
- KV4 -

ZÄHLEN EINZELNER PHOTONEN MIT EINEM
SILICON PHOTOMULTIPLIER (SiPM)

VERSUCHSMAPPE



PRAKTIKUM FÜR FORTGESCHRITTENE

FACHBEREICH PHYSIK
UNIVERSITÄT HAMBURG

Arbeitsgruppe : Prof. Dr. Erika Garutti
Gruppe Particle Physics & Detector Development
Campus Bahrenfeld, Geb. 67b
<http://wwwiexp.desy.de/groups/pd/>

Betreuer : Dr. Milan Zvolský
milan.zvolsky@desy.de
Geb. 67a, Raum 6
Tel.: 040-8998-2968

Ole Brandt
ole.brandt@desy.de
Geb. 67a, Raum 6
Tel.: 040-8998-2968

Autor : Milan Zvolský
Stand : 19. Februar 2018

Zusammenfassung

In diesem Versuch wird die Funktionsweise von Silizium Photomultipliern (SiPMs) kennengelernt und einige Kenngrößen vermessen, wie z.B. Verstärkung, Dunkelstrom, optisches Übersprechen und Afterpulse. Außerdem wird ein Modell aufgestellt, welches das Pulshöhenspektrum beschreibt. Dazu werden die statistischen Eigenschaften Detektionsprozesses ausgenutzt.

1 Einleitung

Silizium Photomultiplier (SiPM) sind neuartige Photo-Detektoren, die sensitiv gegenüber einzelner Photonen sind. Sie bestehen aus einer Vielzahl von parallel geschalteten Single Photon Avalanche-Dioden (SPADs) (bis zu $\approx 10^3/\text{mm}^2$), bei denen einzelne Photonen einen Lawineneffekt auslösen und mehrere Mio. Ladungsträger erzeugen und somit als elektrische Impulse registriert werden können. Die Anwendungen reichen von Kalorimetern in der Hochenergiephysik bis hin zu medizinischen Detektoren, z.B. in der Positronen-Emissions-Tomographie (PET).

2 Theoretische Grundlagen

2.1 PIN-Diode

Eine pin-Diode besteht aus einer hochdotierten p^+-n^+ Grenzzone und einer niedrig dotierten intrinsischen n - oder p -Region dazwischen. Die hochdotierten Regionen stellen den ohmschen Kontakt dar. Wenn die Diode in Sperrrichtung mit Spannung versorgt wird, wird die intrinsische Lage verarmt. Photonen mit einer größeren Energie als der Bandlücke von Silizium (1.12 eV) können ein Elektron-Loch-Paar in der intrinsischen Region erzeugen. Durch den Einfluss des elektrischen Feldes driften die Elektronen und Löcher zur n^+ - bzw. p^+ -Region. Während dieser Drift-Zeit wird ein Strom an den Elektroden erzeugt.

2.2 Avalanche-Photodiode (APD)

Eine Avalanche-Photodiode (APD) wird bei einer so hohen Spannung betrieben, dass Elektronen und Löcher so stark beschleunigt werden, dass sie weitere Elektron-Loch-Paare durch Stoßionisation erzeugen können. Eine Lawine (avalanche) aus sekundären Ladungsträgern kann entstehen. Somit produziert ein primäres Photo-Elektron ein verstärktes Strom-Signal. Wenn nun die angelegte Spannung und somit das elektrische Feld in der Diode so hoch ist, dass sekundäre Ladungsträger schneller weitere Ladungsträger erzeugen, als diese abfließen können, ist die Lawine selbst-erhaltend und die Zahl der Ladungsträger nimmt mit der Zeit exponentiell zu. Dieser Zustand wird Lawinendurchbruch (engl. avalanche breakdown) genannt. APDs, die in diesem Regime bedient werden, werden Geiger-APDs genannt, aufgrund ihrer Ähnlichkeit zu einem Geiger-Müller-Zählrohr [1].

