IsiGeiger: Ein Geiger-Müller Zählrohr-Modul für Mikrocontroller-Anwendungen

Bernd Laquai, 3.12.2018, Update 18.04.2021

IoT-Anwendungen (Internet-Of-Things) werden zunehmend populär und verknüpfen Mikrocontroller meist mit Sensorik und Kommunikations-Peripherie zu intelligenten, netzwerkfähigen Messgeräten. Zudem werden aktive elektronische-Komponenten immer sparsamer im Leistungsverbrauch und die modernen Kommunikationsmethoden ermöglichen hohe Reichweiten mit minimaler Leistung. Daher ist es mit modernen Technologie möglich, bei einer Leistungsaufnahme von weniger als 100mW einen Sensor per Funk über ein Low-Power WAN an das Internet anzubinden und dabei Reichweiten von bis zu 30km zu erreichen. Das kommt insbesondere der Umweltmesstechnik zu Gute, wo Sensoren nicht nur im Stadtgebiet autonom ihre Daten ins Internet einspeisen, sondern auch im wenig besiedelten Gebiet, wo das Bereitstellen einer Kommunikations-Infrastruktur für Provider kommerziell nicht so sehr interessant ist. Besonders attraktiv für diesen Zweck sind freie Datennetze, wie zum Beispiel das „The Things Network“ (TTN), welches das LoRaWAN Wireless-Protokoll im freien 868MHz-ISM-Band nutzt und engagierte Bürger selbst die Netzwerk-Infrastruktur aufbauen.

Es sind zahlreiche IoT-Mikrocontroller-Entwicklungsboards verfügbar, die sowohl über Funkmodule aller Art wie auch über Schnittstellen zu externen Sensoren aller Art verfügen. Die Controller sind heute äußerst leistungsstarke, oft schon auf ARM-Cores basierte Microchips, die in modernster Halbleitertechnologie gefertigt werden. Das bringt es auch mit sich, dass die verwendeten Spannungen für die Stromversorgung oft schon unter 5V liegen und auch die Treiberfähigkeit der IO’s immer mehr abnimmt, um den Leistungsverbrauch gering zu halten. Angesichts dessen wird so mancher Entwickler instinktiv davor zurückschrecken, ein solches Mikrocontroller-Board mit einem Sensor, der zum Betrieb Hochspannung benötigt, zu verknüpfen. Aber genau das ist nötig, wenn es das Ziel ist, die Umweltradioaktivität mit einem Netzknoten in einem IoT-Messnetz zu überwachen. Daher wird hier ein sehr einfach verständlicher Schaltungsentwurf vorgestellt, der die Hochspannung für ein Geiger-Müller Zählrohr bereitstellt, sich durch eine niedrige Stromaufnahme von weniger als 10mA bei 5V Spannungsversorgung auszeichnet und speziell dafür gedacht, die Zählpulse aus einem radioaktiven Zerfall an einen Mikrocontroller-Eingang weiter zu geben.

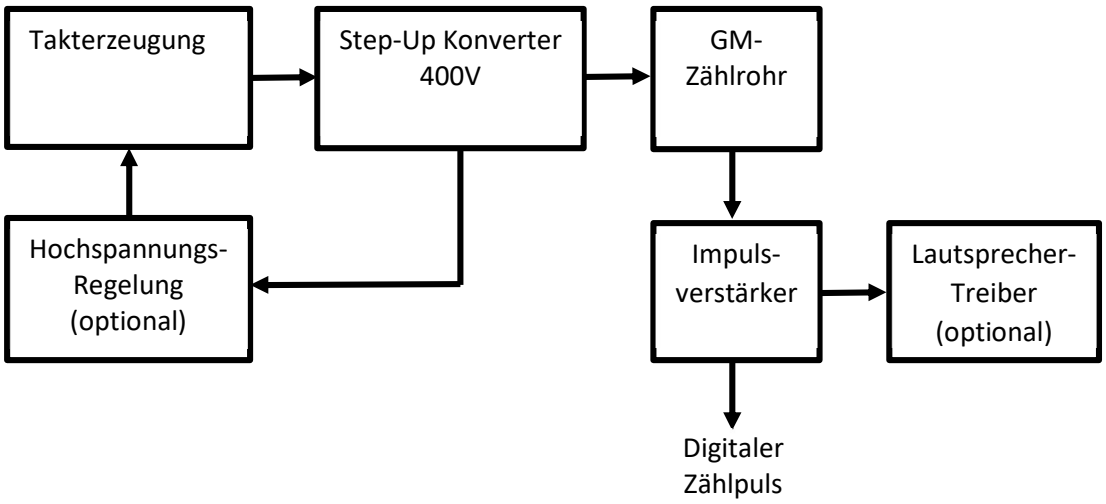


Abb. 1: Blockdiagramm des IsiGeiger-Moduls

Abb. 1 zeigt die einfache Struktur der Schaltung, der Schaltplan ist in Abb. 11 und 12 dargestellt. Kernstück der Schaltung ist der Step-Up-Konverter (Boost-Konverter). Mit heutigen Halbleitern ist der Aufbau eines solchen DC/DC Step-Up Konverters denkbar einfach. Es sind heute kostengünstige MOSFET Transistoren verfügbar, die einerseits leistungslos mit kurzen Schaltzeiten geschaltet werden können und andererseits auch eine sehr hohe Spannungsfestigkeit haben. Daher ist für eine solche Schaltung, die etwa 400-500V aus 5V erzeugen können muss, kein verlustbehafteter Transformator mehr nötig. Allerdings sollte man bei der Auswahl des Transistors eine gewisse Sorgfalt walten lassen. Für einen geringen Stromverbrauch ist nämlich auch ein geringer Sperrstrom wichtig, nämlich dann, wenn das Gate auf null Volt liegt und der Transistor ausgeschaltet ist. Hier wurde der Transistor BSP125 gewählt, der sich durch einen sehr niedrigen Leckstrom auszeichnet und gleichzeitig aber auch eine sehr niedrige Schwellspannung aufweist. Der eigentlich Hochsetz-Vorgang (Step-Up) der Spannung geschieht an der Induktivität mit 150mH. Die Spannung beim Abschalten des Transistors beträgt nach dem Induktionsgesetz U = -L*di/dt. Darin ist di der Stromsprung beim Ausschalten und da der Strom nach dem Ausschalten nahe Null ist, entspricht di auch dem Strom im eingeschalteten Zustand. Die Größe dt ist die Schaltzeit des Transistors. Der Transistor sollte also nicht auf zu viel Leistung ausgelegt sein, sonst benötigt er eine hohe Schaltzeit und reduziert so die erreichbare Spannung. Was für den Leistungsverbrauch ebenfalls entscheidend ist, ist die große Induktivität. Um eine vorgegebene Spannung U zu erreichen wird dann ein kleiner Strom im Einschaltzustand benötigt, wenn die Induktivität groß ist. Die Konsequenz ist dann aber auch eine deutlich niedrigere Taktrate für das Ein- und Ausschalten des Transistors, da bei einer großen Induktivität der Strom deutlich länger braucht, bis er auf den Endwert angestiegen ist (der Strom in der Spule steigt nach dem Einschalten des Transistors linear an und speichert die Energie ins Magnetfeld).

