

Ruedi Stucki
 ehem. Gymnasium Lerbermatt 3098 Köniz, rudolfstucki@bluewin.ch

Ein schneller Szintillationszähler für den Feldeinsatz

Einleitung

Das Projektziel war, einen Szintillationszähler für den Feldeinsatz, d.h. zur Suche von radiometrischen Anomalien in der Umwelt zu bauen. Der Zähler soll folgende Eigenschaften aufweisen:

- In Abwesenheit von spezifischen radioaktiven Quellen (d.h. dem Background BG) soll er etwa 100 cps (counts per second) zählen.
- Er soll möglichst hohe Zählraten verarbeiten können.
- Er soll eine möglichst tiefe Energieschwelle aufweisen.
- Er soll mit 5 Volt (TTL-Pegel, USB) betrieben werden können.
- Er soll eine optische Anzeige für Messwerte und Parameter enthalten.
- Er soll die Pegel auch akustisch darstellen können.
- Die Steuerung soll mit einem ARDUINO Microcontroller erfolgen.
- Die Realisation soll mit „Bordmitteln“ eines Gymnasiums, also ohne SMD-Technik sowie mit Streifen-Entwicklerprints erfolgen können.

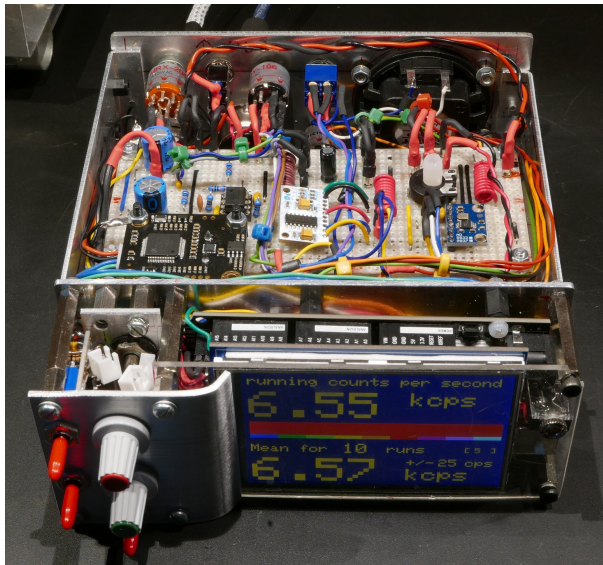


Abb. 1 Ansicht von vorne. Im Vordergrund links: Bedieneinheit, rechts: TFT-Display. Mittelgrund: Auf dem Utility-Board befindet sich links unten das Sprachmodul, in der Mitte der Class-D Audio-Verstärker und rechts der DDS Generator. Auf der Rückplatte: Anschlüsse, Lautsprecher und weitere Bedienelemente.

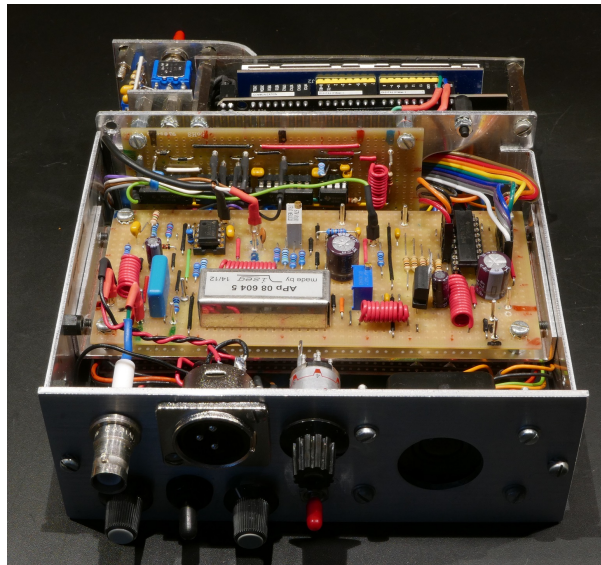


Abb. 2 Ansicht von hinten. Im Vordergrund Anschlüsse und weitere Bedienelemente. Mittelgrund: das im Text beschriebene Main-Board und weiter hinten, senkrecht stehend, der ebenfalls im Text beschriebene Dividierer. Der Chassisaufbau ist „selbst-tragend“.

