

PIN-Dioden-Zähler

Bernd Laquai 4.9.2012

Die BPW34 PIN-Diode

Die wohl legendärste PIN-Diode, die auch als Strahlungsdetektor benutzt wird ist die BPW34. Sie wird von verschiedenen Halbleiterherstellern in verschiedenen Varianten hergestellt und ist ursprünglich für den sichtbaren Wellenlängen-Bereich konzipiert worden. Da diese Diode lichtempfindlich ist, muss ein auf dieser Diode basierender Zähler auch immer sehr gut lichtdicht gemacht werden. Eine BPW34 kostet in der Regel weniger als 1 Euro.



Abb. 1: BPW34 Photodiode von Vishay

Die BPW34 hat im Sperrbereich einen Dunkelstrom von typischerweise weniger als 2nA bei 10V. Das ist wichtig wenn man Stromimpulse in der Größenordnung von einigen nA nachweisen will. Man kann an die Diode gut bis ca. 30V Sperrspannung anlegen, ohne dass sie durchbricht, wobei wir hier wegen einer günstigen Stromversorgung eher im Bereich 8-12V arbeiten wollen. Die Kapazität der Diode ist auch eine wichtige Größe. Sie bestimmt wie kurz die Impulse sein können, dass man sie noch erkennen kann. Eine Kapazität muss man ja erst einmal aufladen, bevor man eine Spannungsänderung messen kann und das dauert Zeit. Die Strahlungsquanten erzeugen aber Ladungsträger nur für Nanosekunden so dass die Kapazität sehr klein sein muss, wenn man eine nennenswerte Spannungsänderung erreichen will. Umgekehrt wird die Kapazität aber groß, wenn man die Fläche der Diode groß macht um die Empfindlichkeit zu steigern. D.h. hier muss man einen guten Kompromiss finden, wenn man einzelne Strahlungsquanten detektieren will. Die BPW34 der meisten Hersteller liegt bei etwa 10-50pF je nach angelegter Sperrspannung und erzeugt damit Stromimpulse von einigen Mikrosekunden Dauer. Die aktive Fläche beträgt 7.5mm^2 , die somit auch viel kleiner ist als bei einem Geiger-Müller Zählrohr. Daher kann auch bei beliebig guter Verstärkung mit einer Diode allein nur eine deutlich geringere Zählrate erreicht werden.

Gelegentlich findet man die BPW34 auch mit Infrarotfilter, der einen großen Teil des für das Auge sichtbaren Lichts herausfiltert, was natürlich helfen kann. Die infrarote Strahlung kommt dann aber immer noch durch und muss daher abgeschirmt werden, wenn man nur für radioaktive Strahlung empfindlich sein will. Eine ähnliche PIN-Diode ist die TEMD5100.

Bisher publizierte PIN-Dioden Zähler

Die Herausforderung beim PIN-Dioden Zähler ist die immense Verstärkung, die man benötigt um aus einem eintreffenden Strahlungsquantum, das einen 50usec Stromimpuls von etwa 10nA Stärke in der PIN-Diode zur Folge hat, einen hörbaren Knack im Lautsprecher zu erzeugen. Eine Solarzelle, die aus Sonnenstrahlung einige hundert mA erzeugt, ist da doch bedeutend einfacher zu handhaben.

Im Internet und in einschlägigen Elektronik Bastler-Zeitschriften findet man dazu auch etliche Schaltungsvorschläge. Nach dem Atomunfall in Tschernobyl 1986 hat die Zeitschrift Funkschau bereits PIN-Dioden Zähler veröffentlicht (Heft 21, 1986). Allerdings war es damals noch eine relative umfangreiche Schaltung mit etlichen Einzeltransistoren, da hochintegrierte Schaltungen noch nicht in dem Umfang wie heute zur Verfügung standen.

Burkhard Kainka betreibt eine Webseite unter dem Namen elektronik-labor.de wo sich noch etliche weitere Schaltungsvorschläge finden und auch Versuche dazu beschrieben sind.