Die Diode, welche nach dem Ausschalten des Transistors den Stromfluss in die Speicherkapazität übernimmt, muss ebenfalls eine hohe Sperrspannung aufweisen. In den Stromverbrauch des Konverters geht daher auch der Leckstrom der Diode ein. Rein theoretisch könnte man eine einfache 1N4007 als Diode nehmen, welche ebenfalls eine maximale Sperrspannung von 1000V besitzt, allerdings merkt man dann den höheren Leckstrom gegenüber der hier gewählten BYV26E, auch deswegen, weil sie länger braucht bis sie sperrt (Schaltzeit). Genauso muss die Speicherkapazität für die Hochspannung eine ausreichend hohe Spannungsfestigkeit besitzen (z.B. 1kV). Man sollte die Speicherkapazität nicht zu groß wählen, da sonst die gespeicherte Ladung eine gewisse Gefahr darstellt, wenn man die hochspannungsführenden Teile versehentlich berührt. 100nF sind für ein normales Zählrohr als Ladungsreservoir völlig ausreichend und beim Berühren noch ungefährlich.

Wenn die spätere Anwendung der Schaltung das Überwachen der Umweltradioaktivität ist, wo in der Regel keine hohen Zählraten entstehen, ist keine Regelung der Hochspannung nötig. Dennoch empfiehlt es sich, einen Spannungsteiler aus einem 100MΩ und beispielsweise einem 1MΩ als zusätzliche Last einzusetzen, da man dann die Hochspannung auch einfach überprüfen und einstellen können sollte. Würde man ein Multimeter direkt an die Hochspannung anschließen, würde der typische Eingangswiderstand von ca. 10MΩ die Kapazität so schnell entladen, dass kein korrekter Messwert mehr entstehen würde. Daher sollte ein Hochspannungsteiler mit einem Teilverhältnis von (wenigstens) 100:1 eingesetzt werden. So kann an dem 1MΩ dann ein 100-mal kleines Abbild der Hochspannung nachgemessen werden. Im Falle einer Regelschleife ist es dagegen erforderlich einen der Teiler-Widerstände an die Referenzspannung anzupassen, deswegen weicht dann das Teilerverhältnis von 100:1 ab und ist hier zu 100MΩ:180kΩ gewählt.

Wer sich Klarheit über die Funktion des Boost-Konverters verschaffen möchte, hat die Möglichkeit dies auf einfache Weise mit einer Analogsimulation zu tun. Die Schaltung verhält sich sehr nahe an der Idealität, das heißt man kann den Transistor für eine grobe Simulation durch einen idealen Schalter ersetzen und die Diode auch sehr idealisiert mit nur der Schwellspannung darstellen. Als Simulator

bietet sich das Freeware-Tool LTSpice an, dass man beim Hersteller Analog Devices (früher Linear Technology) herunterladen kann.

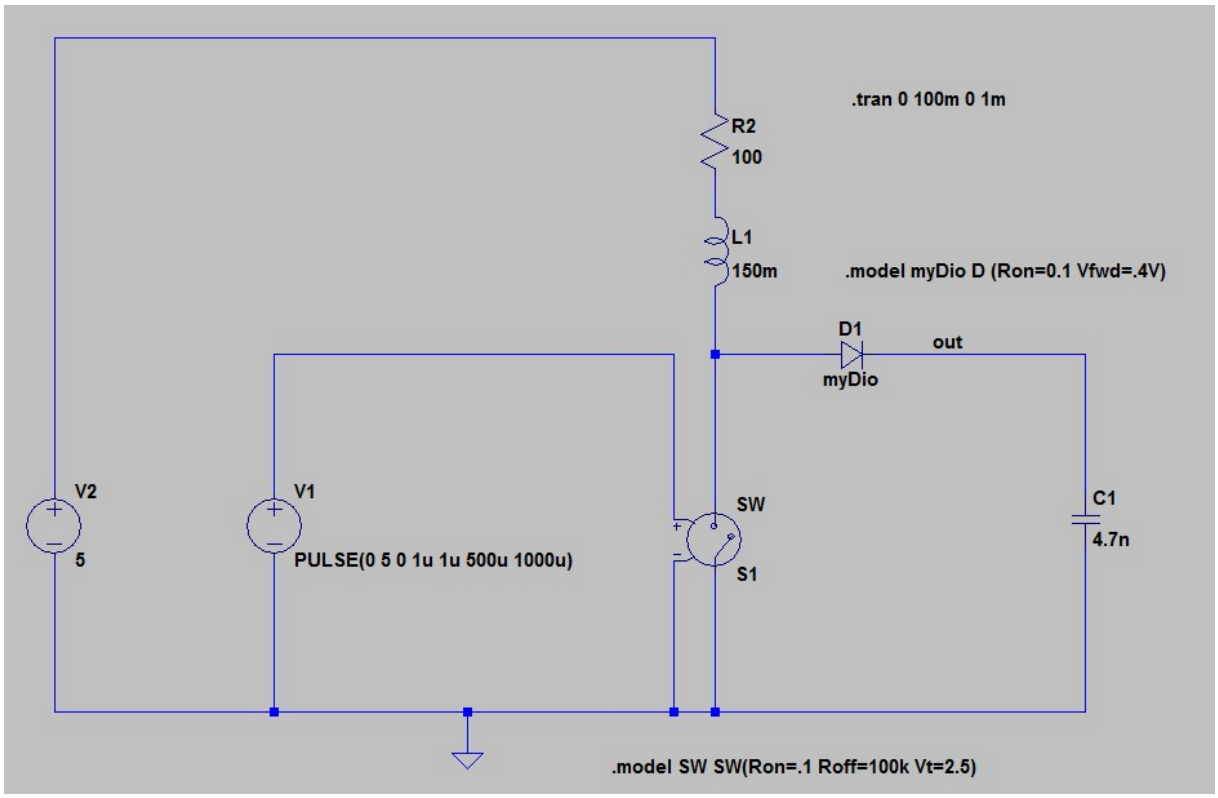


Abb. 2: Einfaches idealisiertes LTSpice Simulationsmodell für den Step-Up Konverter zur Hochspannungserzeugung

Um den Transistor ein- und auszuschalten, gibt es kaum günstigere und einfachere Alternativen zu dem Timer-Baustein 555. Allerdings sollte man aus Stromspargründen die CMOS Variante davon benutzen, die z.B. unter der Bezeichnung IMC 7555 erhältlich ist. Um mit dem Baustein einen einstellbaren Taktgenerator mit annähernd 50% Duty Cycle zu realisieren, gibt es mehrere Möglichkeiten. Hier wurde eine Variante aus dem Datenblatt gewählt, die mit relativ wenigen Bauteilen auskommt. Die zeitbestimmenden Bauteile wurden so gewählt, dass die Frequenz mit dem Poti um etwa 1kHz herum eingestellt werden kann. Wenn keine Regelschleife vorgesehen wird, kann über diese Frequenz die Hochspannung variiert werden, da die Zeit, für die der Transistor eingeschaltet wird, den Strom bestimmt, der in der Spule erreicht wird und damit auch der Energieinhalt, der beim Ausschalten als Induktionsspannung sichtbar wird. Man sollte, um den Schalttransistor nicht zu sehr zu beanspruchen die Hochspannung unter 600V halten, sonst wird die Schutzdiode (Zenerdiode) im MOSFET leitend und könnte auf Dauer zerstört werden.