Entstanden ist - in teilweise rollender Planung - ein Modell mit

- einer Impulsbreite von weniger als 1 μ sec für 662 keV-Gammas der Cs-137 Quelle und
- einer Energieschwelle zwischen 10 keV und 20 keV.
- Die optische Anzeige erfolgt mit einem 3.5" LCD-TFT Display mit 480 x 320 Pixel, das zwar den Nachteil hat, bei direktem Sonnenlicht schlecht lesbar zu sein, dafür auf einen Arduino Mega 2560 gesteckt werden kann und dazu eine Programm-Bibliothek existiert.

- Der Betrieb erfolgt mit einer ins Gehäuse integrierten Powerbank.

Es existieren vier wählbare akustische Darstellungen:

- Die direkten Impulse (verschiedener Höhen), welche mit einem Integrator von 1 μ sec auf etwa 0.1 msec „gestreckt“ und verstärkt werden.
- Mit einem Dividierer kann die Impulsrate 16, 32, 64 oder 128-fach heruntergeteilt werden; die akustischen Impulse selber sind Rechtecke der Breite 0.1 msec.
- Eine Rechteck-Schwingung, erzeugt mit dem DDS-Generator AD9833, dessen Frequenz proportional der Zählrate ist; die Grundfrequenz kann frei eingestellt werden.
- Schliesslich kann die Zählrate mittels des Sprachsynthese-Moduls DFROBOT 0760 vorgelesen werden.

Zur akustischen Verstärkung für den eingebauten Lautsprecher K50WP16 Ω von Visaton dient der Velleman VMA408 Class-D-Verstärker.

Der Einsatz eines Microcontrollers in Kombination mit dem Display erlaubt, mittels *Softkeys* diverse Möglichkeiten, wie Ringspeicher, Alarmer, Mittelwertanzeige usw. frei einzustellen (solche Programmteile sind im Moment noch nicht implementiert).

Im Folgenden wird *nur* das Herzstück, die eigentliche Zählleinheit, sowie zusätzlich der Dividierer besprochen.

Der Detektor

Als Detektor dient ein 1.5" x 3" NaI-Kristall in Kombination mit einem ADIT B38B01 Photomultiplier (PM). Mit dem Kristallvolumen von 87 cm³ können die geforderten 100 cps BG problemlos erreicht werden.

Die Einheit wurde fertig assembliert und mit einem SHV-Anschluss versehen, durch die Firma GammaSpectacular.com für USD 1200.00 erstanden.

(Dazu ein Hinweis: Der Australier Steven Sesselman entwickelt und vertreibt zu sehr interessanten Preisen solche Systeme, mit denen für verhältnismässig wenig Geld vor allem Gammaskopie betrieben werden kann. Weil der Multichannel-Analyzer (MCA) softwaremässig, d.h. mit dem Computer, realisiert wird, fällt ein sonst teures Teil in der Ausrüstung weg. Man erkaufte sich damit zwar den Nachteil, dass die Verarbeitungsrate kleiner ist, als mit einem professionellen MCA. Mit den normalerweise in den Gymnasien verwendeten Quellen spielt dies allerdings keine Rolle.)

Methodik

Zunächst wurden die Teilschaltungen soweit wie möglich mit Hilfe des Programms MULTISIM von National Instruments entwickelt und dann die realen Schaltungen auf dem Breadboard getestet. Anschliessend wurden diese Teilschaltungen zur Gesamtschaltung auf dem Breadboard integriert. Die Feinabstimmung wurde mit der realen Schaltung, den realen Impulsen des PM und mit unverzichtbarer Hilfe eines modernen digitalen Oszilloskops durchgeführt. Erst als die gesamte Kette der Schaltungen einwandfrei gestanden hatte, wurde an das Design des Mainboards gegangen.