Nach dem Atomunfall in Fukushima 2011 hat dann Burkhard Kainka in der Zeitschrift Elektor zwei PIN-Dioden Zähler vorgestellt, wobei der erste Vorschlag noch diskrete Einzeltransistoren im Messverstärker benutzt, während der zweite bereits einen Operationsverstärker einsetzt. Allerdings ist dabei immer noch ein Junction-Feldeffekttransistor im Spiel, der die nötige Impedanzwandlung vornimmt. Die Artikel in englischer Sprache auf der Internetseite des Distributors Farnell (Element-14) abrufbar:

<http://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/41953-102-1-229709/Elektor%20Radiation%20Meter.pdf>

Auf internationalen Seiten findet sich natürlich noch viel mehr. Allerdings sind professionelle Schaltungsvorschläge zu Detektoren für Radioaktivität unter Verwendung moderner integrierter Schaltungen eher schwer zu finden. Ein Beispiel dafür ist aber eine Application Note des Halbleiterherstellers Maxim:

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2236.pdf>

Was man sich für die erfolgreiche Literatursuche klarmachen kann, ist die Tatsache, dass es hauptsächlich darum geht, sehr, sehr kleine Strahlungsdosen zu detektieren. Die Energie der einzelnen Strahlungsquanten ist bei radioaktiver Strahlung dagegen deutlich höher,

als bei anderen Strahlungsarten wie z.B. bei Licht. Da jedoch nur eine materialspezifische Mindestenergie überschritten sein muss, damit ein bestimmter Halbleiter-Detektor nach dem photovoltaischen Prinzip richtig arbeitet, kann man sich zumindest bei der alles-durchdringenden Gammastrahlung auf Anwendungen von Photodetektoren im sichtbaren und infraroten Bereich des Lichts konzentrieren, für die es viel zahlreichere Vorschläge gibt. Dort finden sich dann auch jede Menge professionelle Schaltungsbeispiele, vor allem in den Application Notes der Halbleiterhersteller und in Büchern zur optischen Datenübertragung.

Die Grundanforderung an die Elektronik beim PIN-Dioden Zähler

Die Aufgabe beim PIN-Dioden Zähler ist, aus dem kurzen (50us) und schwachen Stromimpuls (einige 10nA) an der Diode, welcher durch das Eintreffen eines Strahlungsquantums ausgelöst wird (unabhängig von der Strahlungsart) einen hörbaren Knacks im Lautsprecher zu erzeugen (ca. 1ms und einige mA). Das heißt der Impuls muss um den Stromverstärkungsfaktor von etwa 100000 (100dB) verstärkt werden und zusätzlich um den Faktor 20 zeitlich gestreckt werden.

Während das zeitliche Strecken des Impulses kein größeres Problem darstellt, ist die hohe Verstärkung schon eher ein Problem. Das liegt aber weniger daran, dass man solche Verstärkungen nicht hinbekommen kann, sondern viel mehr daran, dass erstens nicht nur das Signal verstärkt wird sondern auch das Rauschen und Störungen und dass zweitens ein Teil des verstärkten Signals über Umwege wieder an den Eingang gelangen kann, was wiederum dazu führen kann, dass sich eine Schwingung aufschaukelt, die jeden normalen Betrieb unmöglich macht.

Grundstruktur eines PIN-Dioden-Zählers

Ein PIN-Dioden Zähler besteht typischerweise aus der PIN-Diode als Detektor, einem Messverstärker, einem Komparator und einem Impulsverlängerer. Zur akustischen Signalisierung dient entweder ein Kopfhörer oder ein Lautsprechertreiber mit Lautsprecher. Zur optischen Signalisierung dient eine LED, ggf. mit einem Toggle Flip-Flop.

OP's versus diskreten Transistoren

Viele etwas ältere Schaltungsvorschläge verwenden diskrete (Einzel-) Transistoren im Messverstärker. Die Messergebnisse zeigen auch, dass diese Schaltungen gut funktionieren.

Modernere Messverstärker-Schaltungen setzen integrierte Schaltungen ein, wobei man heute eher von hochintegrierten Schaltungen reden müsste, die sehr viele Transistoren auf kleinstem Raum eines IC's enthalten. Integrierte Schaltungen, die eine hohe Verstärkungsfunktion haben und Spannungsdifferenzen verstärken, werden üblicherweise als Operationsverstärker (OP) bezeichnet. Das einfachste ideale Modell eines OP ist eine gesteuerte Spannungsquelle mit nahezu unendlicher

Verstärkung. Ein etwas realeres Modell ist die gesteuerte Spannungsquelle mit hoher Verstärkung bis zu einer gewissen Frequenzgrenze.