2.3 Silicon Photomultiplier (SiPM)

SiPMs bestehen aus einer Matrix von Avalanche-Photodioden (APDs), welche sich parallel geschaltet auf einem gemeinsamen Substrat befinden und einen gemeinsamen Output besitzen. Jede APD wird im Geiger-Modus betrieben, also oberhalb einer gewissen Durchbruchsspannung, ab der Ladungsträger, welche durch ein absorbiertes Photon oder durch thermische Effekte erzeugt wurden, eine exponentielle Ladungsvervielfachung auslösen. Die sekundären Ladungsträger werden durch Stoßionisation erzeugt. Es ergeben sich Verstärkungsfaktoren bis zu 10^6 , wodurch ein hohes Maß an Homogenität in der Response der einzelnen Zellen erreicht wird.

Durch den lawinenartigen Anstieg von sekundären Ladungsträgern geht die Information über die Energie des einfallenden Photons verloren; eine Zelle feuert entweder oder sie feuert nicht. Auf der anderen Seite ermöglicht dies das Zählen einzelner Photonen. Die Lawine aus erzeugten Ladungsträgern muss unterbrochen werden, da sie sich sonst ungebremst fortsetzen würde und die Diode keine weiteren eintreffenden Photonen verarbeiten könnte. Dies wird mit einem Löschwiderstand (quenching resistor) realisiert, der in Reihe mit der Diode geschaltet wird und einen Abfall in der Versorgungsspannung bewirkt, wodurch der Lawinenprozess gestoppt wird.

Insgesamt ist ein SiPM also eine Sammlung von binären Zellen, die eine Information über die Intensität des einfallenden Lichts liefert, indem die Zahl der gefeuerten Zellen gezählt wird. Abb. 1 zeigt eine Skizze des Querschnitts einiger Zellen eines SiPMs.

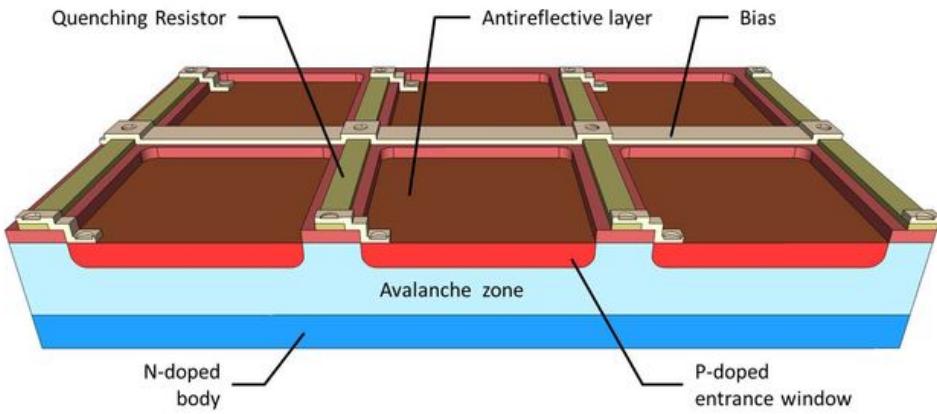


Abbildung 1: Querschnitt einiger Mikrozellen eines SiPMs: Eine dünne, hochdotierte p-Region befindet sich auf einem n-dotierten gemeinsamen Silizium-Substrat [2].

Abb. 2 zeigt ein beispielhaftes Spektrum der SiPM-Antwort auf von einer LED emittierten Photonen. Jeder Eintrag entspricht einer digitalisierten freigegebenen Ladung, die gemessen wird, indem der Strom-Puls während eines vordefinierten Zeitintervalls (Gate) integriert wird. Jeder Peak des Spektrums entspricht einer gewissen Zahl an gleichzeitig gefeuerten Zellen.

