

Einfacher, stromsparender Zählrohrverstärker für Geigerzähler

Bernd Laquai, 29.08.13

Ein großer Vorteil eines auf einem Geiger-Müller Zählrohr basierten Detektors oder Strahlungsmessgeräts für radioaktive Strahlung ist zweifelsohne die einfache Signalverarbeitung des Zählrohrsignals. Mit den von den Herstellern typischerweise angegebenen Anoden- und Kathodenwiderständen als Beschaltung erhält man meist bereits Signalamplituden von mehreren Volt, so dass man im Prinzip lediglich eine Impedanzwandlung vornehmen muss und nicht im eigentlichen Sinne eine Verstärkung. Dazu reicht heute bereits ein einfacher, stromsparender und kostengünstiger Komparator. Da oftmals eine Weiterverarbeitung des Zählrohrsignals mit einem Mikrocontroller erfolgt, reicht es ein digitales Logiksignal für die Dauer eines Zählrohrimpulses zu erzeugen, der je nach Zählrohr im Bereich von 10-200 μ s liegen kann. Allerdings sind doch etliche Effekte zu beachten, die nicht gleich auf den ersten Blick offensichtlich sind. Dies ist in diesem Artikel diskutiert.

Grundlagen eines Geiger-Müller Zählrohrs

Geiger-Müller Zählrohre werden heute meist als selbstlöschende Zählrohre angeboten, die mit einem Halogen-Löschgas-Zusatz zum Zählgas gefüllt sind. Die zahlreichen Ausführungsformen haben in der Regel ein Metallgehäuse, welches für die Gamma-Sensitivität sehr wichtig ist und gelegentlich ein Fenster, meist aus Glimmer (engl. mica). Fenster-Zählrohre sind zusätzlich empfindlich gegen Betastrahlung. Ist das Fenster aus normalem dünnem Glimmermaterial hergestellt, ist eine gewisse Mindestenergie für die Betapartikel erforderlich um das Fenster zu durchdringen. Ist das Fenster aus sehr dünnem Material angefertigt, wird das Zählrohr auch für geringe Betaenergien (Soft Beta) oder sogar für Alphastrahlung empfindlich. Da die Betastrahlung eine kontinuierliche Energieverteilung bis zu einem Maximalwert hat, nimmt die Zählrate zu, wenn das Material dünner wird, weil dann auch die Partikel mit niedrigen Energien das Fenster durchdringen können. Bei der Alphastrahlung ist es hauptsächlich die Schwächung im Fenstermaterial, was die Zählrate zunehmen lässt, wenn die Dicke abnimmt. Mit abnehmender Fensterdicke wird das Zählrohr natürlich auch mechanisch immer empfindlicher.

Das Wandmaterial ist für die Gammaempfindlichkeit wichtig, da hier die Gammaquanten selbst nicht die Auslöser einer Ionisation des Füllgases sind, sondern die photoelektrisch ausgelöste Elektronen aus der Zählrohrwand. Meist wird Chrom-Stahl als Wandmaterial benutzt, was eine geringe Austrittsarbeit für die Photoelektronen hat. Auch für die Empfindlichkeit bezüglich der Gammaquanten gibt es in der Regel eine starke Energieabhängigkeit, welche man gelegentlich durch Filtermaterialien zu kompensieren versucht, die als Folie um das Zählrohr angebracht sind.

Ein Geiger-Müller Zählrohr wird in aller Regel bei einer so hohen Spannung betrieben, dass sichergestellt ist, dass das durch das ursprüngliche Strahlungsquantum ionisierte Gasatom eine lawinenartige Vervielfachung an weiteren ionisierten Gasatomen auslöst. Dieser Effekt tritt ab einer gewissen

