

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Bonner Zentrum für Lehrerbildung (BZL)

# Entwicklung eines Praktikumversuchs aufbauend auf der Schul-TPC

Masterarbeit im Fach Physik  
Zum Erlangen des Master of Education

**vorgelegt von:** Johannes Udo Streun  
**Matrikelnummer:** 2864616  
**Erstgutachter:** Prof. Dr. Klaus Desch  
**Zweitgutachter:** Dr. Jochen Kaminski  
**Datum der Abgabe:** Bonn, den 15. November 2021

Ich versichere hiermit, dass die Masterarbeit mit dem Titel „Entwicklung eines Praktikumversuchs aufbauend auf der Schul-TPC“ von mir selbst und ohne jede unerlaubte Hilfe selbständig angefertigt wurde, dass sie noch an keiner anderen Hochschule zur Prüfung vorgelegen hat und dass sie weder ganz noch in Auszügen veröffentlicht worden ist. Die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten, Abbildungen usw. –, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall kenntlich gemacht.

Bonn, den 15.11.2021

Johannes Streun

## Danksagung

Ich möchte mich als erstes bei meinen Betreuern Dr. Jochen Kaminski und Prof. Dr. Klaus Desch bedanken für die Möglichkeit meine Masterarbeit über die Schul-TPC zu schreiben. Ich bedanke mich besonders bei Dr. Jochen Kaminski für die vielen technischen Erklärungen und Unterstützungen und das Designen der benötigten PCBs. Des weiteren gilt mein Dank Divya Pal, die mich bei den Messungen insbesondere mit radioaktiven Präparaten und an der Timepix-Auslese unterstützte. Auch bedanke ich mich bei Markus Gruber und Tobias und Tobias Schiffer für die Hilfe bei technischen Fragen und das Beseitigen von Problemen an der Auslese, was die durchgeführten Messungen noch im letzten Moment möglich gemacht hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Schul-TPC . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Wechselwirkungen von Teilchen in Materie . . . . .	4
2.2	Funktionsprinzip einer Zeitprojektionskammer . . . . .	5
2.3	Timepix-Chip . . . . .	6
2.4	Gasverstärkung . . . . .	8
2.5	Szintillatoren . . . . .	8
2.5.1	SiPMs . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Aufbau</b>	<b>12</b>
3.1	Detektor . . . . .	12
3.2	Szintillatoren . . . . .	13
3.2.1	Mikrocontroller . . . . .	14
3.2.2	Szintillatorgehäuse . . . . .	17
3.2.3	Szintillator PCB . . . . .	19
3.2.4	Silizium Photomultiplier . . . . .	20
3.2.5	Operationsverstärker . . . . .	20
3.2.6	Weitere Bauteile des SiPM-Boards . . . . .	21
3.3	Signalweg und Datenverarbeitung . . . . .	23
3.3.1	Mikrocontroller-Code . . . . .	23
3.3.2	Auslese . . . . .	24
3.4	Spannungsversorgungen . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Test des Triggeraufbaus</b>	<b>27</b>
4.1	Analogsignal der SiPMs . . . . .	27
4.2	Frequenz des DAC-Ausgangssignal . . . . .	28
4.3	Koinzidenzmessungen . . . . .	29
4.4	Auslösung des Shuttersignals durch den konstruierten Triggeraufbau . . . . .	33
4.5	Erste Messungen an der Schul-TPC mit Triggervorrichtung . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Mögliche Versuchsteile und Messungen</b>	<b>37</b>
5.1	Aufbau . . . . .	37
5.2	Arbeit an den Szintillatoren . . . . .	37
5.3	Timepix-Chips . . . . .	38
5.4	Myonen . . . . .	39
5.5	Arbeit mit dem Mikrocontroller . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Einsatz außerhalb der Universität</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>43</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>46</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>47</b>