Der erste Peak des Spektrums (bei einer Ladung von 0 ADC counts) wird Pedestal genannt und entspricht Ereignissen, bei denen kein Photon registriert wurde. Daher ist

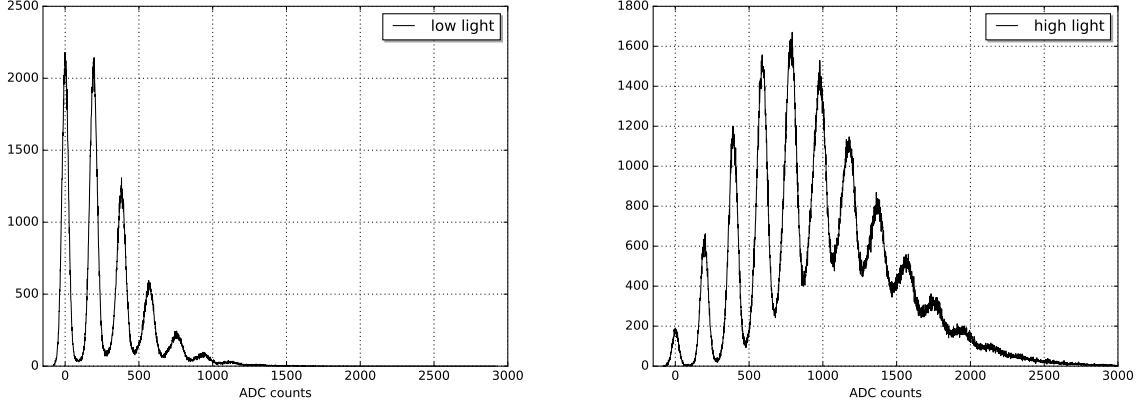


Abbildung 2: Beispielhafte Spektren der von einer LED emittierten Photonen, detektiert mit einem SiPM bei Raumtemperatur. Links: geringe LED-Intensität, rechts: hohe LED-Intensität.

dieser Peak ein Maß für das Rauschen des Systems, also der stochastischen Fluktuation im Ausgangssignal in Abwesenheit einer Anregung. Die weiteren Peaks entsprechen einer wachsenden Zahl von gefeuerten Pixeln, d.h. detektierte Photonen. Die Breite der Peaks nimmt mit der Wurzel aus der Zahl der gefeuerten Pixel zu. Diese Verbreiterung limitiert das Auflösungsvermögen des Detektors. Die Breite des i -ten Peaks ist gegeben durch

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_0^2 + i \cdot \sigma_1^2} \quad (1)$$

wobei σ_0 die Breite des Pedestals und σ_1 die Breite des ersten Peaks ist. Der Abstand zwischen den Peaks ist konstant und wird Verstärkung oder *gain* G genannt. Er hängt linear von der angelegten Spannung ab,

$$G = \frac{C \Delta V}{q_e} \quad (2)$$

wobei C die Diodenkapazität einer einzelnen Zelle und q_e die Elektronenladung ist. $\Delta V = V_{\text{bias}} - V_{\text{bd}}$ ist die Differenz aus angelegter (Bias-) Spannung und Durchbruchsspannung V_{bd} .

2.4 Dunkelrate

Freie Ladungsträger können auch in Abwesenheit von Licht durch thermische Anregung oder durch den Tunneleffekt erzeugt werden und einen **Lawinendurchbruch** erzeugen. Solch ein Signal ist ununterscheidbar von Photon-induzierten Signalen und der SiPM zählt Photon trotz Abwesenheit von Licht. Die Zahl der durch diese Effekte gefeuerten Zellen wird **(primäre) Dunkelrate** oder **Dark Count Rate (DCR)** genannt. Dieser Prozess ist **Poisson-verteilt**. Die DCR wird beeinflusst von verschiedenen äußeren Faktoren wie Beschaffenheit des Substrats, Herstellungstechnologie, Sensor-Design. Zudem spielt die **Umgebungstemperatur** eine wichtige Rolle. Außerdem **verstärkt die angelegte Spannung die DCR**, da die

Dicke des pn-Übergangs steigt und somit die Wahrscheinlichkeit, dass Ladungsträger eine Lawine auslösen. Die **DCR** ist ein limitierender Faktor für die Detektion von schwachen Photonen-Signalen und beeinträchtigt die Zeitauflösung des Detektors.