Schwellspannung V_{th} ein. Bereits ab einer niedrigeren Startspannung V_s lassen sich zwar schon Ionen erzeugen, die aber infolge von Rekombinationsmechanismen auch schnell wieder neutralisiert werden. Für höhere Spannungen aber werden die Ionen von der Kathode und die Elektronen von der Anode so stark angezogen, dass eine Rekombination nicht mehr stattfinden kann. Ab der Schwellspannung V_{th} ist dann zusätzlich sichergestellt, dass bei jeder initialen Ionisation die Ladungsträger im elektrischen Feld so stark beschleunigt werden, dass sie wiederum neue Gasatome ionisieren. Auf ihrer Wegstrecke finden meist mehrfach weitere Ionisationen statt, die wiederum wie ein Schneeballeffekt neue Gasatome ionisieren. Verstärkt wird dieser Effekt dadurch, dass die innere Elektrode ein dünner Stift oder Draht mit kleinem Durchmesser ist, so dass die Feldstärke in dem radialen elektrischen Feld mit dem Quadrat des Abstandskehrwertes auf sehr hohe Werte steigt. Im Bereich des Geiger-Müller Plateaus (von V_{th} aus für 50-100V zusätzlich) steigt die Zählrate nur wenig mit der Betriebsspannung, was ein weiterer Vorteil des einfachen Zählrohrdetektors ist.

Es ist aber nach der Auslösung einer Lawinen-Ionisation notwendig, den Stromfluss auch wieder gezielt stoppen (engl. to quench) zu können, so dass nur ein kurzer Stromimpuls entsteht und das Zählrohr möglichst schnell wieder für eine neue Ionisation bereit ist. Bei den meisten Zählrohren geht der Hersteller davon aus, dass dieses „Quenching“ passiv erfolgt, d.h. bei einer gegebenen elektrischen Zählrohrkapazität durch Einfügen eines entsprechenden Anodenwiderstands. Hier sind Werte von 1-20M Ω üblich je nach Kapazität des Zählrohrs und Art des Füll- und Löschgases. Die Kapazität des Zählrohrs ist wichtig, da in ihr die notwendige Ladung für die Neutralisierung der bei der Vervielfachung entstehenden Ionen gespeichert ist. Man sollte diese Kapazität, die vor allem durch die Gestaltung Anode vorgegeben ist, möglichst nicht vergrößern. Das führt sonst zu einer längeren Brenndauer der Lawine, was die Totzeit verlängert und die Lebensdauer stark verkürzen kann. Deswegen sollte man den Anodenwiderstand auch möglichst direkt am Anodenstift anbringen und die Leitungslänge kurz halten.

Wenn die Ladung, die in der Zählrohrkapazität steckt aufgebraucht ist, soll die Spannung am Zählrohr so stark absinken, bis der Stromfluss erlischt. Dies wird durch das sogenannte Quenching Gas begünstigt (meist ein Halogen). Dieser Zusatz zum Füllgas bindet eventuell überschüssige Ionen, so dass keine weitere Ionisation bei niedriger Spannung mehr stattfinden kann. Das aber heißt, dass der Anodenwiderstand und die Zählrohrkapazität (in der Größenordnung von einigen pF) sehr gut aufeinander abgestimmt sein müssen.

Zum Abgriff eines Zählimpuls-Signals gibt es nun zwei Möglichkeiten, der Abgriff vor dem Anodenwiderstand bzw. der Abgriff an der Kathode. In beiden Fällen ist ein weiterer Widerstand nötig, der mit dem Anodenwiderstand einen Spannungsteiler bildet unter der Annahme, dass das Zählrohr während der Ionisation einen gegenüber dem Anodenwiderstand vernachlässigbaren kleinen Widerstand annimmt. Im Falle des Anodenabgriffs ist natürlich noch ein hochspannungsfester Kondensator nötig, der das Zählimpuls-Signal von der Hochspannung abtrennt. Einige Zählrohrhersteller empfehlen den Kathodenabgriff, da das Anbringen des Spannungsteilers und der Signalabgriff Streukapazitäten erzeugt, die an der dünnen Anode schwer zu kontrollieren sind und welche die Zählrohrcharakteristik leicht negativ beeinflussen. Der Kathodenabgriff ist dagegen deutlich unkritischer, solange das Zählrohr nicht mit der Signalmasse verbunden sein muss. Ein hochohmiger Eingang des