# 1 Einleitung

Lange bevor die ersten Teilchenbeschleuniger ihren Dienst aufnahmen, waren Kern- und Teilchenphysiker für Experimente mit hochenergetischen Teilchen auf natürliche Strahlungsquellen angewiesen, mit Hilfe dessen erstmals neue Teilchen wie das Positron, Myon oder Pion nachgewiesen werden konnten. Einer der Meilensteine der Kern- und Teilchenphysik war somit sicherlich die Entdeckung der kosmischen Höhenstrahlung von Victor Hess im Jahre 1912, was im Jahre 1936 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde [1]. Eines der wichtigsten Messinstrumente, welche Victor Hess für seine Entdeckung benötigte, war eine Ionisationskammer, ein zylinderförmiges Volumen in dessen Mitte eine Elektrode liegt (Abb. 1 a)). Als zweite Elektrode fungierte die Außenwand des Zylinders. Im Prinzip beschreibt dieser Aufbau einen Kondensator, welcher durch Anlegen einer Spannung zwischen den beiden Elektroden aufgeladen werden kann. Bewegen sich ionisierende Teilchen durch das Zylindervolumen, erzeugt es in diesem Elektronen-Ionen-Paare, welche durch Bewegung zur entsprechenden Elektrode den Kondensator entladen. Um diese Entladung zu messen, benutzte Hess das Wulfsche Fadenelektrometer (Abb. 1 b)). Hiermit kann die Veränderung einer statische Aufladung zum Beispiel eines Kondensators über den optischen Weg für die damalige Zeit recht genau beobachtet werden. Mit solch aus heutiger Sicht einfachen Messapparaturen gelang es Victor Hess auf seinen vielen Ballonfahrten die höhere Ionisierungsrate in größeren Höhen zu vermessen, was zur Entdeckung der kosmischen Höhenstrahlung führte.

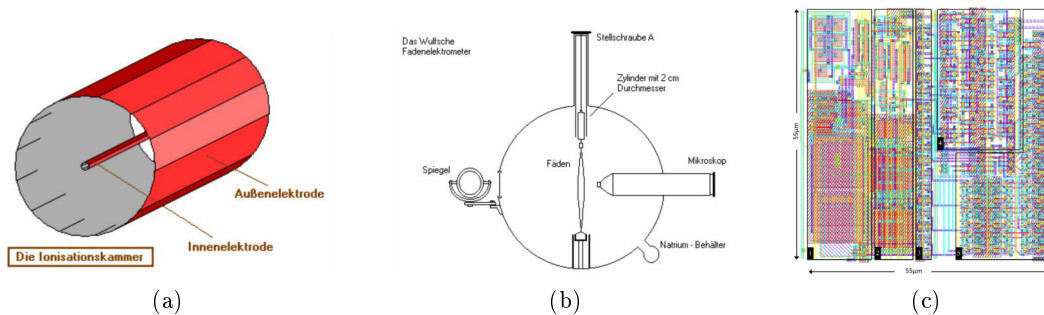


Abbildung 1: Messinstrumente verschiedener Komplexität. a) Ionisationskammer [1], b) Wulfsche Fadenelektrometer [1], c) Timepix-Pixellayout [2]

Um mehr Informationen aus der Höhenstrahlung zu erhalten als die bloße Ionisation der Luft, wurden immer neue Messapparaturen entwickelt wie zum Beispiel die Nebelkammer mit Hilfe dessen man über die Beobachtung von Teilchenspuren das Muon entdeckte. Macht man einen Sprung in die heutige Zeit und vergleicht heutige Messaufbauten bei verschiedenen Hochenergieexperimenten mit den Vergangenen, so lassen sich auf den ersten Blick wenig Gemeinsamkeiten erkennen. Doch sind es oftmals die selben einfachen Prinzipien auf welchen die Messapparaturen aufbauen. Immer noch arbeiten Physikerinnen und Physiker daran Spuren ionisierender Strahlung zu detektieren, um deren Eigenschaften und Ursprünge zu erkennen. Damit dies immer schneller und mit immer

