich die Nulllage der Baseline musste richtig auf die Null justiert werden. Nach den ersten Tests mit den Plastik-Szintillator wurde dieser gegen den 1cm NaI Kristall ausgetauscht um auch wirklich energieauflösende Messungen machen zu können. Dies

war, obwohl die Größenverhältnisse reichlich ungleich waren (1cm \varnothing Kristall auf 7.5cm \varnothing PMT Öffnung) trotzdem beeindruckend gut möglich.



Abb. 5: Provisorische Befestigung eines Plastik-Szintillators auf dem 3 Zoll PMT

Die ersten Versuche mit häufig verwendeten Proben ergaben von der Signatur der Spektren her auf Anhieb Ergebnisse, wie sie auch im Internet zu finden sind (siehe Spektren im Anhang). Was sich allerdings als eine gewisse Herausforderung herausstellte, war die quantitativ korrekte Energiebestimmung der sichtbaren Gamma-Peaks. Dazu ist eine Energiekalibrierung mit bekannten Proben und scharfen Peaks nötig. Diese Kalibrierung zeigte sich als ganz deutlich nicht-linear, so dass der Energy Linearizer im Equalizers Window der ThermoMCA Software massiv bemüht werden musste. Das hängt vermutlich auch am krassen Missverhältnis zwischen PMT und Kristalldurchmesser. Nichts desto Trotz konnte mit dem Energy Linearizer eine Einstellung gefunden werden, die so in etwa auf alle untersuchten Proben passte.

Als Kalibrier-Probe wurde eine Spark-Gap Röhre mit einem Cs137 Klecks im Glas und eine 10g Lutetium-Oxid Probe verwendet. Beide Proben haben eine schwache mit einem Geigerzähler kaum nachweisbare Strahlung ($< 0.3\mu\text{Sv/h}$). Das Cs137 erzeugt bei einer Gamma-Spektroskopie die bekannte 662keV Linie und das Lutetium (Lu176) weist zwei charakteristische Linien bei 202keV und 307keV auf. Ebenfalls als Kalibrierhilfe lässt sich eine Uhr mit Radium-Leuchtfarbe benutzen. Hier wird eine Linie bei 186keV deutlich sichtbar, die vom Radium-226 herrührt. Zudem findet man die Linien der Zerfallsprodukte Pb214 und Bi214, die aber weniger scharf ausgeprägt sind.



Abb. 6: PMT Adapter in der Blechschachtel mit lichtdicht verpackten 3-Zoll PMT mit Szintillator-Kristall

Alles in allem kann man sagen, der Einstieg lohnt. Über Ebay sind alle Zutaten leicht erhältlich, wenn auch meist aus dem Ausland. Das Ganze ist natürlich nicht so ganz kostengünstig zu haben wie ein PIN-Dioden Zähler, ein paar hundert Euro Investment muss man dafür schon in die Hand nehmen. Aber dem besseren Verständnis der Radioaktivität dient es in jedem Fall.

Literatur

The real modular input output

[http://www.thereminos.com](http://www.thereмино.com)

Gamma-Spektroskopie mit NaI- und Ge-Detektoren

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

<http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2006-Feb-50-1.pdf>

Experimental γ Ray Spectroscopy and Investigations of Environmental Radioactivity

Randolph S. Peterson

<http://physicsx.pr.erau.edu/Courses/CoursesS2014/PS315/Nuclear%20Spectroscopy/Nuclear%20Spectroscopy.pdf>