Grundkonzept

Der PM wird mit einer HV von +800 Volt versorgt. Die Signale des PM werden mit Hilfe eines Kondensators ausgekoppelt, mit einem Operationsverstärker (OV) verstärkt, etwas differenziert und einem Komparator mit möglichst tief eingestelltem Trigger zugeführt. Weil der Arduino für die angepeilte Höchst-Zählrate viel zu langsam ist, gelangen die Ausgangs-Rechteck-Impulse auf einen schnellen Zähler und erst dieser wird jede Sekunde durch den Arduino ausgelesen.

Noch eine Bemerkung zur Zählrate, bzw. der Impulsbreite. Da die detektierten Teilchen poissonverteilt sind, können bei höheren Raten Impulse „ineinander“ liegen. Also werden eigentliche zwei Ereignisse als eines gezählt, insbesondere, wenn die Impulshöhen verschieden sind. Je kürzer die Impulse sind, desto für höhere Raten ist die detektierte der

wirklichen Rate proportional, bzw. desto kleiner ist die sogenannte *Totzeit*. In unserem Fall haben Messungen eine Linearität innerhalb von 1% bis zu einer Rate von über 20 kcps ergeben.

Nal_Main_Board

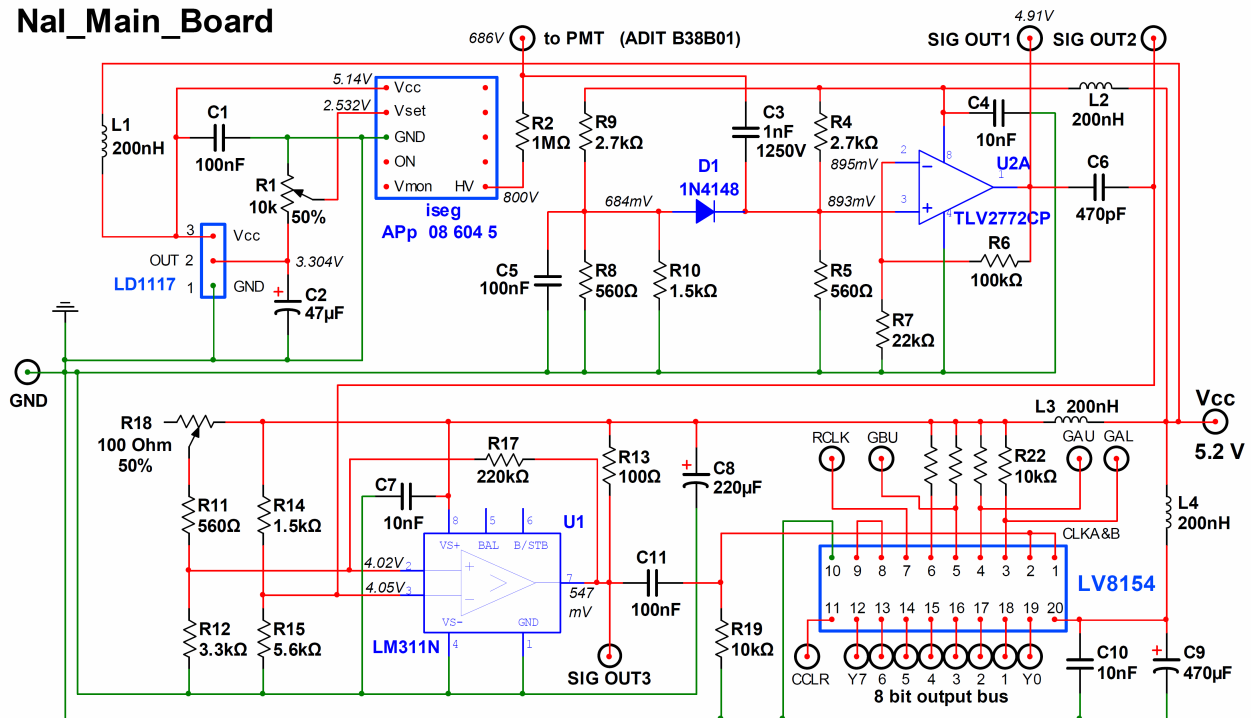


Abb. 3 Schaltschema Main-Board

Printdesign-Details

Es erschien zwecks sauberer Impulse nützlich, bei der Ausführung des Mainboards darauf zu achten, die Masseleitungen möglichst *sternförmig* zu führen, ebenso die Spannungsversorgungen. Diese wurden zusätzlich durch eine serielle Induktivität (L1 bis L4 in Abb. 3) voneinander separiert, um Übersprechen zu vermeiden. In diese Spülchen können Ferritkerne gesteckt werden, um die Induktivität zu erhöhen. Bei allen integrierten Schaltungen wurden die Vcc-Anschlüsse mit einem Keramik-Bypass-Kondensator (beispielsweise C4) von 10 nF versehen, so *nahe wie möglich* am Pin des IC platziert. Damit sollen Spannungsstörungen sowie hochfrequente Schwingungen, sogenanntes *ringing*, unterdrückt werden. Kondensatoren wurden also recht grosszügig eingesetzt! Das alles wäre vielleicht nicht nötig gewesen; jedenfalls ergeben sich aber sehr saubere Rechteckimpulse, wie Abb. 5 zeigt.

Ein Print- und Bestückungsplan kann beim Autor bezogen werden.

Beschreibung der Teile