größerer Auflösung sowohl zeitlich als auch örtlich möglich ist, ist die Verwendung digitaler Messapparaturen nicht mehr wegzudenken. In Abb. 1 c) ist das Layout eines Pixels auf einem Timepix-Chip zu sehen. Im Prinzip ist dessen Aufgabe identisch zum Elektroskop (Abb. 1): die Bestimmung einer Ladungsgröße. Nur geschieht das auf dem Timepix-Chip auf einer Gesamtfläche von lediglich  $55 \times 55 \mu\text{m}^2$ . Und auf dem kompletten Chip geschieht dies  $65025$  mal mit einem Flächenbedarf, der einem Fingernagel entspricht.

Die Vorteile genauerer Messungen liegen auf der Hand, jedoch ist es heutzutage deutlich aufwändiger für Interessierte derart komplexe Messsysteme zu verstehen und somit auch nutzen und eventuell auch für eigene Anwendungen anpassen zu können. Am besten lassen sich derartige Systeme begreifen, wenn sie auf ihre Hauptfunktionen reduziert werden und natürlich, wenn mit ihnen gearbeitet und experimentiert wird. Im Rahmen des Physikstudiums sind hierzu die Laborpraktika vorgesehen. Das Experimentieren sowie Auswerten liegt hier im Vordergrund und soll den Studierenden bestenfalls Einblicke in traditionelle aber auch moderne Messmethoden und Instrumente geben. Dies ist ein Ziel, welches im Zuge der vorliegenden Arbeit auf den Weg gebracht werden soll. Dies geschieht am Aufbau eines Demonstrationsmodells einer Zeitprojektionskammer der sogenannten Schul-TPC.

## 1.1 Die Schul-TPC

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Weiterentwicklung der sogenannten Schul-TPC. Hierbei handelt es sich um eine Zeitprojektionskammer (Time Projection Chamber, TPC), deren Entwicklung 2017 in der Arbeitsgruppe Experimentelle Teilchenphysik unter Leitung von Prof. Dr. Klaus Desch begann. Ziel war es ein Demonstrationsmodell eines Gasdetektors zu konstruieren, welches sowohl in der Schule als auch auf öffentlichen Veranstaltungen die Funktionsweise einer Zeitprojektionskammer einfach erfahrbar macht. Auch soll es die zeitgemäße digitale Auswertelektronik des Timepix bzw. Gridpix-Chips präsentieren und erklären.

Das Projekt Schul-TPC begann mit der Bachelorarbeit von Maximilian Meiß aus dem Jahr 2017 [3]. In dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt besonders auf den Einsatz des Detektors in Schulen gelegt und mögliche Anforderungen formuliert. So wurde hier erstmals formuliert, dass es sich bei dem Detektor um ein mobile voll funktionsfähige Zeitprojektionskammer handeln soll, die unabhängig von aufwändiger Labortechnik betrieben werden soll, um den Einsatz an einer Schule zu ermöglichen. Dies beinhaltet ein kompaktes Detektordesign mit einer über USB betriebenen Auslese, portablen Gasdurchflutung und einfache ebenfalls mobile Hochspannungsversorgung. Letzteres wurde in der Bachelorarbeit von Maximilian Meiß auch konzipiert.

Im Jahr 2019 wurde die Schul-TPC im Zuge meiner Bachelorarbeit designet und auch gebaut [4]. Resultat der Arbeit war eine funktionierende Zeitprojektionskammer, welche erste Teilchenspuren detektieren konnte, jedoch nur in Verbindung mit der Auslese, Gasdurchflutung sowie Hochspannungsversorgung der Arbeitsgruppe. Im Jahr 2020 beschäftigte sich die Bachelorarbeit von Malte Koch ebenfalls mit der Schul-TPC [5]. Es wurden verschiedene Messungen durchgeführt mit der für die Schul-TPC angedachten