Es ist richtig, dass viele professionelle Entwickler heute nur um die Entwicklungszeit abzukürzen schnell auf fertige ICs zurückgreifen, da sich diese meist mit einfachen Modellen beschreiben lassen und man sich nicht die Mühe machen muss zu prüfen, ob nicht eine Lösung mit wenigen diskreten Transistoren auch möglich wäre oder sogar Vorteile hätte (z.B. geringere Kosten). Allerdings ist es im Falle des Geigerzähler-Messverstärkers heute eher so, dass selbst mit viel Entwicklungsaufwand die diskrete Lösung in aller Regel die hochintegrierte nicht mehr schlagen kann, in keinsten Weise, auch im Preis nicht mehr. Das liegt vor allem an der Größe der Schaltung. Die Empfindlichkeit gegen Störungen und die Funktionsgüte hängt vor allem an der Länge der Leitungen und den parasitären Effekten, die an den diskreten Bauteilen nicht zu vermeiden sind. Die Schaltung möglichst klein zu bauen ist in jedem Fall erstrebenswert und bringt erhebliche Vorteile.

Heutige Operationsverstärker erfordern so wenig Beschaltung und haben sehr kleine Gehäuse, so dass man vor allem die Größe kaum mit einer diskreten Lösung überbieten kann. Hochintegrierte ICs in kleinen Gehäusen bedeuten wenig Bauteile und kurze Leitungen sowie wenig Netzknoten mit geringer Kapazität. Und die Platine ist bei den wenigen Komponenten schnell gemacht. Dazu kommt, dass sich die modernen OP's auch nahezu ideal verhalten: Eingangsströme unter 1pA eine Leerlaufverstärkung von mehreren Hunderttausend und Bandbreiten bis in die Gigahertz und das für unter 5 Euro. Dazu erreicht man leicht einen Stromverbrauch unter 10mA.

Das größte Problem mit OP's ist aber den Richtigen zu finden, da es diese Bauteile wie Sand am Meer gibt und man mit der Fülle an Parametern im Datenblatt kaum noch klar kommt. Deswegen besteht eine Haupt-Leistung eines Designers darin, die Datenblätter zu verstehen und den richtigen OP auszuwählen.

Das Signal-zu-Rausch Verhältnis

In der Elektronik ist es unvermeidlich, dass sowohl Widerstände als auch Halbleiterübergänge ein Rauschsignal erzeugen. Man muss also mit dem Rauschen leben lernen. Wichtig ist nur, dass sich das gewünschte Signal deutlich aus dem Rauschen heraushebt, so dass man es erkennen und auswerten kann. Um den Knackimpuls im Lautsprecher zu erzeugen, wird typischerweise ein Spannungskomparator eingesetzt, der das Verstärker-Ausgangssignal gegen einen Schwellwert vergleicht. Nur wenn die Differenz deutlich größer ist als Null, wird ein Knackimpuls für eine gewisse Dauer erzeugt.

Nun treffen die Strahlungsquanten im Normalfall in unterschiedlichen Winkeln auf den Detektor auf und verlieren dabei unterschiedlich viel

Energie, so dass unterschiedlich starke Impulse sichtbar werden ohne dass bestimmte Impulshöhen (Energien) sich häufen (im Gegensatz zu einem guten Spektrometer). Was die Häufigkeitsverteilung anbelangt, kann man sagen, dass die Impulshöhen negativ exponentiell verteilt sind, d.h. es gibt viele schwache Impulse und wenig starke Impulse. Um daher möglichst viele Impulse zählen zu können, sollte der Schwellwert möglichst klein gemacht werden. Dieses Ziel wird aber durch das Rauschen verhindert, das auch ohne Signal am Komparatoreingang anliegt. Theoretisch ist das Rauschen normalverteilt und kann zu einem Zeitpunkt beliebig groß werden. In der Praxis handelt es sich aber eher um eine abgeschnittene Normalverteilung, die wie beim gleichzeitigen Würfeln mit 10 Würfeln eine Ober- und eine Untergrenze (10 und 60 bei der Summe der Würfelaugen) hat. Daher kann man die Komparatorschwelle höchstens bis kurz vor die Grenze des Rauschens schieben, um maximal viele Impulse zu zählen.

Eine wichtige Maßzahl für den Verstärker ist daher das Verhältnis der Stärke des Rauschens (RMS-Wert) zur Stärke der mittleren Signalstärke. Diese Verhältniszahl ist durch die Schaltungstechnik und die Bauteileauswahl in gewissen Grenzen optimierbar und heißt Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR).

Die Bandbreite

Man kann jedes Signal mit Hilfe von periodischen Schwingungen unterschiedlicher Amplitude, Phase und Frequenz darstellen (Fourierspektrum). Analysiert man das Rauschen hinsichtlich der darin enthaltenen Frequenzen, erkennt man, dass thermisches Rauschen sowie das Rauschen an Halbleiterübergängen Energie bei allen Frequenzen aufweist. Die Rauschleistung ist dabei sogar über einen weiten Frequenz-Bereich fast konstant verteilt, lediglich bei den Halbleitern nimmt das Rauschen bei ganz niedrigen Frequenzen unter 100Hz ($1/f$ -Noise) noch etwas zu, was aber bei den kurzen Impulsen nicht verstärkt werden muss. Das heißt aber, je breitbandiger man den Messverstärker auslegt, umso höher wird die Rauschleistung, die man einsammelt und umso stärker wird das Rauschsignal im Zeitbereich im Vergleich zum Nutzsignal.