Die **Hochspannungseinheit** in Abb. 3 links oben. Es wurde das Modul APp 086045 der Firma iseg (Kosten ca. 150 Euro) ausgewählt. Dieses kompakte Modul liefert sehr präzise Hochspannungen. Ripple/noise beträgt weniger als 10mV, was entscheidend ist, dass kleine Impulse überhaupt detektiert werden können. Der Spannungsregler LD1117 liefert eine sehr stabile 3.3V Spannung. Mit dem Präzisions-Zehngang-Trimmer R1 wird die Vset-Spannung am Modul, welche den Ausgangsspannungs-Pegel bestimmt, zwischen 0 und 2.5 Volt eingestellt (aktuell 2.532V). In unserem Fall wurde der maximal mögliche Ausgangspegel von 800 Volt gewählt, welcher über einen 1 MΩ Widerstand (R2) und via SHV-Leitung dem PM zugeführt wird. Auch in widriger und feuchter Umgebung hat sich diese HV-Versorgung als zuverlässig erwiesen, ohne Durchschläge. Daher könnte man auch eine 1000 Volt Versorgung in Betracht ziehen.

Der **Verstärker** in Abb. 3 oben rechts. Das Signal wird durch den Koppelkondensator C3 von 1 nF von der HV abgetrennt und ist ein *negativer* Impuls: naturgemäss - die Elektronen, welche auf der Anode des PM landen sind ja bekanntlich negativ geladen. Als Verstärker wurde mit dem TLV2772 ein 5.1MHz Rail-to-Rail OV gewählt, der sich zur vollen Ausnützung der 5 Volt Versorgungsspannung optimal eignet.

Der OV wird in nicht-invertierender Schaltung eingesetzt; die Gegenkopplungswiderstände R6 und R7 ergeben eine Verstärkung von 5.55. Mit den relativ niederohmig dimensionierten R4 und R5 wird an Pin 3 eine Spannung von +893 mV eingestellt, was eine Ausgangs-Ruhe-spannung von +4.91V an Pin 1 erzeugt. Die Messungen ergaben für die Impulse der 662 keV-Gammas von Cs-137 eine Amplitude von -2.56 Volt direkt am Verstärkerausgang (gelbe Kurve in Abb. 4) bzw. -1.40 Volt hinter dem Kondensator C6 (violette Kurve in Abb. 4).

Signallimitierung: Die alle paar Sekunden durch den Detektor fliegenden Müonen erzeugen grosse Signale, welche den OV übersteuern können. Dies gilt es zu vermeiden, weil ein OV nach Übersteuerung eine gewisse Zeit zur Stabilisierung braucht. Während dieser Zeitspanne können keine Impulse verarbeitet werden, was die Zählrate verfälscht. Zur Vermeidung der Übersteuerung dient die Diode D1, zusammen mit dem Spannungsteiler R8, R9 und R10 sowie C5 als Puffer. Bei zu negativen Impulsen limitiert der zunehmende Strom durch D1 die Impulsamplitude und der OV wird *nicht* übersteuert, siehe Abb.9.