Wird eine zusätzliche Regelschleife implementiert, dann wird der Reset-Eingang des Timer-Bausteins benutzt um die Takterzeugung so lange zu stoppen, bis die Spannung wieder unter einen bestimmten Wert abgesunken ist. Dann wird der Reset freigegeben und der MOSFET wird solange getaktet, bis die Spannung wieder über einem bestimmten Niveau liegt. Die Länge der Taktbursts hängen daher vom Stromverbrauch auf der Hochspannungsseite ab. Wenn die Zählrate hoch ist, dann ist auch der Taktburst länger, weil mehr Ladung durch häufigere Entladungsvorgänge im Zählrohr verbraucht wird.

Das derzeit gebräuchlichste Zählrohr in Hobbykreisen ist sicher das russische Zählrohr SBM-20. Es ist ein sehr universell einsetzbares Zählrohr, das für Gamma- und Betastrahlung empfindlich ist und etwa 300cpm pro µSv/h (U nat.) liefert. Es kann zwischen 350 und 475Volt betrieben werden und vom

Hersteller wird ein Anodenwiderstand von 5MΩ empfohlen. Es kann jedoch auch ein beliebiges anderes Zählrohr eingesetzt werden, das zwischen 300 und 500V arbeitet, dann muss aber eventuell der Anodenwiderstand entsprechend der Herstellerangaben geändert werden. Prinzipiell kann der Spannungsabfall für einen Zählpuls an der Kathode oder wie hier an der Anode abgenommen werden. Der Vorteil des anodenseitigen Abgriffs ist die Tatsache, dass die Kathode flächenmäßig gesehen groß sein kann und daher leichter Störungen einfängt als der innenliegende, geschirmte Anodendraht. Der Nachteil des anodenseitigen Abgriffs ist, dass nun ein Spannungsteiler mit einem Vorwiderstand (hier 330kΩ) aufgebaut werden muss, an dem der Zählimpuls über eine weitere kleine Hochspannungskapazität von 100pF gleichspannungsfrei abgegriffen wird. Aber gerade bei großen Zählrohren lohnt dieser Aufwand.

Um nun aus dem kleinen Spannungsabfall am Anodenvorwiderstand einen digitalen Zählimpuls zu generieren ist ein einfacher bipolarer npn-Transistor (BC549C) mit hoher Stromverstärkung ausreichend, der in Emitter-Schaltung betrieben wird. Die dabei entstehenden digitalen Zählpulse sind etwa 50-100µs lang und aktiv-high. Sie sind zum Beispiel gut geeignet um einen Interrupt-Eingang eines Mikrocontrollers anzusteuern. Die Sicherheit für den Controllereingang besteht darin, dass die Basis-Emitter Diode im Transistor die Spannung auf etwa 0.7 Volt begrenzt und der ausgansseitige Puls erst durch den Spannungsabfall des Kollektorstroms am 10kΩ entsteht und damit die Spannungsversorgung von 5V nicht überschreiten kann.

In vielen Fällen besteht auch der Wunsch, zur Funktionskontrolle ein akustisches Signal (das berühmte Knacken) zu generieren. Dies lässt sich aus dem digitalen Zählpuls leicht mit zwei Transistoren erreichen, die als Emitterfolger (Darlington) verschaltet sind. Diese Stufe wirkt dann als Impedanzwandler und ist in der Lage einen 8Ω Miniaturlautsprecher zu treiben.

Wenn die Anwendung des GM-Zählmoduls lediglich darin besteht, die relativ niedrige Umweltradioaktivität mit einem einfachen Zählrohr zu kontrollieren, ist der einfache Ansatz ohne Stabilisierung der Hochspannung sicher ausreichend. Wenn damit jedoch auch Proben vermessen sollen, die zu sehr hohen Zählraten führen, könnte der Strombedarf des Zählrohrs so ansteigen, dass die bei Nullrate eingestellte Hochspannung so sehr absinkt, dass sich die Empfindlichkeit des Zählrohrs verändert. Auch Temperatur- oder Feuchteeinflüsse könnten Ähnliches bewirken. Daher ist die etwas elegantere und sichere Art, die Hochspannung auf eine Nennspannung zu stabilisieren.

Dies kann damit erreicht werden, dass ein heruntergeteiltes Abbild der Hochspannung an einem Spannungsteiler abgegriffen und in einer Regelschleife gegen eine Spannungsreferenz verglichen wird. Ist die Spannung zu hoch, wird die Takterzeugung unterbrochen, ist sie zu niedrig wird sie wieder eingeschaltet. Diese Art der Regelung kann ebenfalls mit wenig Aufwand unter idealisierten Bedingungen (und auch mit etwas mehr Aufwand mit besseren Bauteilmodellen) mit dem Analogsimulator LTSpice simuliert werden. Dies ist für das bessere Verständnis an dieser Stelle besonders hilfreich und spart auch den einen oder anderen Prototypenaufbau ein.