Die DCR kann gemessen werden, indem bei Abwesenheit von Licht die Ladung innerhalb eines Gates zu zufälligen Zeitpunkten integriert wird. Die DCR ist gegeben durch

$$\text{DCR} = f_{0.5}/\tau_{\text{gate}} \quad (3)$$

wobei $f_{0.5}$ der Anteil an Events oberhalb der Hälfte der mittleren Pulshöhe einer einzelnen Geiger-Entladung und τ_{gate} die Gate-Länge ist. Eine typische DCR beträgt etwa 0.5 MHz/mm².

2.5 Korrelierter Noise

2.5.1 Optischer Cross-Talk

Optisches Durchsprechen oder Cross-Talk entsteht, wenn der Breakdown in einem Pixel des SiPMs einen Lawinendurchbruch in einem benachbarten Pixel auslöst. Dieser Effekt ist in Abb. 3 dargestellt. Optischer Cross-Talk hängt von der angelegten Spannung und dem Gain ab, sowie von der Sensortechnologie. Typischerweise liegt er zwischen 10 und 20 %.

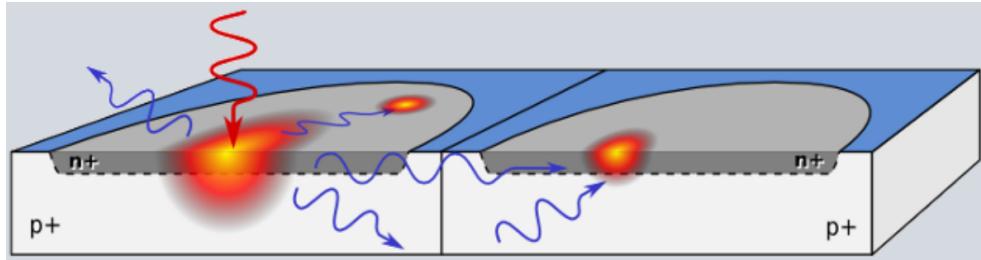


Abbildung 3: Skizze des optischen Cross-Talks zwischen benachbarten Pixeln einer SiPM. Ein Photon, produziert bei einem Lawinendurchbruch in einem Pixel, erreicht einen benachbarten Pixel und löst eine weitere Lawine aus.

2.5.2 Afterpulse

Eine weitere Quelle für Rauschen ist der sogenannte **Afterpulse**. Dabei werden freie Ladungsträger, die bei einem Lawinendurchbruch erzeugt werden, an Verunreinigungen im Si-Gitter gefangen, die Energienivele im Ladungsband haben. Diese Ladungsträger werden verzögert wieder freigegeben, mit einer charakteristischen Zeitkonstante. Wenn die Zeitkonstante länger ist als die Zeit, bis die Lawine abgeklungen ist, können diese Ladungsträger einen weiteren Lawinendurchbruch auslösen. Wenn ein Ladungsträger freigegeben wird, bevor die Bias-Spannung wieder vollständig aufgeladen ist, kann ein zusätzlicher Breakdown entstehen, der weniger Ladung generiert als der Gain des Pixels. Diese Art des Afterpulses reduziert die Fähigkeit des SiPM, Photonen zu zählen, da der reduzierte Ladungs-Output

die Trennung der einzelnen Peaks im Spektrum verschmiert.