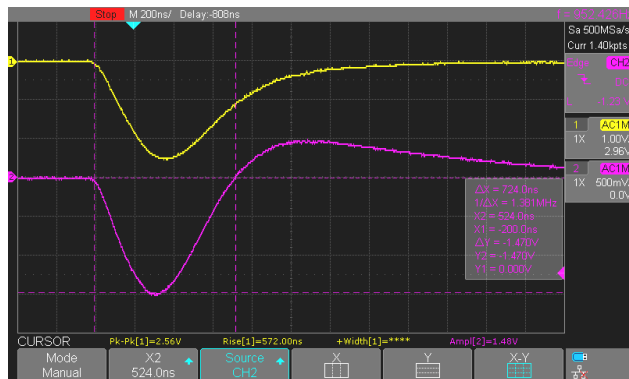


Abb. 4 Ein 662 keV Impuls von Cs-137. Gelb: Impuls direkt hinter dem Verstärker (SIGOUT 1 in Abb. 3). Violett: der Impuls hinter dem Kondensator C6 (SIGOUT 2) überschwingt leicht und ergibt einen besseren *overdrive*.

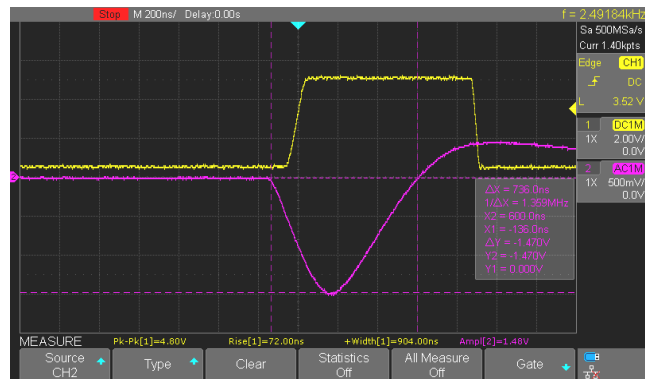


Abb. 5 Ein 662 keV Impuls von Cs-137. Violett: Impuls wie in Abb. 4. Gelb: Der Rechteckimpuls hinter dem Komparator (SIGOUT 3 in Abb. 3) ist sehr sauber und hat eine Breite von 904 nsec. Die Anstiegszeit der (linken) Flanke beträgt 20 nsec/Volt.

Der **Komparator** in Abb. 3 unten links. Die Komparatorschaltung erzeugt aus jeglichen negativen Impulsen ein positives Rechteck von einheitlich +4.9 Volt Höhe an SIGOUT 3 (genau genommen ein Trapez, man verzeihe mir die mathematische Unsauberkeit). Für die Normimpulse der 662 keV-Gammas beträgt die Rechteck-Breite ca. 900 nsec und die Steilheit der Anstiegsflanke ca. 20 nsec/Volt (gelbe Kurve in Abb. 5). Es ist also möglich, im Prinzip eine Million Impulse pro Sekunde zu zählen.

Als Komparator wurde schliesslich der altehrwürdige LM311 (Entwicklungsjahr 1973 !) gewählt. (Bemerkung: Er ist zwar schnell, aber nicht so „ultrafast“ wie ein LT1016, der heftig zu hochfrequenten Schwingungen neigt und dessen Print-Design sehr anspruchsvoll ist. Beispielsweise ist eine *ground plane* nötig und damit ein Multilayer-Print. Versuche mit dem LT1016 wurden angestellt und waren nicht erfolgreich).