Verstärkers parallel zum Messwiderstand R_2 sowie dessen meist geringe Eingangskapazität verändert das Verhalten hier nicht wesentlich. Gelegentlich wird sogar absichtlich noch eine kleine Kapazität C_k parallel zu R_2 gelegt, dann nämlich kann man die Zählrohrkapazität C_z mit einem kapazitiven Spannungsteiler kompensieren, ähnlich wie bei einem Oszilloskop-Tastkopf. Das Widerstandsverhältnis $R_1 : R_2$ wird von den Herstellern im allgemeinen als Testbedingung für Zählrohre mit 45:1 angegeben.

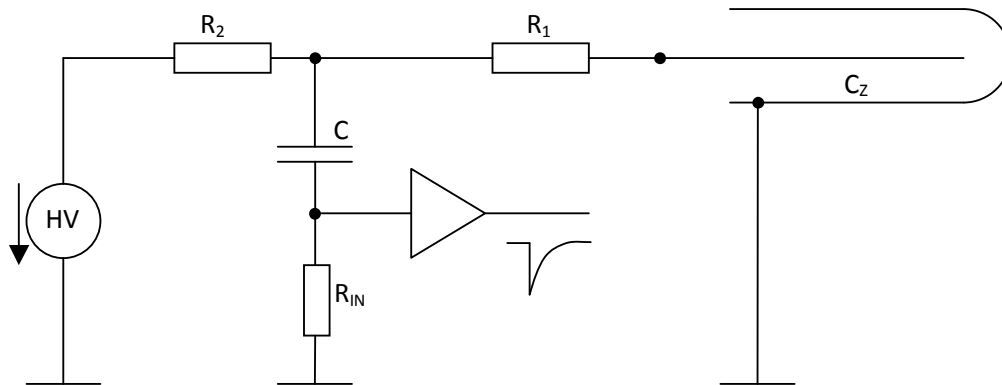


Abb. 1a: Signalabgriff an der Anode

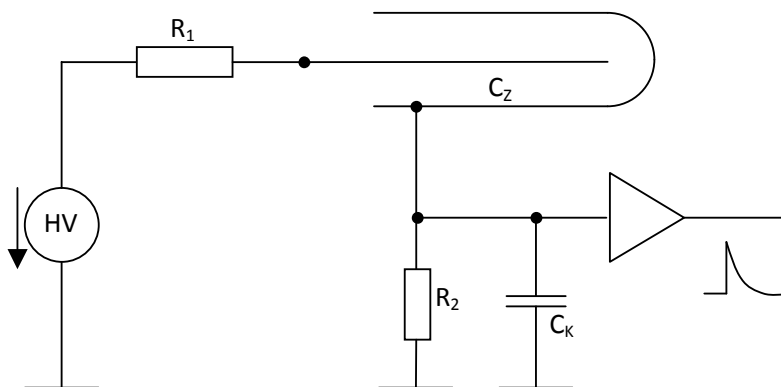


Abb. 1b: Signalabgriff an der Kathode

In Abb. 2 ist ein mit Kathodenabgriff erzeugtes Zählrohrsignal für ein sehr gängiges Endfenster-Zählrohr vom Typ ZP1400 (9mm \varnothing , l=39mm) gezeigt, welches von etlichen Herstellern angeboten wird. Der Kathodenzyylinder besteht hier aus Chrom-Stahl (28%Cr, 250mg/cm²), und das Glimmer-Fenster (2-3mg/cm²) ist für Beta-Strahlung durchlässig. Die Füllung besteht aus einem Neon-Argon Gemisch mit Halogenzusatz. Die Kapazität des Zählrohrs beträgt 2pF und es wird ein Anodenwiderstand von 10M Ω

empfohlen. Die Startspannung V_s beträgt 325V, die Schwellspannung V_{th} ist 400V mit einer Plateaulänge von 200V. Das Signal wurde mit einem Widerstand R_1 von $10M\Omega$ und einem Widerstand R_{12} von $220k$ erzeugt (45:1 Verhältnis), die Spannung betrug 400V.