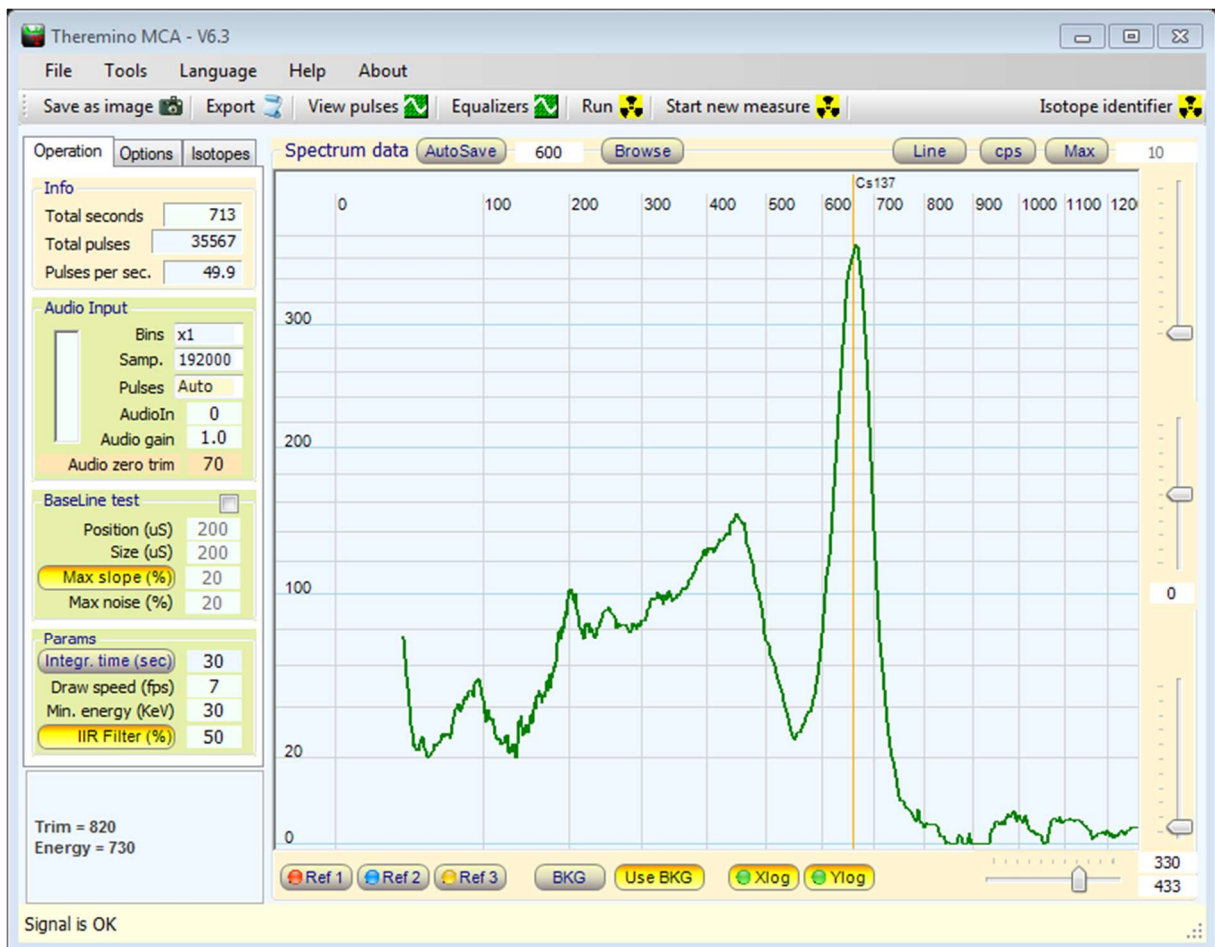
Introduction to Radiation Detectors and Electronics III. Scintillation Detectors