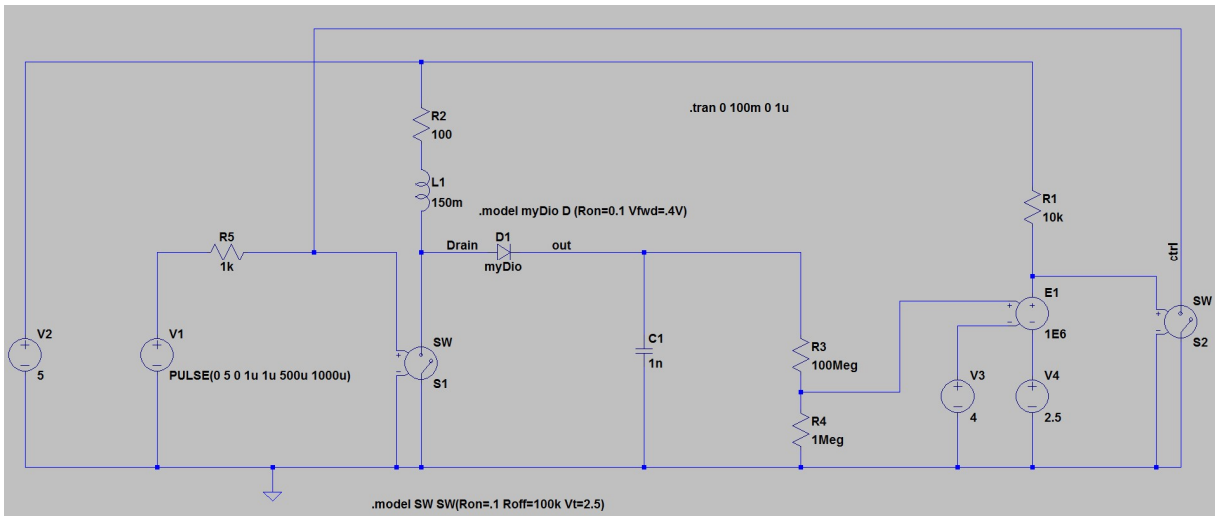


Abb. 3: Einfaches LTSpice Simulationsmodell der Hochspannungserzeugung mit Burstlängen-Regulierung

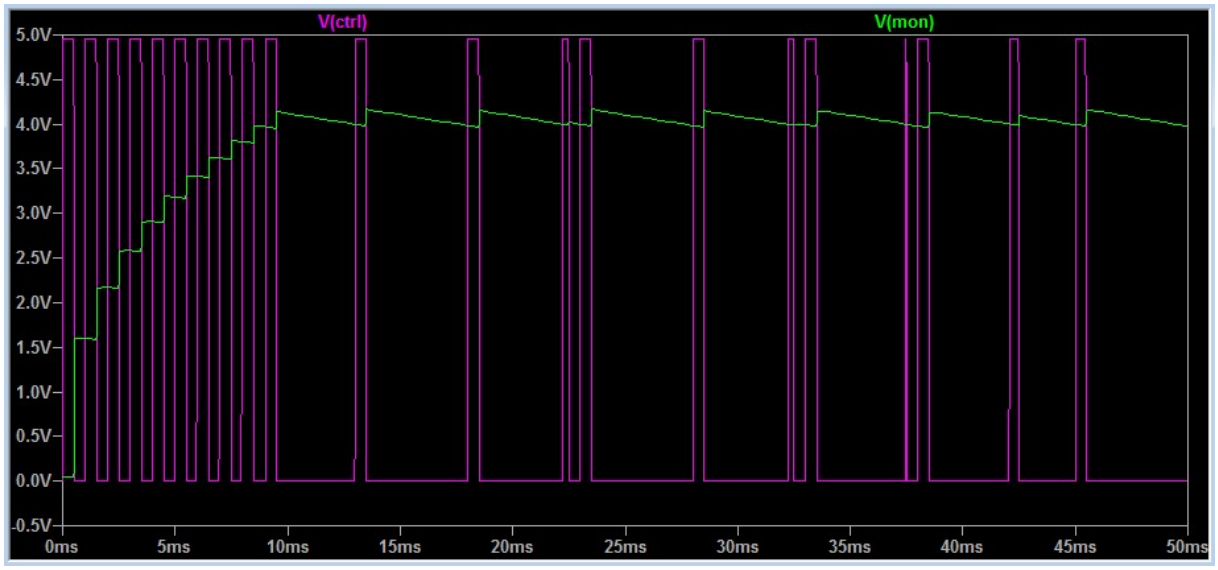


Abb. 4: Beispielhaftes Ergebnis der Simulation, es zeigt das Abbild der Hochspannung am Spannungsteiler (grün) und das Steuersignal für die Takterzeugung (magenta)

In der Praxis lässt sich dieses Regelungsprinzip mit einem Komparator mit eingebauter Referenzspannungsquelle erreichen. Der hier verwendete, extrem stromsparende Komparator LT1442 enthält eine sehr genaue Referenzspannungsquelle von 1.182V. Der Komparator hat zusätzlich eine einstellbare Hysterese, was wegen der überlagerten Störsignale unbedingt notwendig ist. Ohne Hysterese wäre der Komparator zwar sehr exakt und läge maximal nahe an der Zielspannung, würde aber wegen der überlagerten Störungen mit sehr hoher Rate schalten. Die Hysterese verhindert genau das. Die Größe dieser Hysterese kann über einen einfachen Spannungsteiler eingestellt werden und bestimmt letzten Endes, wie stark die Hochspannung um ihren Sollwert pendeln darf. Das reduziert die Rate mit der der Taktgenerator ein und ausgeschaltet wird erheblich. Das Ausgangssignal des Komparators wird schließlich direkt auf den Reset-Eingang des Timer-Bausteins geführt, der mit einem 10kΩ Pullup versehen ist.

Man stellt nun die Regelung im Betrieb bei Nullrate mit dem Poti so ein, dass das Steuersignal am Takteingang etwa 50% oder weniger an Tastverhältnis aufweist. Das garantiert, dass das geregelte System genug Reserve hat um durch Erhöhen des Tastverhältnisses (Verlängern des Pulsbursts) einen

höheren Laststrom ausregeln kann. Am Oszilloskop sehen die Signale bei Nullrate eines SBM-20 Zählrohrs wie in Abb. 5 gezeigt aus. Die Hochspannung wurde dabei mit einem zusätzlichen Hochspannungsteiler mit 100MΩ zu 1MΩ mit AC-Kopplung gemessen und belastet. Daher entspricht die gemessene Spannung einem 100-stel des Wechselspannungsanteils in der Hochspannung. Man kann damit erkennen, dass der Ripple zwischen Ein- und Ausschalten der Taktbursts etwa 200mV am Spannungsteiler, also 20V in Realität beträgt. Man kann auch erkennen, dass die Kapazität den Diodenstrom nicht völlig glättet, sondern dass der Hochspannung immer noch Spikes überlagert sind. Dabei muss aber beachtet werden, dass hier auch viel in den Tastkopf des Oszilloskops (Ground-Anschlußkabel) eingestreut werden kann, da das Magnetfeld der Spule magnetische Störungen und der Transistor und die Diode kapazitive Störungen in erheblicher Dimension abstrahlen. Wer jedoch eine sehr reine Hochspannung haben möchte, dem sei empfohlen, den bestehenden Hochspannungskondensator noch mit einem RC-Glied als Tiefpass, bestehend aus einem 1MΩ und einem weiteren 100nF/1kV Kondensator zu erweitern.