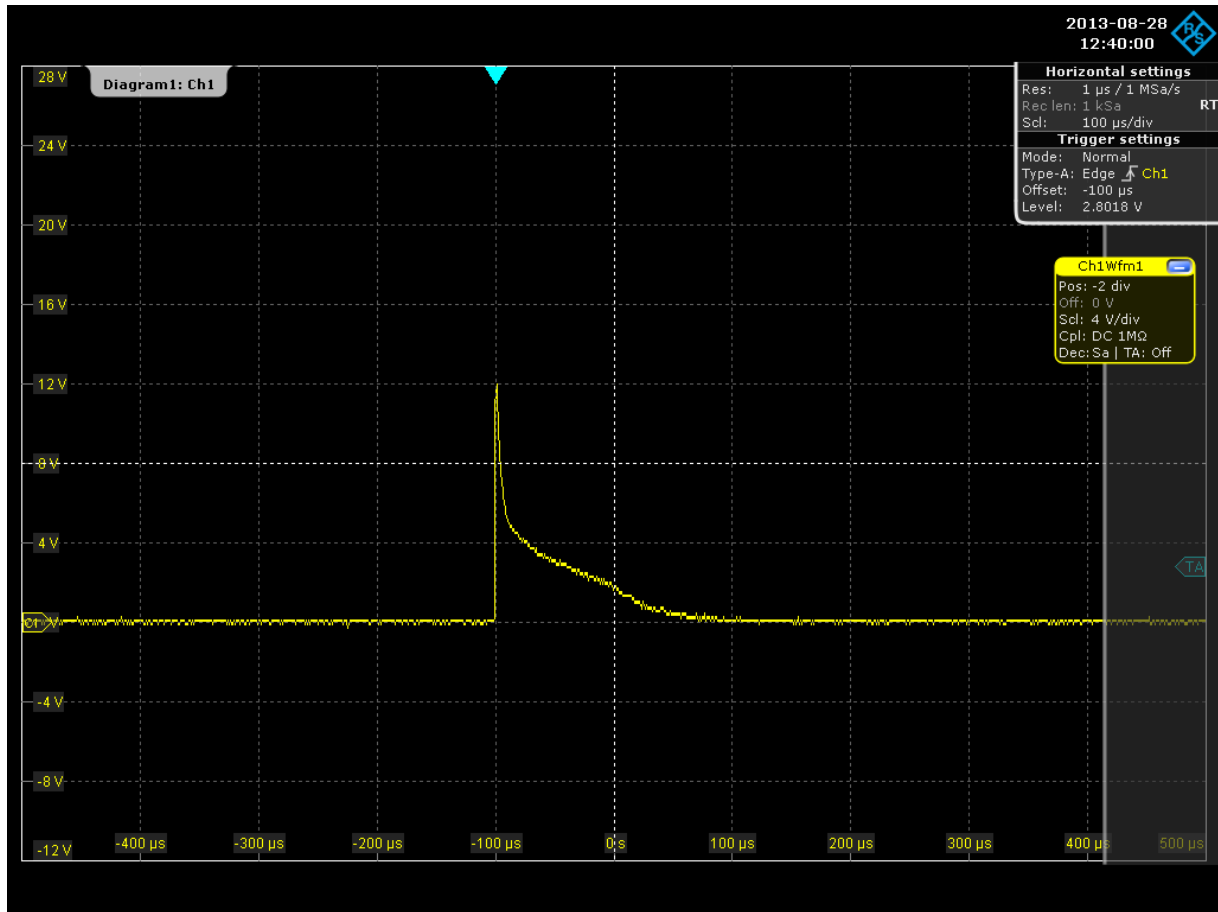


Abb. 2: Zählimpuls eines ZP1400 Endfenster-Zählrohrs unter den vom Hersteller vorgegebenen Bedingungen

Man kann eine sehr scharfe steigende Flanke erkennen, deren Anstiegszeit unter $1\mu s$ liegt, gefolgt von einem steilen Abfall, der dann in einen flacheren Abfall übergeht. Die gesamte Impulsdauer liegt bei etwa $150\mu s$ und setzt sich aus der Totzeit, in der das Rohr „blind“ ist (steiler Peak) und der Erholzeit (Recovery Time), in der kurz darauffolgende Ionisationen niedrigere Peaks erzeugen würden (flacher Abfall), zusammen. Die Recovery Zeit ist die Zeit, welche die Zählrohr-Kapazität braucht um sich über den Anodenwiderstand wieder auf die volle Arbeitsspannung aufzuladen.