Bei Komparator-Schaltungen ist es wichtig, dass die Referenzspannung möglichst schnell über- bzw. unterschritten wird, bzw. der so genannte *overdrive* möglichst rasch geschieht, damit sich saubere Signale ohne Schwingungen ergeben. Dazu dient einerseits R17 der beim Kippen des Komparators die Referenzspannung um etwa 10 mV anhebt. Andererseits wirkt der Koppelkondensator C6 in der Schaltung leicht differenzierend; das Signal SIGOUT 2 überschwingt in positive Richtung, siehe Abb. 4 und Abb. 5, violette Kurven. Beide Flanken sind steiler und somit die Spannungsänderungen grösser. Mit dem Präzisions-Zehngang-Trimmer R18 zusammen mit R11 und R12 kann die Referenzspannung

genau abgeglichen werden, aktuell bei +4.02 Volt an Pin 2. Der Spannungsteiler R14 und R15 erzeugt eine um etwa 25 mV höhere Spannung von +4.05V an Pin 3. Damit werden negative Impulse ab einer Amplitude von ca. -25 mV detektiert. Die Suche dieser empfindlichst-möglichen Einstellung geschieht mit Hilfe realer Impulse und dem Oszilloskop, die Rechtecke können an SIGOUT 3 betrachtet werden.

Der LM311 verfügt über einen sogenannten *open collector* Ausgang (Pin7), dabei ist R13 = 100Ω der möglichst niederohmige Kollektorwiderstand dafür. Das Signal gelangt über den Kopplungskondensator C11 auf den Zähler. R19 dient als pull-down-Widerstand, beides zusammen wirkt als Hochpass mit einer Grenzfrequenz von 160 Hz.

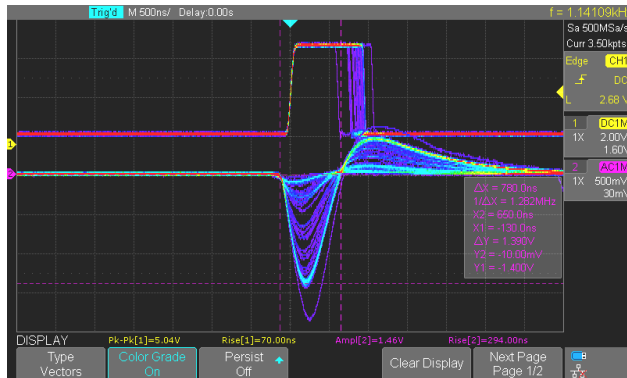


Abb. 6 Die farbverstärkte Darstellung (Color Grade) hebt Häufungen - die hellen Kurven - hervor. Die hohen Impulse (SIGOUT 2 in Abb. 3) mit einer Amplitude von -1.39 Volt stammen von den 662 keV-Gammas, die niedrigen von den Ba-X-Photonen bei 32 keV. Auch die Impulse der Backscatter-Gammas sind zu erkennen. Die Empfindlichkeit des Zählers liegt damit klar unter 32 keV.

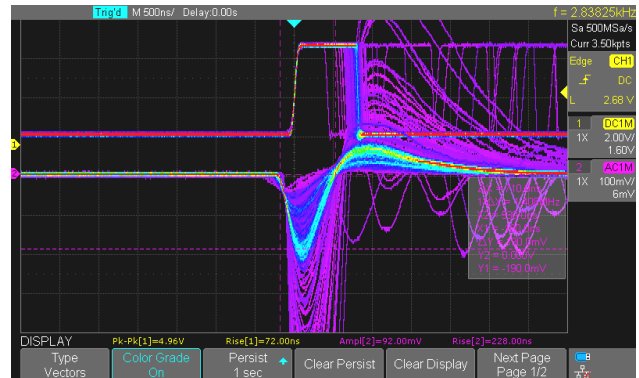


Abb. 7 Farbverstärkte Darstellung: Die 60 keV-X-Photonen von Am-241 ergeben eine Amplitude von -190 mV. (SIGOUT 2 in Abb. 3). Es sind viele Impulse zu sehen, welche von Gamma- bzw. X-Strahlung deutlich tieferer Energie stammt, insbesondere mit ca. -80 mV die Serie der 26 keV X-Photonen.