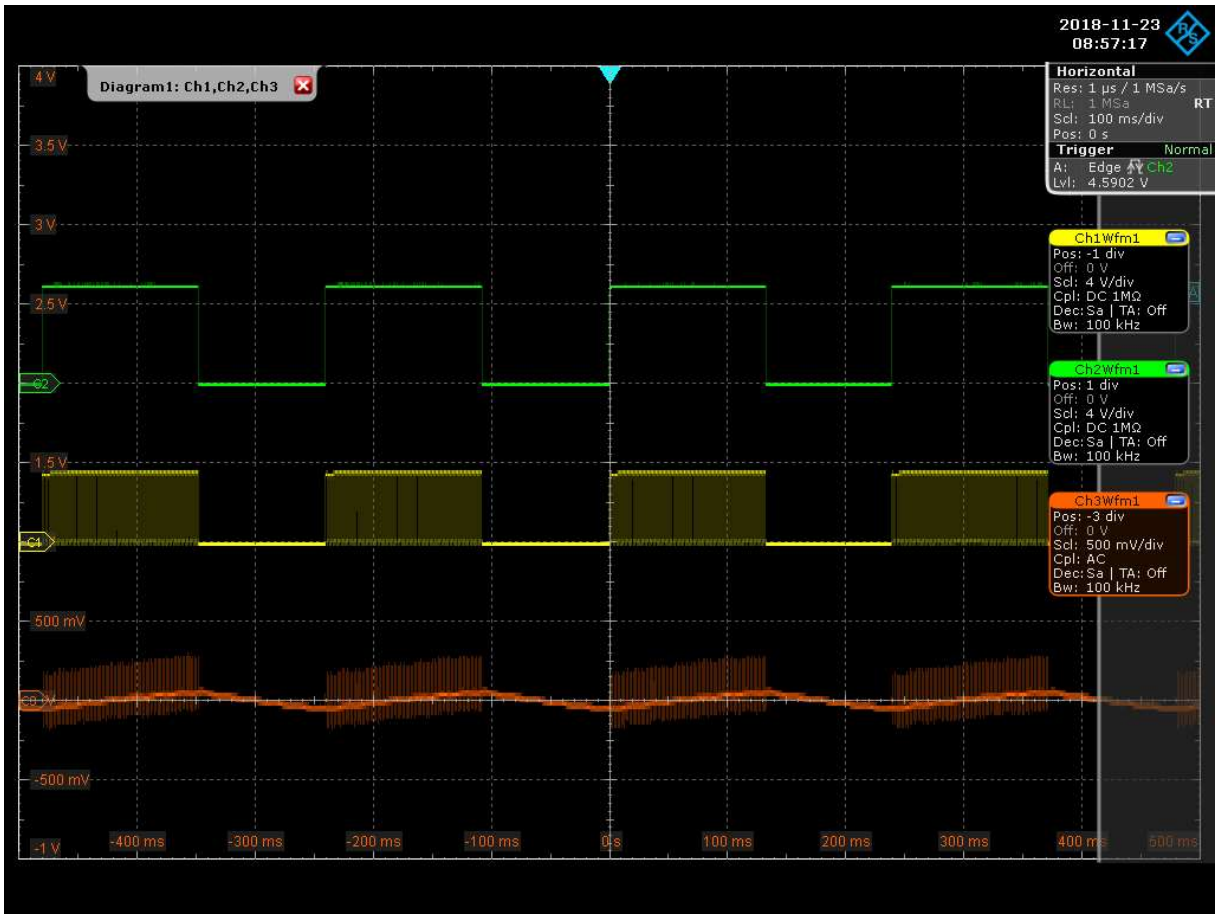


Abb. 5 : Signale am IsiGeiger GM-Zählmodul: Steuersignal für den Taktgenerator (grün), Taktgenerator Ausgang (gelb), Wechselspannungsanteil der Hochspannung mit Spannungsteiler gemessen (orange)

Schaltet man die AC Kopplung am Scope aus und misst die Hochspannung mit dem 100:1 Teiler nach, ergeben sich ca. 4.4V also 440V in Realität was durch den 180kΩ Widerstand am Teiler für den Komparator bestimmt ist (Abb. 6).

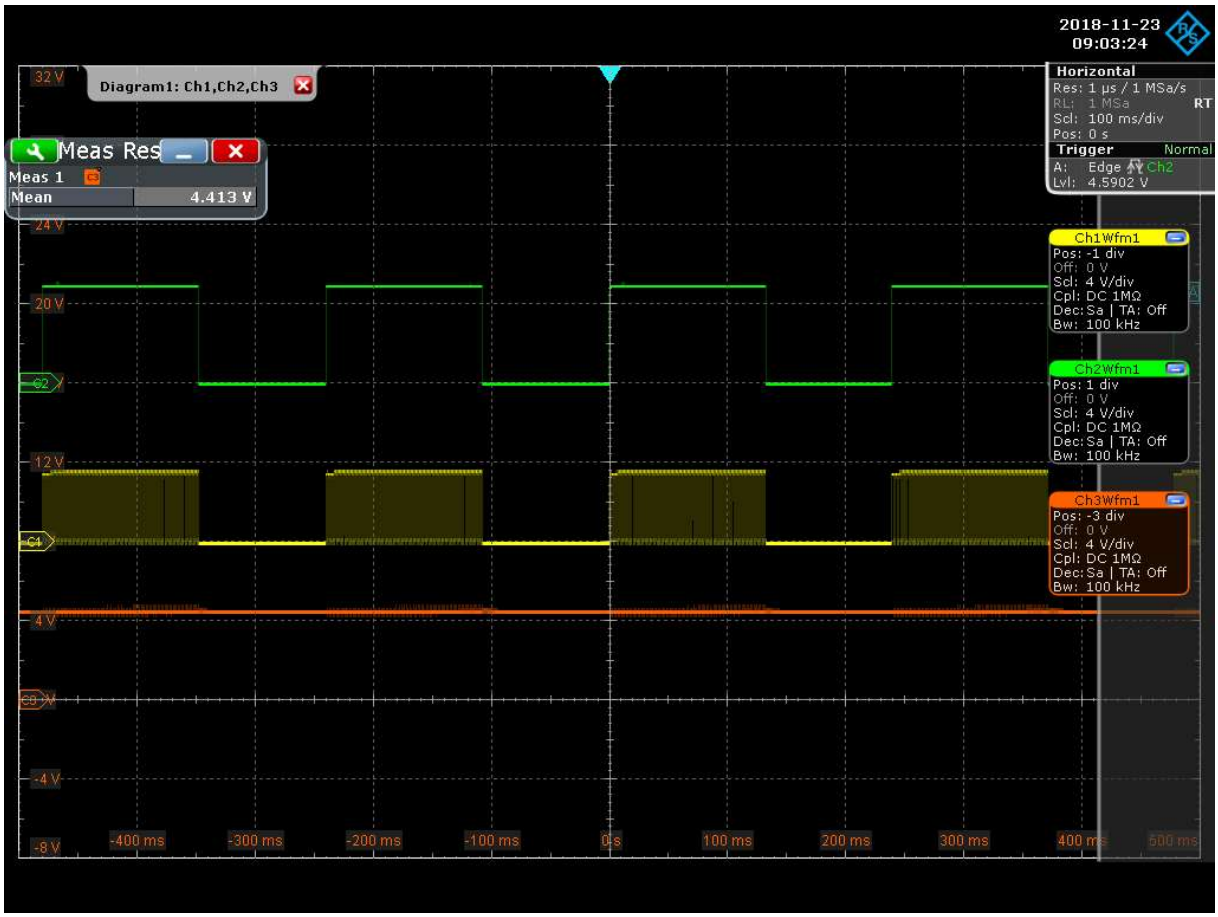


Abb. 6: Messung des DC-Mittelwerts mit einem 100:1 Hochspannungsteiler (orange)

Hier kann man jetzt im Hochspannungssignal keine Stöhrungen mehr erkennen, da nunn der Messbereich 4V/div beträgt.