Wie man erkennen kann, ist die Amplitude des Zählimpulses ohne Last bereits 12V hoch, was für viele Logikschaltungen schon zu hoch wäre. Allerdings darf dazu keine Lastkapazität parallel zu R_2 liegen, sonst fällt der Impuls niedriger aber dafür länger aus. Der Quellwiderstand des Sensors ist in dieser Anordnung also etwa $220k$, so dass auch der Eingangswiderstand des Zählrohrverstärkers möglichst kapazitätsarm

und hochohmig sein sollte um die Amplitude zu erhalten. Die einfachste Lösung für einen Zählrohrverstärker ist damit die Verwendung eines Operationsverstärkers, der schnell genug ist (passende Bandbreite) und als nicht invertierender Verstärker (Ausgang direkt auf den negativen Eingang geführt, Signal am positiven Eingang) beschaltet ist. Da aber in der Regel das Signal nicht linear verstärkt werden soll, sondern vielmehr ein Logiksignal (Rechteck-Form) generiert werden soll, empfiehlt es sich eher einen stromsparenden Komparator zu benutzen. Komparatoren sind leichter stabil zu betreiben und in der Regel auch mit weniger Aufwand und Kosten für schnelle Signale zu bekommen. Allzu schnell sollte der Komparator allerdings auch nicht sein, da er sonst auch zu leicht auf hochfrequente Störungen reagiert. Als sehr stromsparender Komparator eignet sich zum Beispiel der Typ MCP6541R (Microchip) im SOT23-5 Gehäuse. Das Vergleichssignal lässt sich auf einfache Weise über einen hochohmigen Spannungsteiler gewinnen, den man am besten auch abblockt.

Da die Versorgungsspannung zwischen 3 und 5V liegen wird, ist es zweckmäßig die Impulsamplitude mit einer Diode gegen die Versorgungsspannung zu begrenzen. Dies verbreitert den Impuls auch deutlich auf Werte, die der Komparator dann besser auflösen kann, ohne dass die Erholzeit nennenswert überschritten wird.