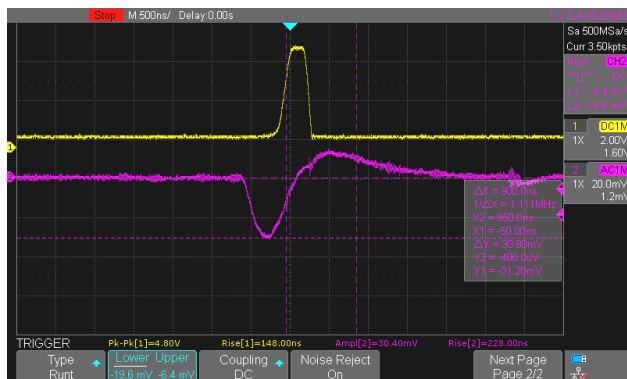


Abb. 8 Nachweisgrenze bei Impulsamplituden von ca. -30 mV (SIGOUT 2 in Abb. 3). Damit dürfte die Nachweisgrenze bei einer Energie zwischen 10 keV und 20 keV liegen.

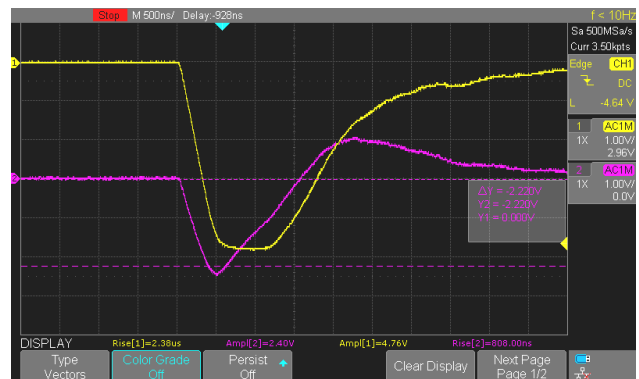


Abb. 9 Signal eines Müons. Die Impulshöhe wird auf -4.7 Volt (SIGOUT 1, gelbe Kurve) limitiert; die maximale Amplitude an SIGOUT 2 beträgt -2.4 Volt. Die Impulse sind deutlich breiter.

Der **Zähler** in Abb. 3 unten rechts. Dafür wurde der schnelle 32 Bit-Zähler LV8154 ausgewählt, welcher über einen 4 x 8 Bit Output-bus verfügt. Es werden nur 18 Bit verwendet, die höchste Zählrate beträgt damit 262'144 counts. Die Steuerung erfolgt durch den Arduino.

Die drei verwendeten Register (GAL, GAU, GBL) werden jede Sekunde ausgelesen. Eine ansteigende Flanke auf RCLK speichert die counts in ein internes Register. Anschliessend werden nacheinander GAL, GAU, GBL, auf LOW gesetzt, um das jeweilige Byte auf den Output-bus (Y0 bis Y7) zu stellen und auszulesen. (Die pull-up-Widerstände R22 sind eigentlich nicht unbedingt nötig, weil die Pins softwaremässig auf HIGH gehalten werden.) Am Schluss erfolgt ein LOW-Impuls an CCLR, um die Register zu löschen. CCLR wird ansonsten durch den Arduino auf HIGH gehalten, daher kein pull-up-Widerstand.