Ohne die Last des zusätzlichen 100:1 Hochspannungsteilers (ca. 4µA Laststrom bei 400V) nimmt dann das Burst-Tastverhältnis ab, daran kann man die Wirksamkeit der Regelung deutlich erkennen (Abb. 7a und 7b). Misst man gleichzeitig den Stromverbrauch, dann stellt man fest, dass dieser von etwa 5mA auf etwa 3mA absinkt, wenn die 4µA Laststrom des Hochspannungsmessteilers weggenommen werden. Damit ergeben sich 2mA Differenz bei 5V in der Stromaufnahme auf der Primärseite gegen 4µA bei 440V auf der Sekundärseite, was also einer Leistungseffizienz von (4E-6*440) /(2E-3*5) = 0.18 (18%) entspricht, was doch recht brauchbar ist. Die Verluste entstehen dabei vor allem in der Spule, einmal durch das Streufeld (eine geschirmte Spule ist immer besser als eine ungeschirmte) und durch den bei kleiner Bauform doch meist recht hohen Wicklungswiderstand von etwa 200Ω, und zum anderen durch den On-Widerstand des Transistors (45 Ω) sowie durch die Verluste in der Diode.

Abb. 7a: Messung des Tastverhältnisses mit 100MΩ zusätzlicher Last

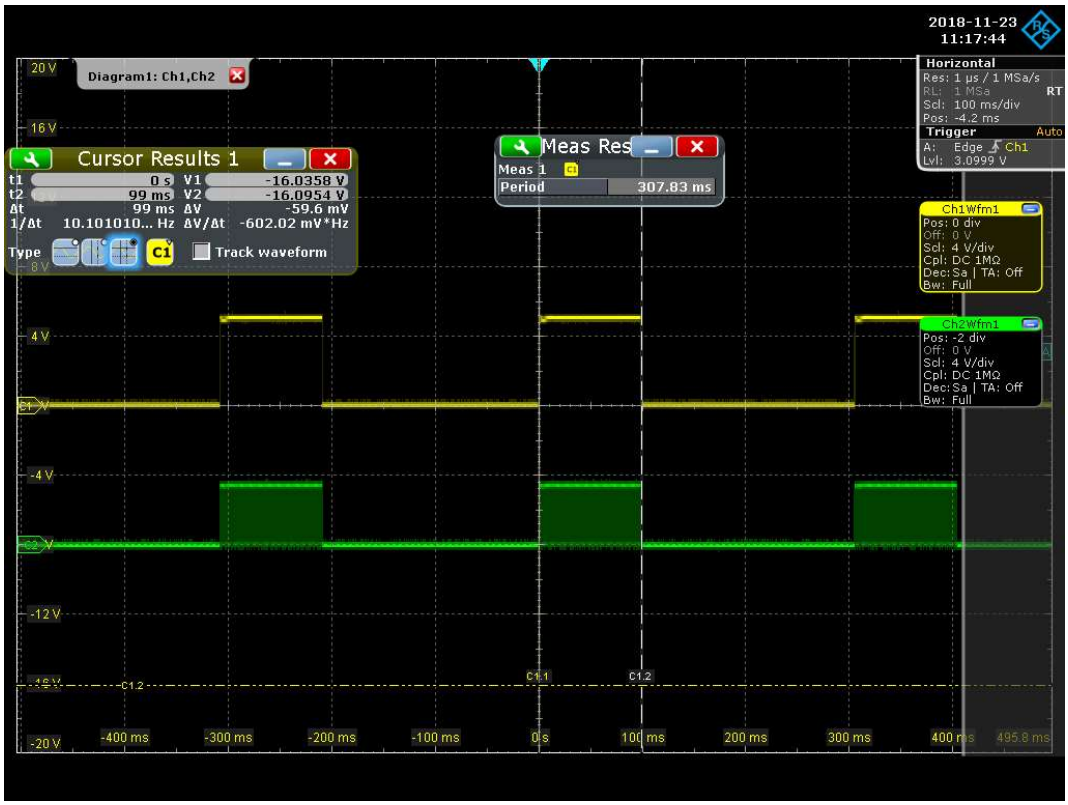


Abb. 7b: Messung des Tastverhältnisses ohne zusätzliche Last

Abb. 8 zeigt nun den Aufbau eines Prototyps des IsiGeiger GM-Moduls auf einer Lochraster-Platine in Verbindung mit einer Arduino-kompatiblen Mikrocontroller Platine, welche zusätzlich mit einem LoRa WAN Funkmodul für das „The Things Network ausgestattet ist („The Things Uno“). Mit dem LoRaWAN

Funknetzwerk können so die Zählraten drahtlos über längere Strecken (bis 30km) als mit dem herkömmlichen WLAN-Router ins Internet übertragen werden, was besonders für die Überwachung der Umweltradioaktivität sehr hilfreich ist.

Der Aufbau eines LoRaWAN Netzknotens für die Umweltradioaktivitäts-Messung ist in /1/ detailliert beschrieben. In dem Dokument wurde jedoch das kommerzielle Geiger-Modul SBM-20 Driver von 4N-Galaxy eingesetzt, das leider derzeit nicht lieferbar ist. Dies war auch der Anstoß für die Entwicklung des IsiGeiger GM-Moduls, das in kompatibler Weise genauso eingesetzt werden kann, wie das SBM-20 Driver Modul. Bei der Anwendung in einem Funk-Messnetz werden die Zählpulse von dem Mikrocontroller auf dem „The Things Uno“ Board über eine Interrupt-Handler-Routine gezählt, die Zählrate berechnet, diese über das LoRaWAN Funkmodul zu einem Gateway des kostenfreien IoT-Netzwerks „The Things Network“ übertragen und dann von dort ins Internet weitergereicht. Die Daten können im Internet z.B. von der IoT Visualisierungs-Plattform „Cayenne“ (myDevices.com) grafisch aufbereitet werden und sind so schließlich im Browserfenster des PC oder in der Cayenne-App auf dem Smartphone darstellbar.

Abb. 9 zeigt ein solches Beispiel für die Visualisierung der Daten. Die Messung zeigt den Verlauf eines Tages, wobei jedoch in der Nacht eine Tüte mit 250g Triple-Superphosphat-Düngemittel der Firma ICL-Fertilizers neben dem Zählrohr platziert wurde. Dieses Düngemittel ist deutlich uranhaltig (und schädigt das Grundwasser entsprechend, einen Grenzwert für Uran in Düngemitteln gibt es jedoch nicht).