Der korrelierte Noise berechnet sich aus dem Verhältnis der Dark Count Rates (DCRs) von Pulsen, die die 0.5- und 1.5-Photoelektron-Schwelle überschreiten, also

$$CN = \frac{f_{1.5 \text{ p.e.}}}{f_{0.5 \text{ p.e.}}} \quad (4)$$

2.6 Statistische Behandlung von LED-Spektren

Das Auftreten von Photonen, die eine Geiger-Entladung hervorrufen, ist statistisch unabhängig, und die Wahrscheinlichkeit des Eintretens innerhalb eines Zeitintervalls Δt ist proportional zu Δt selbst. Daraus folgt, dass die Verteilung der erwarteten Anzahl an Photonen, die innerhalb eines gewissen Zeitintervalls oder Gates t_{gate} detektiert werden, Poisson-verteilt:

$$P_{n,\lambda} = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (5)$$

wobei λ die mittlere Zahl an detektierten Photonen ist.

Jede Geiger-Entladung kann sekundäre Entladungen produzieren, sowohl prompt als auch verzögert. Für den prompten Cross Talk kann wieder eine Poisson-Verteilung mit einem Verzweigungsverhältnis λ angenommen werden. Dadurch ergibt sich eine so genannte generalisierte Poisson-Verteilung für k Entladungen:

$$GP_{k,\mu,\lambda} = \frac{\mu \cdot (\mu + \lambda \cdot k)^{k-1} \cdot e^{-(\mu + \lambda \cdot k)}}{k!} \quad (6)$$

Die quantitative Behandlung von verzögertem Cross-Talk, Afterpulsing und DCR ist etwas aufwändiger [3, 4] und nicht Gegenstand dieses Versuchs.

3 Experimenteller Aufbau

Das Setup, bestehend aus dem CAEN Educational Kit [5], ist in Abb. 4 gezeigt. Eine *Power Supply and Amplification Unit (PSAU)* versorgt den SiPM mit Spannung und verstärkt die Signale. Die Datennahme erfolgt mit einem Analog-Digital-Umsetzer (CAEN DT5720A digitizer, 2 Channels, 250 MS/s, 12 bit), inklusive digitalem Puls-Prozessor. Die Firmware ermöglicht Ladungsintegration, Pulsform-Diskriminierung und Triggering. Ein interner Trigger kann zufällig eintreffende Pulse (insb. dark counts) erkennen und ein Gate zur Ladungsintegration öffnen.

Ein ultra-schneller LED-Treiber ermöglicht die Beleuchtung der SiPMs mit wohldefinierten Licht-Pulsen und sendet ein Trigger-Signal an den Digitalisierer.

Die Steuerung der Hardware erfolgt mit einer auf LabVIEW basierten graphischen Benutzeroberfläche, in der sich die Parameter der Spannungsversorgung, der Verstärkungseinheit und des Digitalisierers steuern lassen. Die Visualisierung und Analyse der Daten erfolgt mit Python.



Abbildung 4: CAEN SiPM Educational Kit [5]. Links (schwarz) befindet sich ein LED-Treiber, der Licht über eine Glasfaser an den sich im silbernen Zylinder befindlichen SiPM sendet. Außerdem versorgt der LED-Treiber den Digitalisierer mit einem Trigger-Signal. Die *Power Supply and Amplification Unit (PSAU)* versorgt den SiPM mit Spannung und verstärkt die Signale. Der Digitalisierer digitalisiert die analogen Pulse und prozessiert diese. Die Datennahme und Visualisierung erfolgt über ein Labview-basiertes Programm.

4 Durchführung

4.1 Beobachtung von Pulsen am Oszilloskop

Zunächst sollen Pulse mit dem Oszilloskop beobachtet werden und der Einfluss von Gate-Länge, LED-Intensität und angelegter Spannung qualitativ untersucht werden. Dadurch wird ein tieferes Verständnis von der Funktionsweise eines SiPMs erreicht.