Helmuth Spieler

http://www-physics.lbl.gov/~spieler/physics_198_notes/PDF/III-Scint.pdf

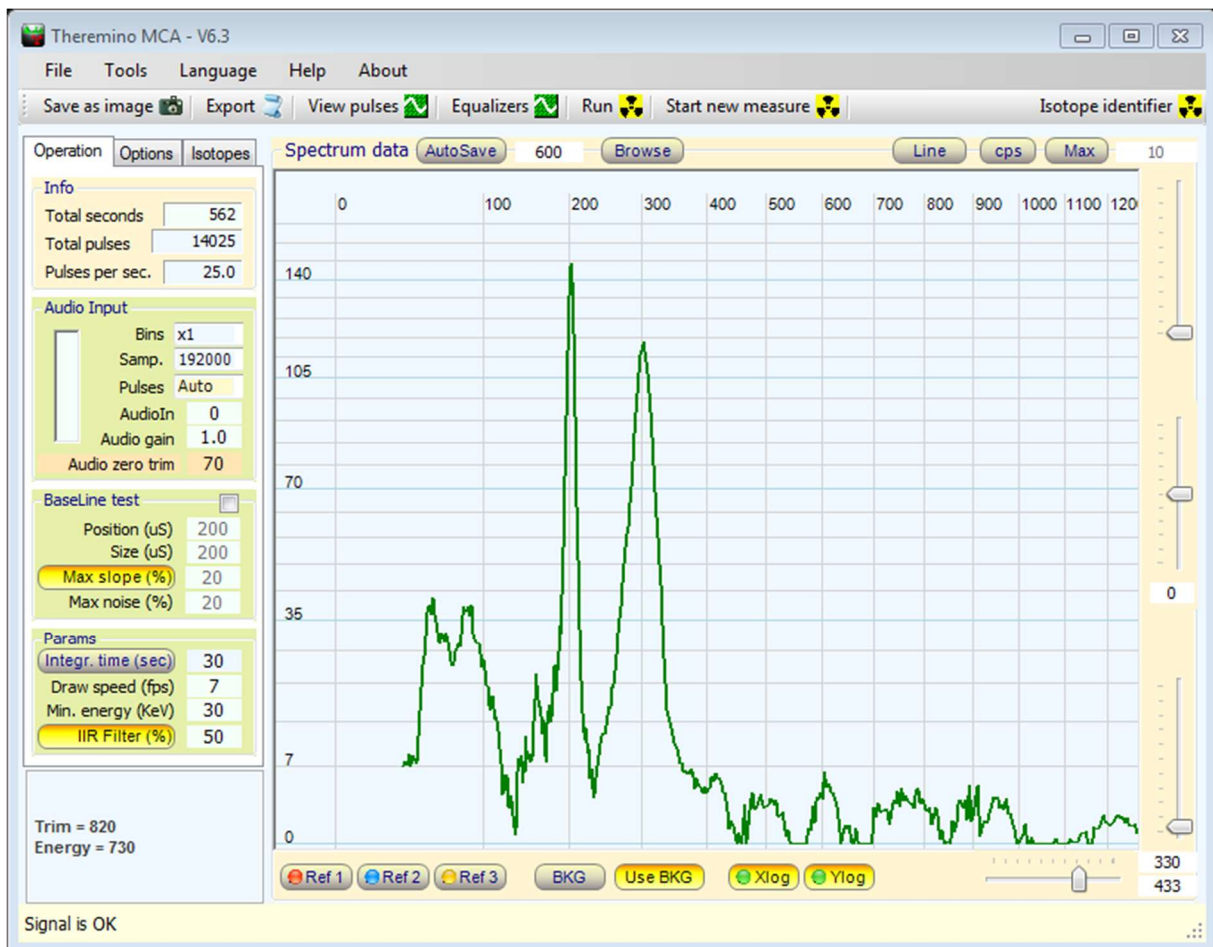
Anhang: Gamma-Spektroskopie Ergebnisse von verschiedenen „Haushalts-Proben“ mit dem 1 cm-Ø NaI-Kristall

Gamma-Spektrum: Raytheon Spark Gap Tube mit Cs137 Vorionisation



Der im Glas (auf der rechten Seite angebrachte Klecks enthält das Cs137, welches das Gas in der Röhre bereits vorionisiert, so dass Entladungen bei Überspannung schneller starten. Dieses Caesium erzeugt einen schönen 662keV Peak.