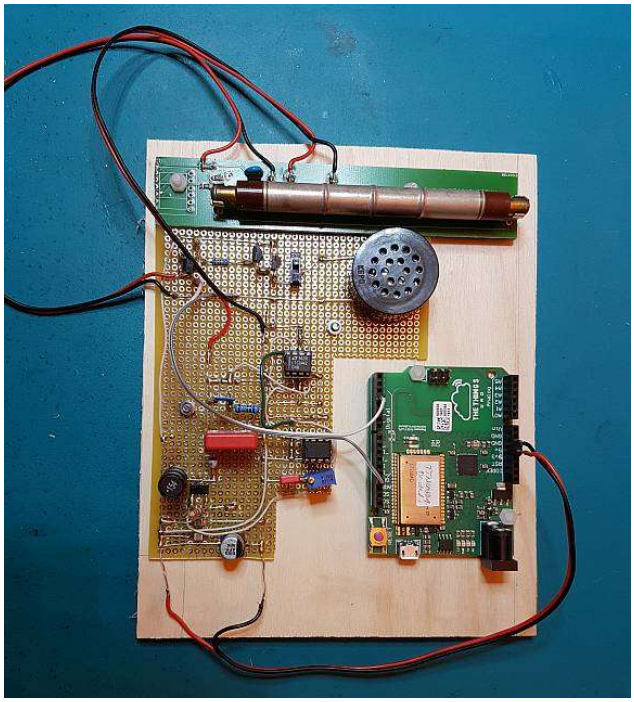
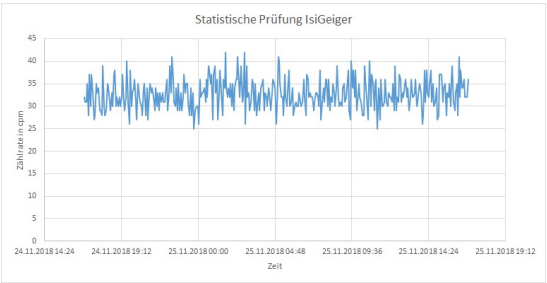


Abb. 8: Aufbau des IsiGeiger-Moduls auf einer Lochraster-Platine mit Kopplung an einen Mikrocontroller mit LoRaWAN Funkmodul und Aufstellung als Messknoten im TTN zur Überwachung der Umweltradioaktivität

Abb. 9: Aufbereitung der Messdaten mit Cayenne im Internet und Anzeige mit der CayenneApp auf dem Smartphone

In Abb. 9 kann man die Wirkung des schwach radioaktiven Düngemittels deutlich an der Erhöhung der Zählrate von 30 auf 50cpm erkennen.

Zeichnet man lediglich die Nullrate des IsiGeiger auf und verwendet dabei eine Pulsvorgabe von 100 Pulsen, für die man die benötigte Zeit misst um die Zählrate zu bestimmen, dann kann man damit noch eine wichtige Prüfung zur korrekten Zählstatistik machen. Da der radioaktive Zerfall einer Poisson-Statistik folgt, muss die Streuung der Zählrate gemessen mit N Pulsen gleich dem Mittelwert der Zählrate, dividiert durch Wurzel(N) entsprechen, also $\sigma = \mu/\sqrt{N}$. Damit kann man sicherstellen, dass keine deterministischen Störpulse (Netzbrumm, Mobilfunk etc.) gemessen werden, sondern wirklich zufällige Pulse die den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls folgen. Abb. 10 zeigt eine solche Prüfung, welche durch eine Aufzeichnung mit Cayenne und anschließendem Export nach Excel gewonnen wurde. Das Signal zeigt die Nullrate bestimmt aus konstant 100 Pulsen mit einem Mittelwert von 32.7 cpm (Ortsdosisleistung von ca. 0.1µSv/h) und einer Streuung von 3.38 cpm. Es erfüllt damit die statistische Prüfung erstaunlich gut.