Aufgaben:

1. Identifizieren Sie $n_{pe} = 1$, $n_{pe} = 2$ und Afterpulse und speichern Sie repräsentative Oszilloskop-Aufnahmen ab.
2. Schätzen Sie Anstiegs- und Zerfallszeit der Pulse ab.
3. Ändern Sie die LED-Intensität und beobachten Sie den Effekt.
4. Ändern Sie die angelegte Spannung und prüfen Sie, ob sich die Pulsform ändert
5. Machen Sie sich mit dem Konzept des Gates und dem Einfluss der Gate-Länge vertraut. Wählen Sie für die folgenden Messungen eine geeignete Gate-Länge und geeignetes Pre-Gate.

4.2 Aufnahme von Dunkel-Spektren

Nehmen Sie Dunkel-Spektren bei unterschiedlichen Spannungen oberhalb der Durchbruchsspannung auf. Hierbei können Effekte wie die Änderung des Gains, die Poisson-Verteilung der gefeuerten Pixel, das Afterpulsing und die DCR direkt beobachtet werden.

Aufgaben:

1. Dark counts treten zufällig in der Zeit auf. Warum folgt daraus, dass die Verteilung der erwarteten Zahl an Photonen, die innerhalb eines gewissen Zeitintervalls detektiert werden, Poisson-verteilt ist?
2. Nehmen Sie Dunkelspektren für drei verschiedene Spannungen oberhalb der Durchbruchsspannung auf.
3. Bestimmen Sie den Anteil an Ereignissen oberhalb eines halben gefeuerten Pixels, $f_{0.5}$ mit Hilfe des Gains, den Sie in 4.3 bestimmen werden. Bestimmen Sie daraus die DCR. Wie lässt sich die DCR unter der Annahme einer zugrundeliegenden Poisson-Statistik bestimmen? Vergleichen Sie das Ergebnis beider Methoden.
4. Schätzen Sie aus $f_{1.5}$ die Crosstalk-Wahrscheinlichkeit ab.

4.3 Aufnahme von LED-Spektren

Nehmen Sie anschließend LED-Spektren für verschiedene Spannungen oberhalb der Durchbruchsspannung auf.

Aufgaben:

1. Nehmen Sie LED-Spektren für mindestens 6 verschiedene Spannungen oberhalb der Durchbruchsspannung auf.
2. Fitten Sie eine Gauß-Funktion an den 0. und 1. Peak und bestimmen Sie daraus den Gain.
3. Bestimmen Sie aus der Zahl der Events im Pedestal, f_0 und dem Gain G den erwarteten Mittelwert und die Varianz unter der Annahme einer Poisson-Verteilung. Vergleichen Sie mit Mittelwert und Varianz des gemessenen Spektrums (Histogramms) und diskutieren Sie die Abweichungen.
4. Bestimmen Sie die Durchbruchsspannung V_{bd} des verwendeten SiPMs. Für jedes der aufgenommenen Spektren wird der Gain bestimmt und gegen die Spannung aufgetragen. Dazu werden die Mittelwerte und Breiten des Pedestals und des Ein-Photonen-Peaks durch einen Gaussfit bestimmt. Da bei der Durchbruchsspannung der Gain gerade Null ist, kann sie mit Hilfe eines linearen Fits an $G(V)$ und Extrapolation zu $G = 0$ bestimmt werden. Diskutieren Sie den Fehler auf die ermittelte Durchbruchsspannung (Korrelationen berücksichtigen).

4.4 Modellierung eines LED-Spektrums

Es soll ein **Modell aufgestellt werden**, welches die **LED-Spektren** in erster Näherung beschreibt. Dieses Modell soll die **Poisson-Verteilung** der **Anzahl an gefeuerten Pixeln** mit den **Gaussverteilungen der integrierten Ladung** verbinden. Dazu wird ein Python-Skript zur Verfügung gestellt, welches ein grobes Skelett für die Aufgabe bietet.