Nal_Divider_Board

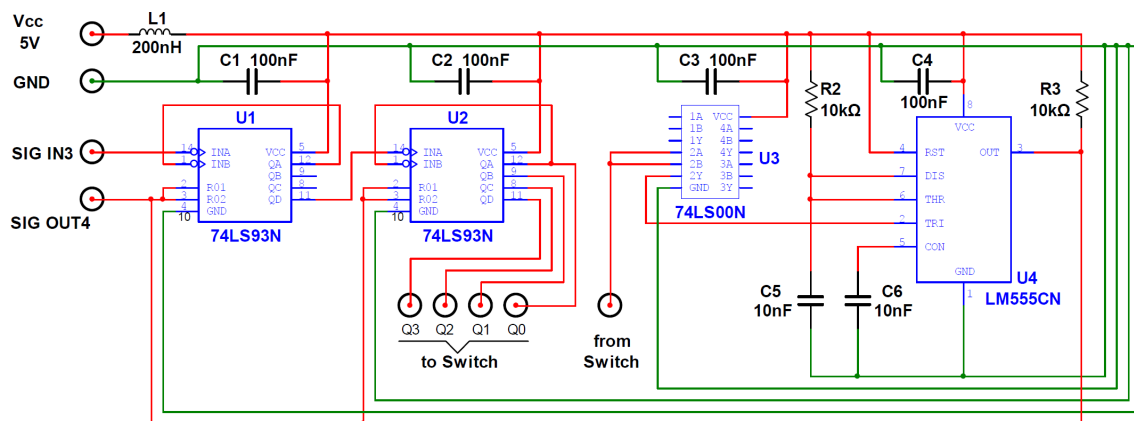


Abb. 10 Schaltschema Dividierer

Der **Dividierer**. Die Praxis hat gezeigt, dass sich die direkte Impulsrate akustisch nicht eignet, um radioaktive Quellen zu suchen; die Rate ist zu hoch. Daher musste ein Dividierer gebaut werden. Auch in diesem Fall ist der Arduino zu langsam, also ist eine diskrete Schaltung nötig.

Das Signal wird an SIGOUT 3 (Abb. 3) abgegriffen. Zum Dividieren werden (aus Restbeständen) zwei 4-bit-Zähler LS93 gemäss Abb. 10 in Reihe gestellt. Mit Hilfe eines mechanischen Drehschalters kann der Dividend 16, 32, 64 oder 128 (Q0 bis Q3) gewählt werden. Mit etwas mehr Schaltungsaufwand wäre natürlich auch eine mit Softkeys gesteuerte elektronische Wahl möglich - aber in der Praxis zu umständlich. Für die Akustik sind die 1 μ sec-Rechtecke nicht hörbar, sie müssen auf 0.1 msec gedehnt werden. Dazu dient der Timer NE555 (ebenfalls ein Veteran aus den Siebzigerjahren!). Dieser verlangt einen negativen Trigger, daher wird das gewählte Signal noch mit einem NAND-Gatter LS00 invertiert. Mit $R2 = 10\text{ k}\Omega$ und $C5 = 10\text{ nF}$ ergibt sich ein positives Rechteck der Breite 0.11 msec am SIGOUT 4 Pin. Mit diesem Signal werden einerseits die beiden Zähler zurückgesetzt (Pin 2 und 3), andererseits gelangt es via Verstärker auf den Lautsprecher. Auch beim Divider-Board wurde auf sternförmige Masse- bzw. Vcc-Leitungen geachtet und Bypass-Kondensatoren (C1 bis C4) nahe an den Bauteil-Anschlüssen eingesetzt.

Praxistest / Schlussbetrachtung

Die Feldtests verliefen durchwegs erfolgreich. Besonders bewährt haben sich bei der Suche nach Anomalien die Divider-Impulse. Zerfälle sind bekanntlich zeitlich poissonverteilt; mit „Untersetzung“ wird die Zählrate regelmässiger und kleine Ratenunterschiede sind sehr gut wahrnehmbar. Weiter müssen mit der Sprachausgabe die Messwerte nicht vom Display abgelesen werden. Es konnten an einer Stelle Zählraten bis 150 kcps (sic!) gemessen werden.

Koordinaten einiger Stellen mit Anomalien

Interessante und gut zugängliche Stellen finden sich beispielsweise ob Naters, Perimeter 642920/131200 oder beim und im Stollen bei der Massaschlucht 643589/131627. Zwischen Nendaz und Verbier gibt es viele Stellen, beispielsweise 588795/110359 oder 588776/110321 oder 588867/110231. Viele Stellen auch im Perimeter Embd-Törbel-Moosalp-Zeneggen, beispielsweise 631497/123293. In der Ostschweiz bei Tiraun (720249/178580 oder 720196/178447).

Weitere Möglichkeiten / Ausbaumöglichkeiten

Mit zwei Zählern kann eine Koinzidenzeinheit zur Demonstration der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) oder zum Zählen von Müon-Durchgängen gebaut werden. Mittels eines GPS-Moduls könnten die Daten mit den Ortskoordinaten verknüpft und auf einer topographischen Karte dargestellt werden.