Gamma-Spektrum: Lutetium-Oxid (99.99%)



Lu176 ist im natürlichen Lu175 zu 2.6% enthalten und sorgt für eine sehr schwache Radioaktivität des Metalls. Die beiden charakteristischen Gamma-Linien bei 202 und 307keV lassen sich hervorragend für die Kalibrierung nutzen.

Gamma-Spektrum: Pechblende aus Wittichen im Schwarzwald



Auf alten Bergwerkshalden lassen sich oft noch Erzbrocken mit Pechblendeneinlagerungen finden (Uraninit). Das schöne an diesen Proben ist, dass sich das Uran hier mit seinen Zerfallsprodukten zu einem gewissen Grad (bis aufs gasförmige Radon) im natürlichen radioaktiven Gleichgewicht befindet. Neben einem ersten starken Peak, der zu zwei Th234-Linien bei 92keV gehört (ohne Marker) die sich mit der Röntgenfluoreszenz des Blei der Abschirmung mischen, sind die Radium/U-235 Linie, die Pb-214 Linien bei 242, 295 und 352keV, sowie die Bi214 Linie bei 609keV gut erkennbar.

Gamma-Spektrum: Armbanduhr mit Radium Leuchtfarbe



Das Radium in den Leuchtziffern und Zeigern einer alten Armbanduhr zeigt ein dem natürlichen Uranerz sehr ähnliches Gamma-Spektrum. Es sind wieder neben einem ersten starken Röntgenfluoreszenz-Peak der Bleiabschirmung (ohne Marker) die Radium-Linie, die Pb-214 Linien bei 242, 295 und 352keV, sowie die Bi214 Linie bei 609keV gut erkennbar.

Gamma-Spektrum: Karlsruher Majolika Keramik mit Uranglasur (30er-Jahre)



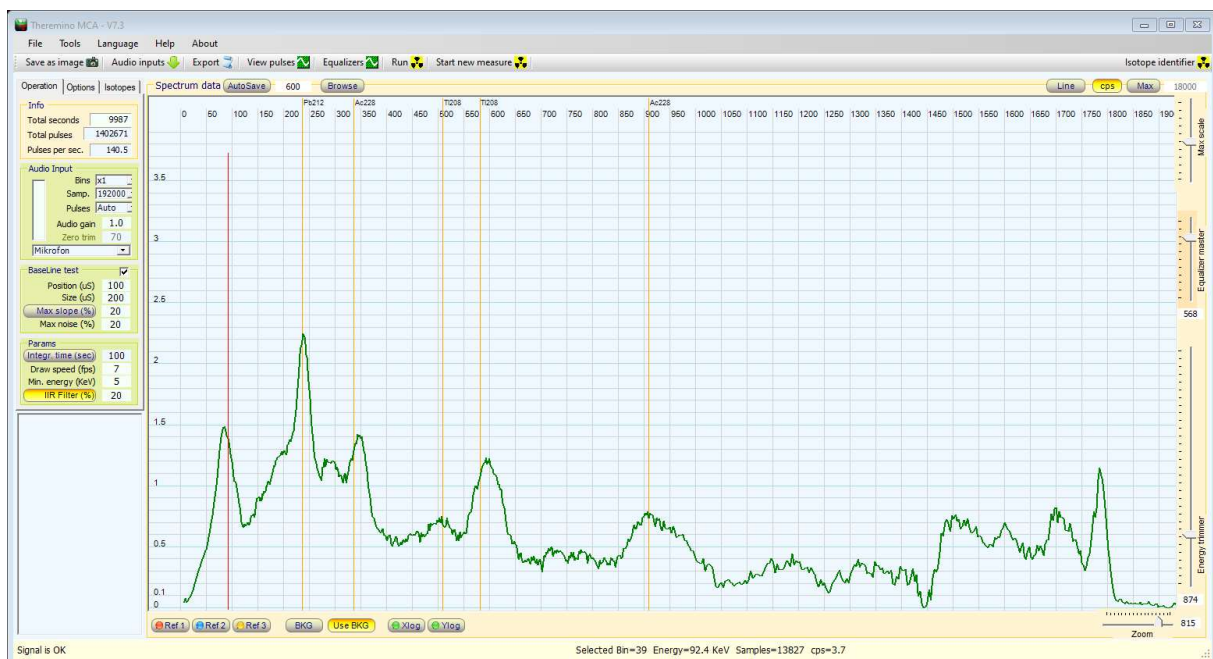
Bei der Uranglasur dieser Art von Majoliken und Keramiken sieht man ganz offensichtlich, dass bei Verarbeitung bzw. Gewinnung der Glasurfarben das Radium mit seinen Zerfallsprodukten abgetrennt wurden und in der Glasur in dem Umfang nicht wieder entstehen konnten, so dass sie sichtbar werden würden. Daher sieht man nur neben einem starken Th234-Peak, der mit dem Röntgenfluoreszenz-Peak des Blei aus der Abschirmung vermischt ist (ohne Marker), nur die U-235-Linie bei 186keV.