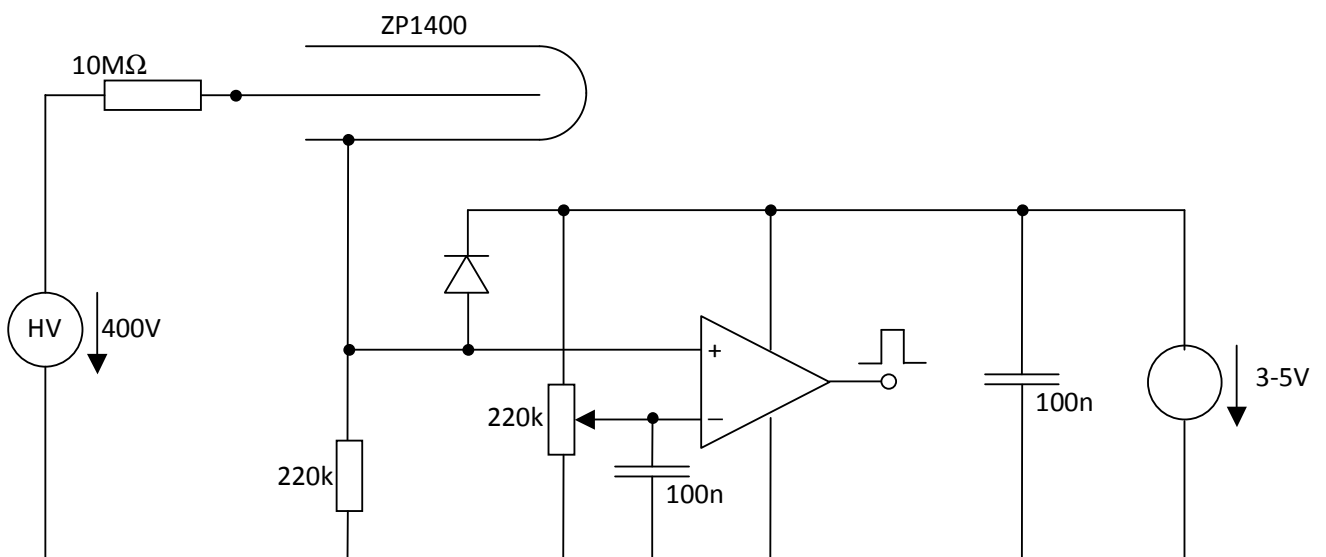


Abb. 3: Stromsparender Zählrohrverstärker mit geringer Totzeit

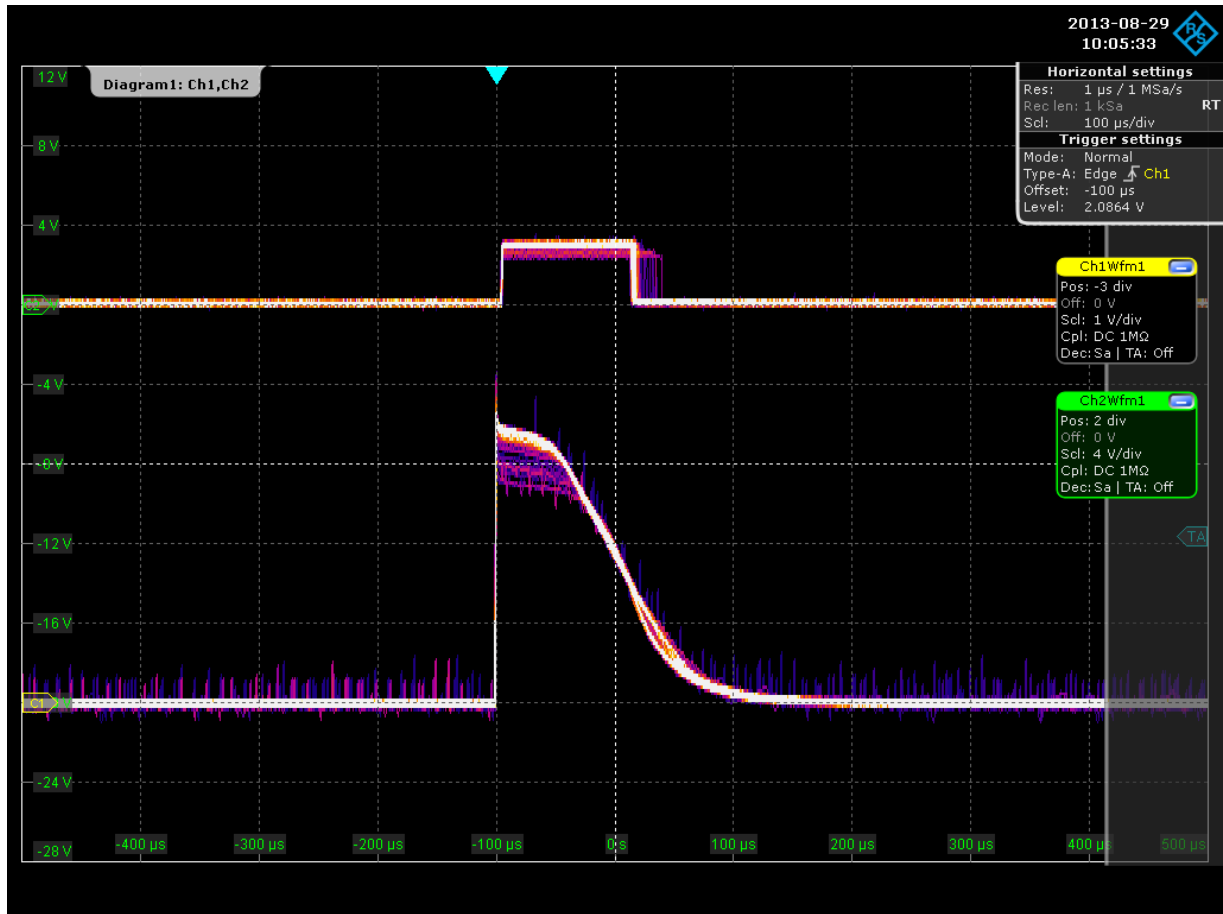


Abb. 4: Viele überlagerte Impulse des Geiger-Müller Zählrohrverstärkers mit dem zugehörigem Komparator-Ausgangssignal

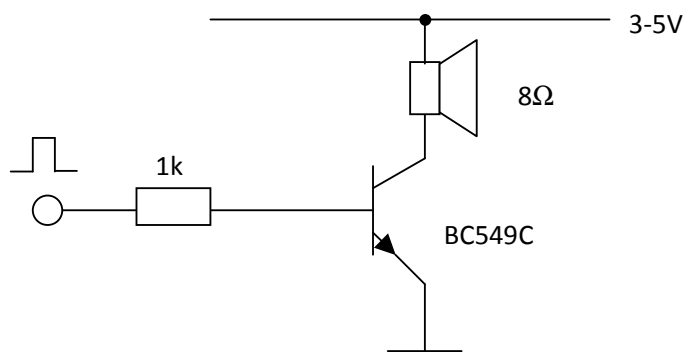


Abb. 5: Anschluss eines Lautsprechers um das legendäre Knackgeräusch eines Geigerzählers zu erzeugen

Abb. 4 zeigt das Ausgangssignal im Vergleich zum Signal am positiven Komparator-Eingang. Man kann die kurze Impulslänge des Logiksignals erkennen, die sich bei einer Betriebsspannung von 3V und einem

Vergleichssignal von 1.5V ergibt. Die Totzeit liegt somit auch etwa bei etwa 150µs, was sehr hohe Zählraten erlaubt. Was am Eingangssignal zum Komparator allerdings zu erkennen ist, sind kleine nadelförmige Störungen. Das Bild zeigt eine Überlagerung vieler Impulse und gelegentlich treten Einstreuungen aus dem getakteten Hochspannungsnetzteil auf, die sich ebenfalls überlagern. Man sieht also, dass der Platinenaufbau wegen der stromsparenden hochohmigen Auslegung gegen Einstreuung sehr empfindlich