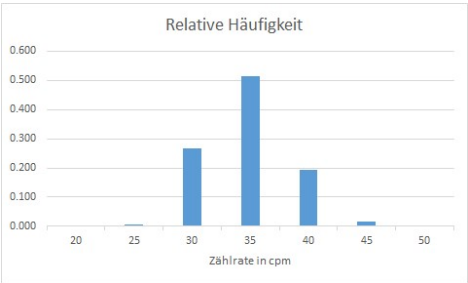


Abb. 10a, b: Statistische Prüfung der Zufälligkeit der Zählpulse

Anhang: Schaltpläne für das IsiGeiger GM-Modul

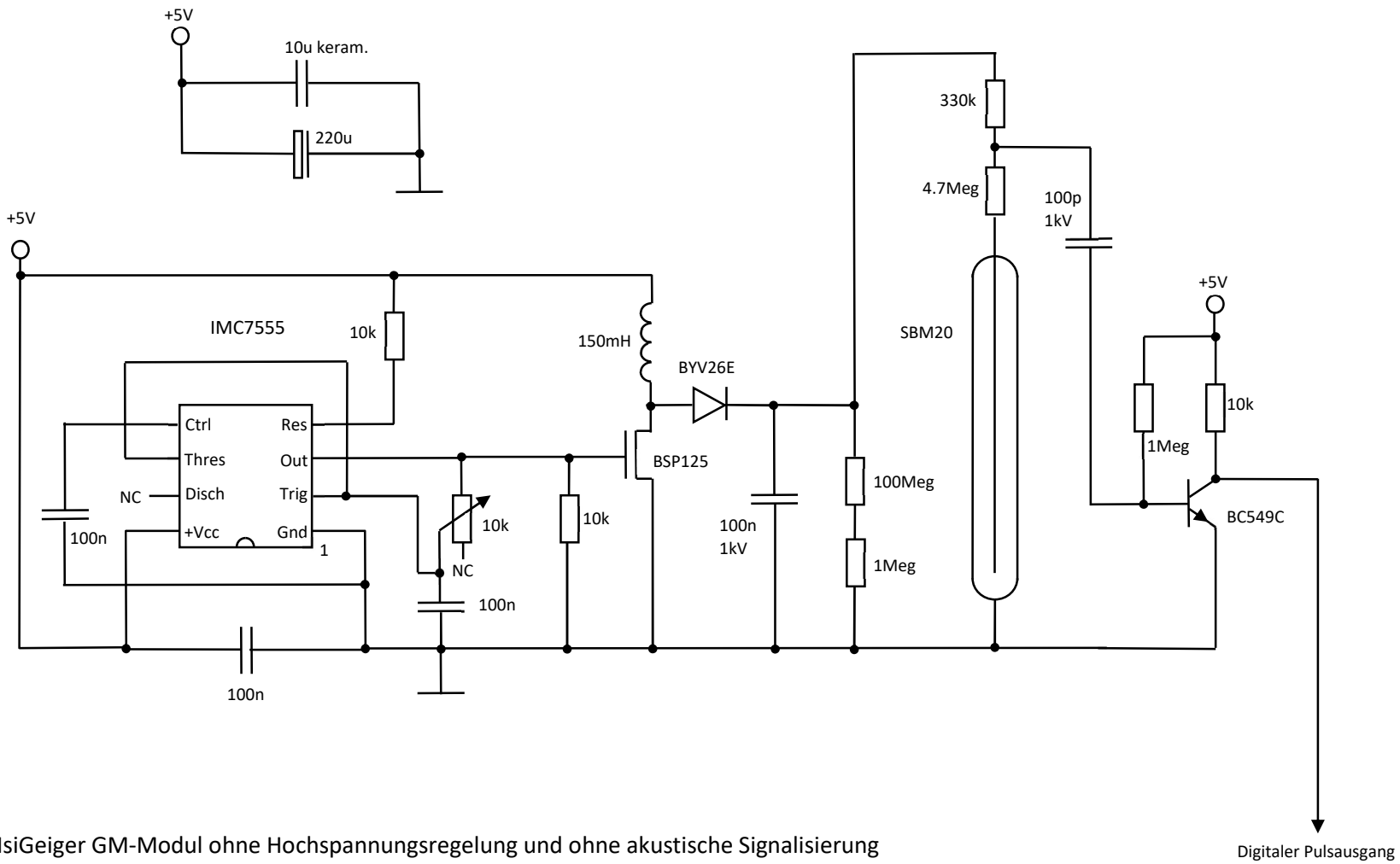


Abb. 11: IsiGeiger GM-Modul ohne Hochspannungsregelung und ohne akustische Signalisierung

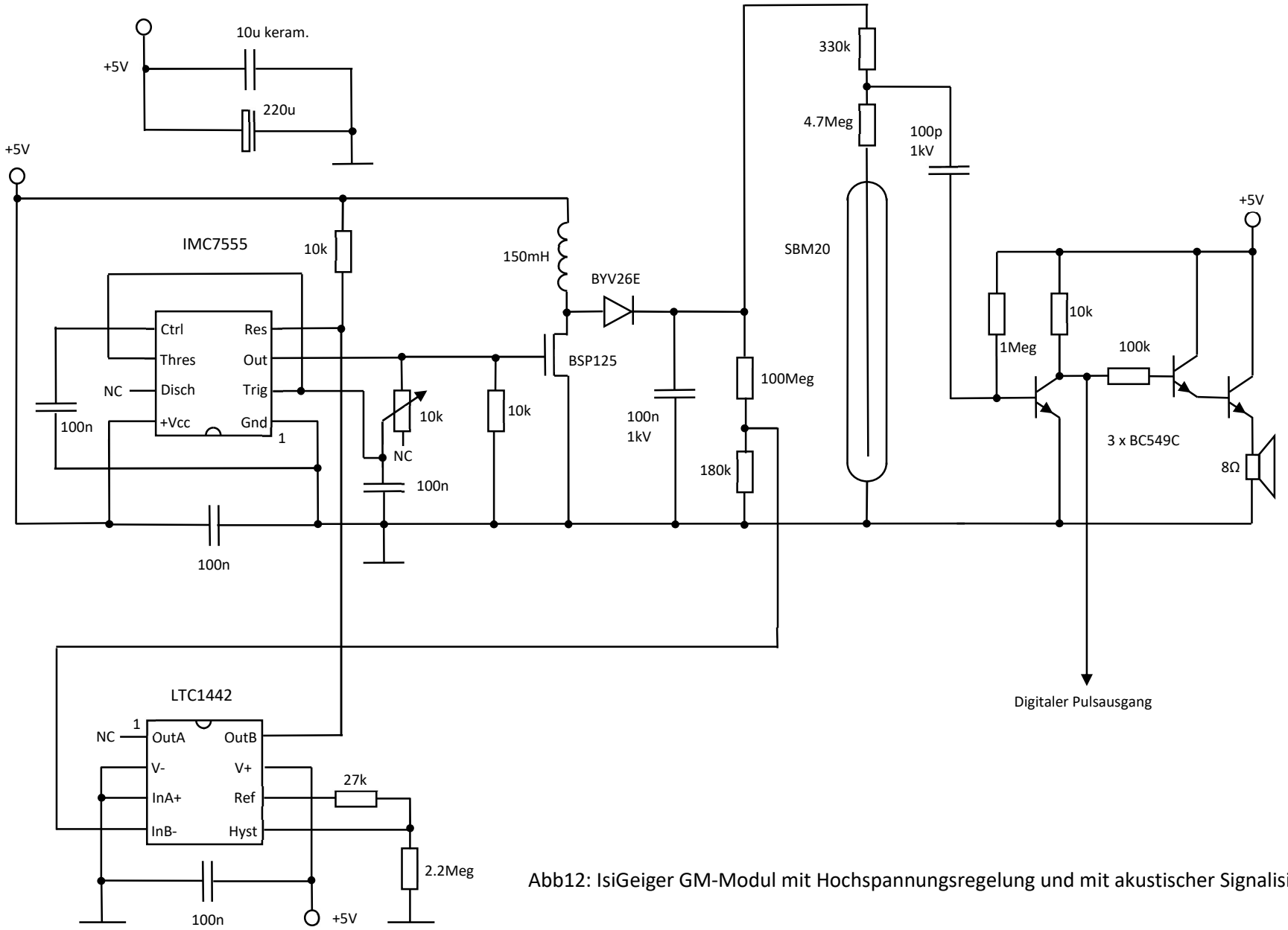


Abb12: IsiGeiger GM-Modul mit Hochspannungsregelung und mit akustischer Signalisierung

Literatur

/1/ Ein Umweltradioaktivitäts-Messknoten für das LoRaWAN IOT - Netzwerk „The Things Network“
http://www.opengeiger.de/LoRaGeigerTTN.pdf

/2/ Ultra Low-Power Hochspannungsquelle für Geigerzähler

http://www.opengeiger.de/ULowPowerHV.pdf

/3/ Prof. Dr.-Ing. Heinz Schmidt-Walter - Schaltnetzteile

http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_deu/sntdeu3.pdf

/4/ The Things Network

https://www.thethingsnetwork.org/

/5/ Gerhard Peter: The Things Network (TTN) - Ein globales LoRaWAN Funknetz

https://indico.fhi-berlin.mpg.de/event/37/contributions/364/attachments/39/117/TTN_Beuth_21.11.2018.pdf

/6/ Radon-Exhalationsmessungen an Düngemitteln

http://www.opengeiger.de/RadonDuenger/RadonDuenger.html

/7/ Nachweis von Uran in Düngemitteln mit dem Stuttgarter Geigerle

http://www.opengeiger.de/UranNachweisDuengerGeigerle.pdf