USB-Auslese, jedoch nur mit einem anstatt der vier geplanten GridPix-Chips. Es wurde ebenfalls die von Maximilian Meiß konstruierte Hochspannungsversorgung getestet und Änderungen, die für eine korrekte Funktion notwendig wären, vorgeschlagen [5]. Auch beschäftigte sich die Arbeit von Malte Koch mit ersten Test mit einer Schülergruppe. Es hat sich in den bisherigen Arbeiten gezeigt, dass das Prinzip der Schul-TPC als Demonstration durchaus geeignet ist, insbesondere durch den übersichtlichen Aufbau aber auch die Möglichkeit Spuren verschiedener ionisierender Teilchen gut darstellen zu können. Ebenso hat sich jedoch gezeigt, dass eine komplett portable Lösung zwar technisch möglich ist, jedoch durch ihre besonderen Anforderungen sehr zeitaufwändig in der Entwicklung sind. Um auf das Potential der Schul-TPC dennoch möglichst schnell zugreifen zu können, hat sich das Konzept des Demonstrationsdetektors etwas verändert. So ist es sowohl kurzfristiges als auch langfristiges Ziel den Detektor im universitätsnahem Umfeld zu nutzen. Dies betrifft sowohl von der Universität besuchte oder veranstaltete öffentliche Veranstaltungen als auch den Einsatz im Lehrbetrieb oder als Demonstrationsobjekt bei Besuch von Schülerinnen und Schülern. All diese Einsatzorte bieten den Vorteil, dass die notwendigen Instrumente der Arbeitsgruppe eingesetzt werden können. In der vorliegenden Arbeit geht es um die Erweiterung des Detektors um einen Triggeraufbau, der die Funktionalität des Detektors vergrößert und ebenso neue Lernbereiche erschließen lässt. Ein weiterer Teil dieser Arbeit ist das Suchen von interessanten Inhalten, welche es Lernenden, wie zum Beispiel Studierende im Praktikum aber auch Schülerinnen und Schülern erlaubt Einblicke in die Detektorphysik zu erlangen und daran sich fachlich weiter entwickeln zu können.

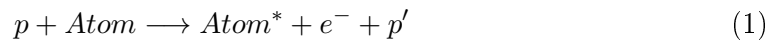


## 2 Theoretische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die theoretischen Grundlagen erläutert, welche nötig sind, um den Aufbau sowie die Wirkungsweise der Schul-TPC zu verstehen. Neben den physikalischen Grundlagen des Gasdetektors wird hierbei ausführlicher auf die Eigenschaften sowie Messmethoden des Timepix-Chips eingegangen. Ein weiterer Fokus liegt in der Beschreibung von Szintillatoren und deren theoretischen Hintergründe in Verbindung mit der für dieses Demonstrationsmodell gewählten Datenerfassungsmethoden.

### 2.1 Wechselwirkungen von Teilchen in Materie

Damit man Eigenschaften von Teilchen messtechnisch erfassen kann, müssen diese mit Materie wechselwirken. Dies geschieht durch viele verschiedene Arten von Wechselwirkungen, wobei unterschiedliche Detektoren sich verschiedene Wechselwirkungen zu nutze machen, um aus diesen Rückschlüsse auf Art oder Eigenschaft der detektierten Teilchen zu ziehen. Bei der Schul-TPC handelt es sich wie eingangs beschrieben um eine Zeitprojektionskammer. Diese nutzt in erster Linie die Wechselwirkung der Ionisation, um Teilchen zu detektieren. Sie gehört neben der Anregung der Atome zu den elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen geladenen Teilchen und Materie. Besitzt ein Teilchen  $p$  ausreichend Energie, kann es bei Stoßprozessen genügend Energie auf das atomare Elektron übertragen, damit dieses das Atom verlassen kann:



Ein Resultat der Ionisation ist ein Elektron-Ion-Paar, dessen Elektron, falls es genügend Energie hat weitere Atome ionisieren oder anregen kann. Beim ersten freigesetzten Elektron spricht man vom Primärelektron, das durch weitere Ionisation freigesetzte Elektron wird Sekundärelektron genannt.