Das Nutzsignal am Verstärkereingang dagegen besteht aus kurzen Impulsen von etwa 50ns Dauer. Das bedeutet, dass die Leistung der Impulse im Frequenzbereich unterhalb ca. 20kHz liegt. Da die Impulse aber nur sehr sporadisch auftreten, braucht ein Gleichanteil im Signal nicht verstärkt werden. Man kann also den niederfrequenten Anteil unter 100Hz, wo auch das höhere $1/f$ Rauschen, liegt ohne große Auswirkungen unterdrücken. Was aber für ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis wichtig ist, ist dass man die Bandbreite des Verstärkers nicht größer macht als diese 20kHz, denn dort befindet sich nur noch Rauschleistung und keine Signalleistung mehr. Das bedeutet dass ein guter Verstärker eine Bandpass-Charakteristik aufweisen muss, mit einer Untergrenze von etwa 100Hz und einer Obergrenze von etwa 20kHz. Das muss natürlich für

einen speziellen Detektortyp nochmals verifiziert werden. Was die Auswahl der Halbleiter anbelangt, ist darauf zu achten, dass man Bauteile benutzt, die eine geringe Rauschleistungsdichte pro Frequenz aufweisen. Für das meist maßgebliche Spannungsrauschen wird dieser Wert in $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ bezogen auf den Eingang angegeben. Das Rauschen am Ausgang des Verstärkers kann man dann dadurch grob abschätzen, dass man diese Zahl mit der Wurzel aus der Bandbreite des Verstärkers und der Verstärkung multipliziert.

Störungen

Infolge der hohen Verstärkung sieht man am Ausgang auch kleinste Störungen, die vom Verstärker eingefangen werden. Die größte Störungsquelle sind kapazitive Einkopplungen elektrostatischer Felder. Daher sollte der Verstärker in einem elektrisch leitfähigen Gehäuse betrieben werden, das wie ein Faraday'scher Käfig den Verstärker vor elektrostatischen Feldern schützt. Ein Kunststoff-Gehäuse, welches lediglich das Licht vom Detektor fernhält, ist meist nicht ausreichend. Eine Blechdose ist aber völlig ausreichend und hat den Vorteil, dass man den Masse Anschluss direkt anlöten kann, denn die Schirmung sollte mit der Schaltungsmasse verbunden sein, damit sie optimal wirksam ist. Die magnetische Einkopplung von Störungen ist dagegen eher selten und eine Schirmung dafür wäre auch sehr aufwändig. Die Nähe von Trafos insbesondere von Schaltnetzteilen sollte man allerdings meiden.

Schwingungen durch Rückkopplung

Die Voraussetzungen, dass eine Rückkopplung von Signalanteilen auf den Eingang zu Schwingungen führt, ist eine Verstärkung von größer 1 in der Schleife und zusätzlich muss sich die Phasenlage des Signals noch um 180 Grad drehen. Die Verstärkungsbedingung ist oft sehr leicht erfüllt. Meist besteht auch ein Rückkopplungspfad durch kapazitive Kopplung oder unter Umständen auch durch die Stromversorgung. Die Phasenbedingung ist dagegen ganz von der Beschaltung des Verstärkers abhängig. Man sollte durch entsprechende Beschaltung verhindern, dass die Phase des Eingangssignals bis zum Ausgang all zu sehr gedreht wird. Es sollte noch eine gewisse "Reserve" bestehen bleiben bis die 180 Grad erreicht sind. Bei hoher Bandbreite des Verstärkers ist die Gefahr viel größer, dass nicht genug Phasenreserve vorliegt. Gegebenfalls sollte man durch Reduktion der Bandbreite versuchen die Schwingungen in Griff zu bekommen.

Komparator und Impulsverlängerung

Der Verstärkung des Messverstärkers sollte etwa so ausgelegt werden, dass etwa bis zu 1V große Impulse am Ausgang entstehen. Das Rauschen sollte dann unter 100mV rms liegen.