Gamma-Spektrum: Anna-grün gefärbtes Uranglas



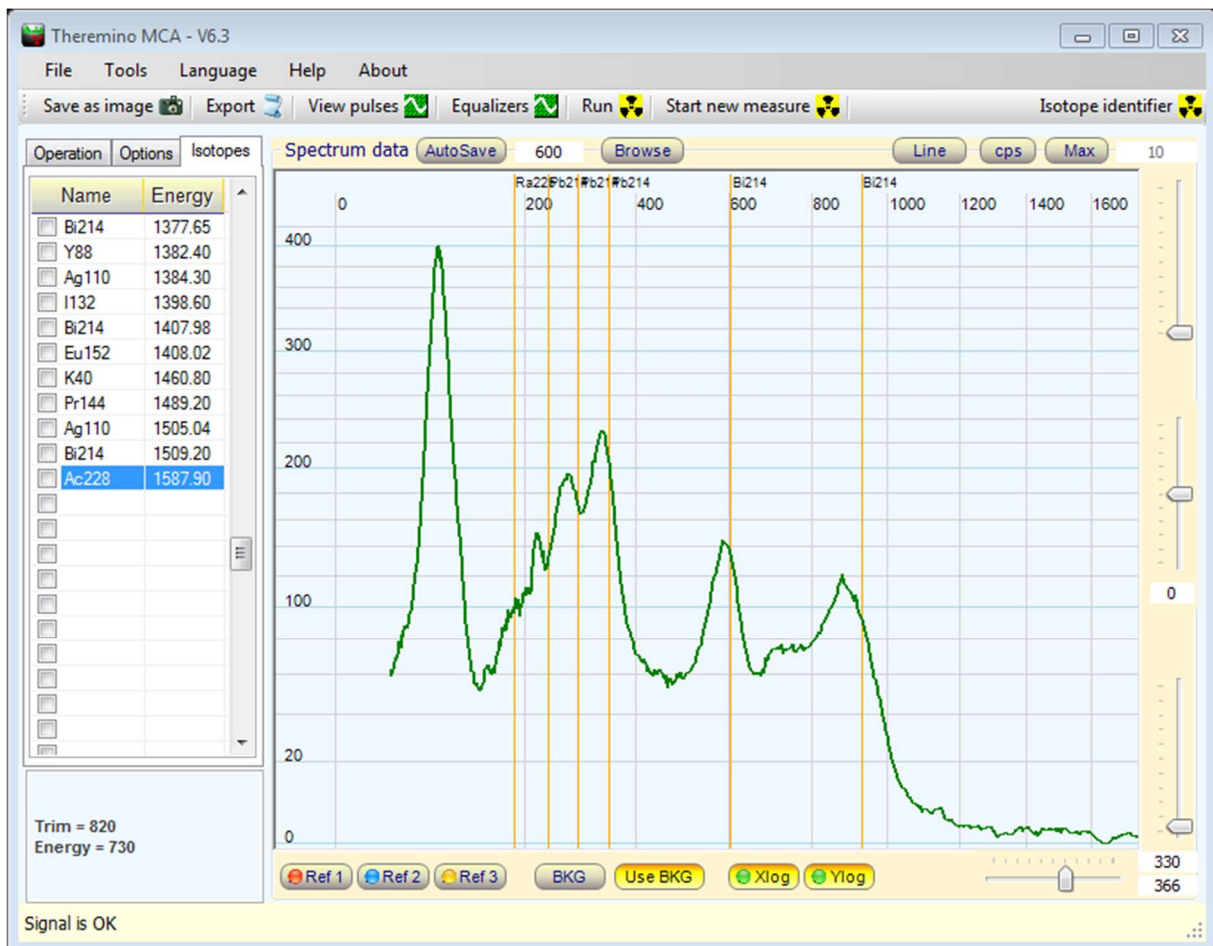
Bei Urangläsern, die mit Uranfarben wie „Anna-grün“ gefärbt wurden entsteht ein der Uranglasur sehr ähnliches Gamma-Spektrum, in dem auch nur die U-235-Linie bei 186keV deutlich erkennbar ist, weitere Zerfallsprodukte des Radium-226 sieht man nicht, da das Radium bei der Herstellung weitestgehend abgetrennt wurde.