ist. In diesem Fall war es ein einfacher Aufbau teilweise mit freien Drähten zwischen den Funktionsblöcken auf einer Lochraster-Platine. Ein sauberes Abblockkonzept, kurze Leitungen und gegebenenfalls Abschirmungen mit Masseflächen auf einer 2-lagigen Platine sind also sehr entscheidend für saubere Signale und ein gutes Ergebnis.

Das digitale Ausgangssignal kann nun einem Mikrocontroller (z.B. dem Arduino) in Form eines Interrupt-Requests (Unterbrechungsanforderung) zur direkten Weiterverarbeitung zugeführt werden. Alternativ lässt sich auch ein digitaler Zählerbaustein anschließen oder ein Bipolar-Transistor, welcher über einen Basisvorwiderstand direkt einen Lautsprecher treibt. Solange die Zählrate gering ist, bleibt dann trotz des relativen hohen Stroms durch den Lautsprecher der mittlere Stromverbrauch sehr niedrig, da der Komparator, den Transistor praktisch digital an- und gleich wieder ausschaltet. Gegebenenfalls kann man über den Basisvorwiderstand die Lautstärke entsprechend anpassen.

Literatur:

Geiger Tube Theory
Centronic Ltd.

http://www.centronic.co.uk/downloads/Geiger_Tube_theory.pdf