Gehen Sie wie folgt vor:

1. Welche **physikalischen Parameter** können mit welchen **Parametern von Poisson- und Gauss-Verteilung** assoziiert werden? Wie können μ_i und σ_i des i -ten Peaks bestimmt werden?
2. **Definieren Sie Poisson- und Gauss-Verteilung in Python.**
3. Stellen Sie das **Modell** auf, das an die Daten angepasst werden soll.
4. **Schätzen Sie die freien Parameter** per Hand ab und **plotten Sie die Daten zusammen mit dem Modell.**
5. Bestimmen Sie die **Abweichung** zwischen **Daten und Modell** mit Hilfe eines χ^2 -Tests. Diskutieren Sie die Ursachen für die Abweichungen.
6. *Optional:* Wiederholen Sie die obigen Punkte unter Verwendung einer generalisierten Poisson-Verteilung statt einer Poisson-Verteilung. Welchen Einfluss hat diese Änderung auf welche Bereiche des Spektrums?
7. *Optional:* Fitten Sie nun die Funktion an die Daten. Dies können Sie entweder mit einer χ^2 -Minimierung oder mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (least squares) machen. Für letzteres können Sie die Funktion `scipy.optimize.curve_fit` benutzen. Achtung: Das Setzen von Startwerten und Grenzen für die Fit-Parameter ist wichtig.

Hinweis: Natürlich müssen zu allen berechneten Größen **Fehler/Ungenauigkeiten** berechnet und begründet werden.

5 Fragen zur Vorbereitung

- 1 • Wie reagiert ein SiPM auf eintreffende Photonen unterhalb und oberhalb der Durchbruchsspannung?
- 2 • Welcher physikalische Prozess ist verantwortlich für den Lawinendurchbruch? Wie wird dieser Prozess in einem SiPM unterbrochen?
- 3 • Bei welcher Spannung sollte der SiPM betrieben werden?
- 4 • Welche Effekte beeinflussen die Qualität des Spektrums?

- 5** • Warum ist der Dunkelstrom abhängig von der Umgebungstemperatur?
- 6** • Wie kann der optische Cross-Talk eines SiPMs bestimmt werden?
- 7** • Erklären Sie qualitativ das Einzelphoton-Spektrum, das Sie durch Illumination des SiPMs erhalten.
- 8** • Welchen Wahrscheinlichkeitsverteilungen folgen die emittierten Photonen und die Response der SiPM in erster Näherung? Wie können weitere Detektoreffekte berücksichtigt werden?
- 9** • Wie berechnet sich der Mittelwert einer Häufigkeitsverteilung (Histogramm)?

Literatur

- [1] Chen Xu. *Study of the Silicon Photomultipliers and Their Applications in Positron Emission Tomography*. PhD thesis, University of Hamburg, 2014.
- [2] KETEK GmbH. <http://www.ketek.net/products/sipm-technology/microcell-construction/>, 2016.
- [3] V Chmill, E Garutti, R Klanner, M Nitschke, and J Schwandt. On the characterisation of sipms from pulse-height spectra. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 854:70–81, 2017.
- [4] Milan Zvolsky. *Simulation, Image Reconstruction and SiPM Characterisation for a Novel Endoscopic Positron Emission Tomography Detector*. Dissertation, Universität Hamburg, 2017.
- [5] CAEN Electronic Instrumentation, SP5600E Educational Photon Kit. <http://www.caen.it/jsp/Template2/CaenProd.jsp?parent=61&idmod=1022>, 2016.

1) Wenn der SiPM unterhalb der Durchbruchsspannung betrieben wird, sind die elektrischen Felder in den einzelnen "Mikrozellen" nicht stark genug um den gewünschten Lawineneffekt auszulösen der für eine ausreichende Verstärkung des Signals benötigt wird. Der SiPM wird also praktisch nichts detektieren.

2. Physikalischer Prozess ist die Stoßionisation. Im Detail: Zuerst wird einfallendes Photon in Si-Schicht absorbiert und es entsteht ein Elektron-Loch-Paar. Diese Ladungsträger werden durch E-Feld stark beschleunigt und mit genügend kinetischer Energie können sie wiederum anderen Elektronen-Loch-Paare erzeugen und so weiter....