Gamma-Spektrum: Sand vom Strand bei l'Espiguettes (Camargue)



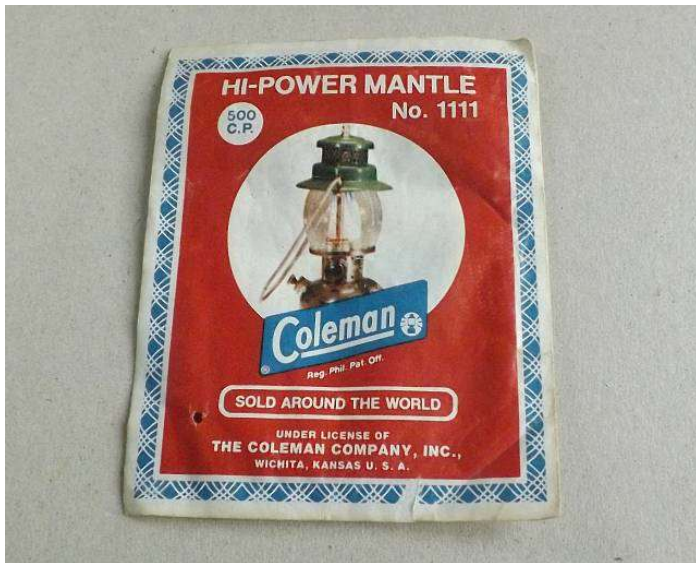
Interessant ist auch eine Sandprobe vom Strand bei L'Espiguettes in der Camargue. Es wurde schon vermutet, dass die Strahlung dort von Ableitungen der Kernkraftwerke an der Rhone stammen. Im Gamma-Spektrum sieht man jedoch die Peaks, die für Thorium typisch sind, von daher kann man davon ausgehen, dass Monazit im Sand für die Aktivität verantwortlich ist.