Unter anderem durch den Prozess der Ionisation verliert das Teilchen beim Durchgang durch Materie Energie. Die Höhe des Verlusts ist abhängig von der Geschwindigkeit aber auch von der Materie, in welcher sich das Teilchen bewegt. Eine Beschreibung des Energieverlusts pro Wegstrecke ist mit Hilfe der Beethe-Bloch-Formel möglich [6]:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \rho \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} - \frac{C(\beta\gamma, I)}{Z} \right] \quad (2)$$

- $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0,307 \text{ MeV cm}^2 / \text{mol}$
- $z, \beta$  Ladungszahl und Geschwindigkeit des Projektilteilchens
- $Z, A$  Kernladungszahl und Massenzahl des Mediums
- $I$  mittlere Energie, notwendig zur Ionisation
- $T_{max}$  maximaler Energieübertrag auf ein Hüllenelektron

- $\delta$  Dichtekorrektur (bei hohen Energien sehr wichtig)
- $C/Z$  Schalenkorrektur (bei kleinem  $\beta$  wichtig)

Mit Hilfe dieser Formel lassen sich bei Bekanntheit des durchlaufenden Mediums sowie experimentell bestimmtem Energieverlust in Abhängigkeit der Geschwindigkeit Teilchen, identifizieren. Um die in Materie deponierte und somit verlorene Energie zu bestimmen, können Zeitprojektionskammern eingesetzt werden.

## 2.2 Funktionsprinzip einer Zeitprojektionskammer

Bei der Zeitprojektionskammer handelt es sich um ein Driftkammer-Detektor, welcher meist aus einem zylinderförmigen gasgefülltem Volumen besteht, in welchem ein homogenes elektrostatisches Feld herrscht. Dieses Feld wird durch einen Feldkäfig erzeugt, welcher sich an der Innenwand des Zylinders befindet (Abb. 2). Zusätzlich befindet sich auf der einen Seite des Gasvolumens eine Kathode und auf der gegenüberliegenden Seite eine Anode.

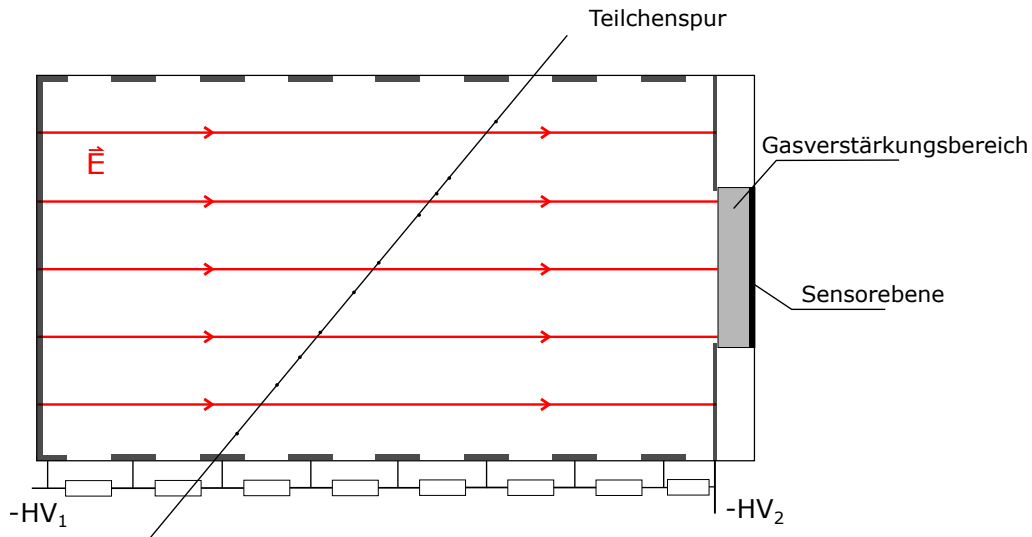


Abbildung 2: schematischer Aufbau einer TPC (vgl. [6] S.233)