Solche Verhältnisse sind dann ausreichend um einen Komparator sicher anzusteuern, der am Ausgang den größten Teil der Betriebsspannung überstreicht, wenn er durchschaltet und den Puls entsprechend verlängert, so dass er gut hörbar wird. Man kann mit dem Ausgang des Komparators

schließlich auf einen Transistor gehen, der den nötigen Strom für den Lautsprecher liefert, wenn der Komparator zu schwach dafür ist. Vorteilhaft ist auch ein Ohrhöreranschluss, da in freiem Gelände doch etliche andere Geräusche auftauchen, die einen Lautsprecher übertönen können. Auch eine LED-Anzeige für einen "Stumm Modus" ist sinnvoll. Allerdings empfiehlt es sich dabei wenigstens ein Flip-Flop vorzusehen, damit ein seltenes Ereignis auch bis zum nächsten Ereignis gespeichert und erkennbar bleibt. Eine umfangreichere Anzeige geht dagegen meist sehr zu Lasten des Stromverbrauchs.

Stromversorgung und Blocking

Die Schaltung sollte so gewählt sein, dass sie einen möglichst geringen Stromverbrauch hat. Ein 9.6V NiMH Akkublock oder ein 3-zelliger LiPo Akku (11.1V) ist sinnvoll, da es gerade in Ernstfällen keine Batterien zu kaufen gibt. In Verbindung mit einer Solarzelle ist dann auch die Stromversorgung sichergestellt. Der Stromverbrauch insgesamt ist ausreichend niedrig, wenn er unter 10mA liegt (die Akkukapazität eines 9.6V NiMH Akkus liegt bei etwa 200mAh und reicht damit für 20h). Der Vorteil einer Akkuspannung in dieser Größenordnung ist, dass man dann den PIN-Detektor gut in Sperrrichtung vorspannen kann, damit sich die Kapazität reduziert.

Das Knacken des Lautsprechers kann erhebliche Stromschwankungen in der Stromversorgung bewirken, die unter Umständen Rückwirkungen auf den Eingang haben können und dann Schwingungen auslösen können. Daher sollte jede Stufe des Messverstärkers für sich mit einer Stützkapazität abgeblockt werden und der gesamte Messverstärker nur über ein Siebglied (Induktivität und große Kapazität) mit der Komparatorstufe verbunden sein. Der Komparator und Lautsprechertreiber sollte auch nochmals für sich gut abgeblockt sein. Es ist zudem empfehlenswert, die Anstiegszeit am Lautsprecher durch ein entsprechendes RC-Glied zu begrenzen, damit die Spannungsschwankungen aufgrund der Induktivitäten nicht zu hoch werden.

Test der Schaltung

Grundsätzlich ist es günstiger die Verstärkung auf mehrere Stufen aufzuteilen und jede Stufe für sich in der Bandbreite und Verstärkung richtig einzustellen. Dann besteht auch die Möglichkeit eine Stufe nach der andern aufzubauen und für sich zu testen. Allerdings muss beachtet werden, dass eine Stufe auch immer mit dem Eingang der Folgestufe belastet wird, sonst ist das Ergebnis wenig repräsentativ. Ein hochohmiger Tastkopf ist immer sinnvoll, damit das Signal durch den Abgriff nicht zu sehr belastet wird.

Die Tatsache, dass der PIN-Detektor auch lichtempfindlich ist, erscheint zunächst als Übel. Man kann das aber auch in einen Vorteil umkehren um

die Schaltung zu testen. Baut man die Schaltung in ein lichtdichtes Gehäuse ein, so kann man gleichzeitig eine einfache rote LED (keine superhelle) mit einem Vorwiderstand von etwa 10k mit einbauen. Diese LED kann man mit einem Offset von einigen Volt vorspannen, bis sie ganz schwach leuchtet und dann eine schwache Sinusspannung oder Rechteckspannung mit ca. 10kHz überlagern. Dieses Signal muss der Verstärker nun einigermaßen unverzerrt übertragen. Bei 20kHz sollte die Signalstärke dann am Ausgang auf die Hälfte abnehmen, dann ist die Bandbreite richtig eingestellt. Bei niedrigen Frequenzen sollte im Falle einer Rechteckspannung nur für die Flanke ein Signal entstehen und ein niederfrequenter Sinus unter 100Hz sollte ebenfalls unterdrückt werden.

Wenn ein Teststrahler verwendet wird z.B. eine alte Uhr mit radiumhaltigen Leuchtziffern, dann sollten immer wieder kurze Pulse von 50-100us Dauer entstehen, die eine Maximalamplitude von etwa -1V am Ausgang des Verstärkers annehmen, auf die man z.B. ein Oszilloskop triggern können sollte. Die Mehrzahl der Pulse liegt dann unter -0.5V und das Rauschen wird in der Gegend um 10-50mV rms liegen.