Gamma-Spektrum: In Radon-Atmosphäre gelagerte Kohlekomprette



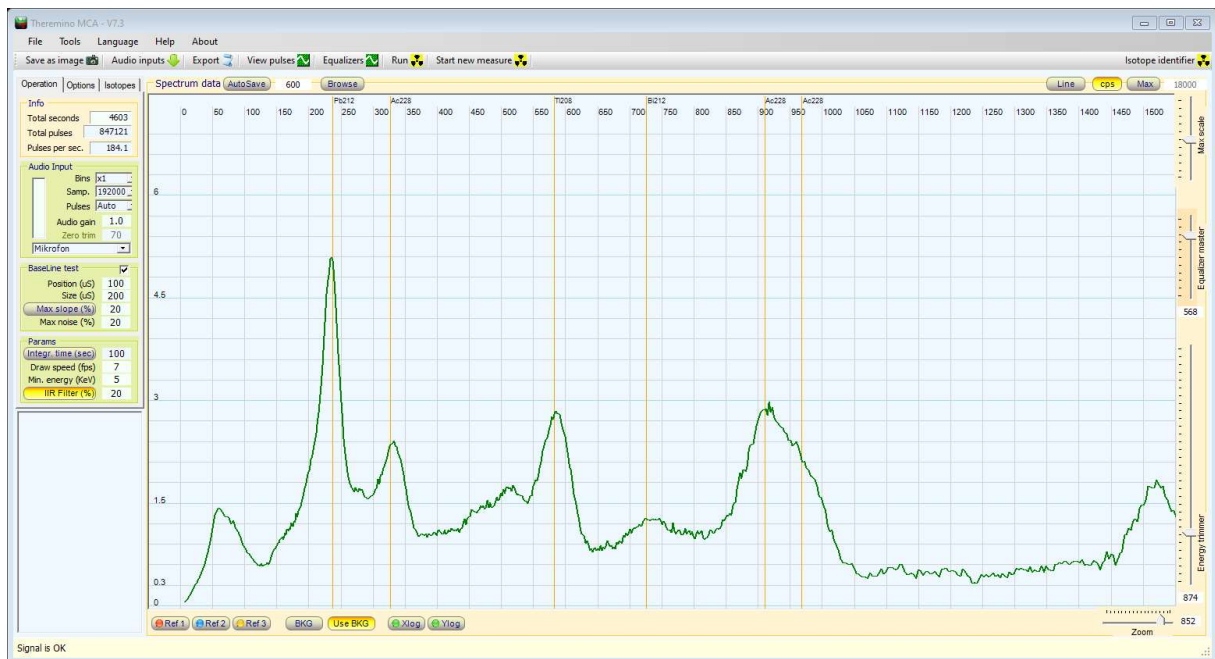
Ein sehr interessantes Gamma-Spektrum erhält man auch, wenn man eine Kohlekomprette (Aktivkohletablette) mit „Radon betankt“ indem man sie 1 Woche zu einem Stück Uranerz in ein Marmeladenglas legt. Das Radon wird dabei durch Physisorption an die Aktivkohle gebunden. Nimmt man dann die Tablette heraus sieht man die Gamma-strahlenden Zerfallsprodukte des Radon Pb-214 und Bi-214 und kein Radium mehr.

Gamma-Spektrum: Thorium Glühstrumpf



Eine sehr beliebte radioaktive Probe ist der Thorium-Glühstrumpf der Gaslaternen, die es teilweise heute noch gibt. Das Spektrum beginnt mit einem deutlichen Röntgenfluoreszenz-Peak der Bleiabschirmung gefolgt von den Linien der Thoriums-Zerfallsreihe. Deutlich sind vor allem die Linie des Pb212 bei 238keV, die Ac228 Linien bei 328keV und die Tl208 Linie bei 583keV. Die Ac228 Linie bei 911keV kann man auch noch deutlich erkennen sie verschmilzt aber mit der Linie bei 969keV.

Gamma-Spektrum: Thorium Schweiß-Elektroden



Wolfram-Schweißelektroden zünden besser und erzeugen einen stabileren Lichtbogen, wenn man das Wolfram mit Thorium legiert. Im Gamma-Spektrum sieht man Peaks, die sehr gut zu den Zerfallsprodukten Pb212, Ac228 und Tl208 des Thoriums passen.

Gamma-Spektrum: Thorium Glas-Linsen in Foto-Objektiv



Auch alte Foto-Objektive, deren Gläser man mit Thorium veredelt hat um den Brechungsindex zu erhöhen zeigen die typischen Linien der Radionuklide in der Thorium-Zerfallskette Pb212, Ac228 und Tl208.