Bewegt sich ein geladenes Teilchen mit ausreichend Energie durch das Gasvolumen, so kommt es aufgrund von Ionisation zur Entstehung von Elektron-Ion-Paaren. Durch das elektrische Feld werden diese beide Ladungsträger getrennt und driften auf die entsprechend gegensätzlich geladene Elektrode. Die Elektronen driften auf die Anode zu auf dessen Ebene sich die Detektor-Chips befinden. Nach Durchlaufen eines Gasverstärkungsbereichs können die Chips ein Signal detektieren. Da das Teilchen bei Bewegung durch den Detektor eine Spur von ionisierten Atomen und deren herausgelösten Elektronen hinterlässt, kann diese Spur durch das elektrische Feld auf die Sensorebene projiziert werden. Hieraus ergibt sich eine zweidimensionale Projektion der Teilchenspur. Für die dritte Raumkomponente wird die Driftzeit sowie Driftgeschwindigkeit des detektierten

Elektrons benötigt. Insbesondere für die Driftzeit aber auch um die Driftgeschwindigkeit zu bestimmen, ist eine Triggervorrichtung, wie sie in dieser Arbeit konzipiert und getestet wird, notwendig.

### 2.3 Timepix-Chip

In der Sensorebene der Schul-TPC befinden sich 4 Timepix ASICs<sup>1</sup>, welche das Detektieren der projizierten Ladungen übernehmen. Auf der Vorderseite des Timepix-Chips sind 256x256 quadratische Pixel angeordnet, welche jeweils eine Fläche von 55x55µm<sup>2</sup> einnehmen. Insgesamt wird von den Pixeln eine Fläche von 14x14mm<sup>2</sup> abgedeckt. In Abb. 3 ist der schematische Aufbau einer Timepix-Pixelzelle zu sehen.

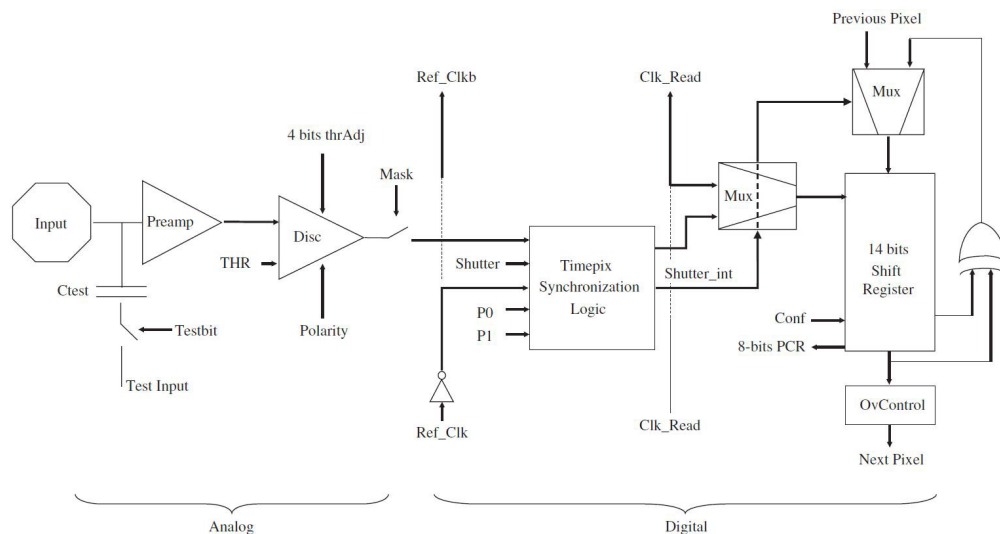


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Timepix Pixelzelle [2]