Gestoppt werden kann dieser Lawineneffekt durch aktives oder passives "Quenching". Beim passiven Quenching gibt es einen in Reihe geschalteten Widerstand in jeder Mikrozelle der für einen Spannungsabfall nach lawinenbildung sorgt und den SiPM somit unterhalb der Durchbruchsspannung bringt. Danach lädt sich die Mikrozelle wieder neu auf und ist bereit für weitere Detektionen. Beim Aktiven Quenching wird durch weitere Schaltungselemente eine schnelle Spannungspulsantwort auf eine detektierte Lawine gegeben um den Effekt zu stoppen. Das ermöglicht eine verkürzte Zeit bis zur Wiederinbetriebnahme.

3. Ein SiPM sollte leicht über seiner Durchbruchsspannung betrieben werden aka bei "Betriebsspannung".

4. Die Dunkelzählrate (DCR) erzeugt durch thermische Ladungsträger in den Mikrozellen erhöht das Rauschen.

Afterpulsing durch verzögerte Freisetzung von Ladungsträgern.

Optical Crosstalk: Zusätzliche Lichtemissionen durch eingefangene Photonen/bzw. Lawinen -> Falschzählungen.

Temperatur: Einfluss auf Materialeigenschaften und DCR.

Nichtlinearität: Endliche Anzahl von Mikrozellen führt zu Sättigung bei zu hohem Photonenfluss.

Recovery-Time: Quasi Zeitliches Auflösungsvermögen.

Betriebsspannung: Schwankungen der Betriebsspannung haben direkte Auswirkung auf die Verstärkung und andere relevante Parameter.

5. Siehe Erklärung in 4.

6. Es gibt mehrere Experimentelle Ansätze:

Photonenzahl-Statistik: Es wird geringe Lichtintensität mit durchschnittlicher weniger als einem Photon pro Messung verwendet. Bei perfekter Detektion wird nur ein Photonen-Puls erwartet. Alles was darüber hinausgeht liefert Erkenntnisse über den optischen Crosstalk.

Betriebsspannung: Eine Erhöhung der Betriebsspannung für oft auch zu erhöhtem Crosstalk. So lässt sich der relative Anteil an optischen Crosstalks abhängig von der Betriebsspannung bestimmen.

7. Die Einzelphotonen-Spektroskopie ist eine Methode zur Untersuchung der Photonenstatistik detekterter Signale und der Eigenschaften des SiPMs selbst.

Peaks: Bei geringer Beleuchtung diskret und gut zu erkennen. Der Null-Photonen-Peak (Noise-Peak) entsteht durch Dunkelzählereignisse oder anderes Rauschen durch das fälschlicherweise ein Signal erzeugt wird. Der Ein-Photon-Peak ist ein echter Peak. Peaks höherer Ordnung entsprechen der Detektion von mehreren Photonen, die gleichzeitig verschiedene Mikrozellen auslösen.

Die Abstände zwischen den Peaks sind konstant und repräsentieren die Verstärkung.

Eine Verbreiterung des Peaks hat meist in 4. beschriebene Gründe (Oder Crosstalk oder Afterpuls).

8. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der emittierten Photonen ist in erster Näherung eine Poisson-Verteilung.

Die Response des SiPM ist für hohe Lichtintensitäten Binomialverteilt, da jede Mikrozelle entweder ein Signal detektiert (1) oder nicht (0).

Für große Mittelwerte bzw. einen großen Erwartungswert der Poisson/Binomialverteilung geht die Verteilung nach dem zentralen Grenzwertsatz gegen eine Gauss-Verteilung.

$$9. \bar{x} = \frac{\sum (x_i \cdot f_i)}{\sum f_i}$$

Summe über alle Werte
Summe aller Häufigkeiten

Mit: x_i : Wert der Klasse i

f_i : Häufigkeit der Klasse i