Die Pixelzelle teilt sich in einen analogen und einen digitalen Block auf. Im analogen Teil wird auf dem oktogonalen 'Bump-Bondpad' das Signal detektiert und in einem ladungsempfindlichen Vorverstärker (Preamp) verstärkt [7]. Daraufhin wird es im Diskriminator (Disc) bei Überschreiten einer Schwellenspannung (THR: Threshold), welche für den ganzen Chip eingestellt wird, in ein digitales Signal umgewandelt. Damit alle Pixel bei einem bestimmten eingestellten Schwellenwert ähnlich reagieren, besitzt jeder Diskriminator eine 4-bit Schwellenwertanpassung (Threshold Adjustment), um Fertigungstoleranzen der Pixelzellen auszugleichen. Des Weiteren befindet sich im analogen Block die Möglichkeit jede Pixelzelle mit einem externen Spannungspuls zu testen (Test Input).

Auf der digitalen Seite befindet sich die Timepix Synchronisation Logic (TSL), welche durch die Verwendung diverser Logikgatter das Signal aus dem analogen Block verarbeitet. Wichtige weitere Inputs in die TSL sind das Shutter-Signal, eine Referenz Clock

<sup>1</sup>ASIC – engl. application-specific integrated circuit. Steht für anwendungsspezifische integrierte elektronische Schaltung

(Ref-Clk) sowie die Signale P0 und P1. Das Shutter-Signal bestimmt den Beginn und das Ende der Messung, P0 und P1 bestimmen den Betriebsmodus des Chips. Aus den jeweils 2 möglichen Zuständen (High/Low) ergeben sich somit 4 mögliche Betriebsmodi. Die Referenz Clock gibt die Taktrate an. Folgende Betriebsmodi sind möglich:

- i P0=0 und P1=0: Medipix-Modus: Jedes detektierte Signal, welches über dem Schwellenwert (THR) liegt, wird gezählt.
- ii P0=1 und P1=0: ToT-Modus: Es werden die Taktzyklen gezählt, in denen das Signal über dem Schwellenwert liegt (Time over Threshold).
- iii P0=1 und P1=1: ToA-Modus: Es wird die Anzahl der Taktzyklen gezählt, welche vom Überschreiten des Schwellenwertes bis zum Ende des Shutters vergeht.
- iv P0=0 und P1=1: 1Hit-Modus: Während des Shutters wird nur das erste Signal über dem Schwellenwert erfasst.

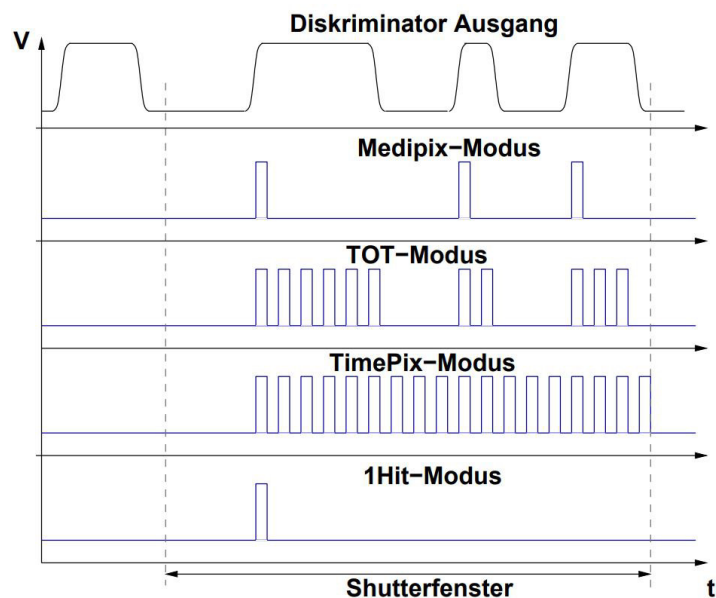


Abbildung 4: Betriebsmodi des Timepix-Chips. Darstellung der Signale im zeitlichen Verlauf [7]

In Abb. 4 sind die verschiedenen Modi dargestellt. Der Diskriminator Ausgang entspricht dem Signal aus der analogen Pixelzeileinheit und ist abhängig von den detektierten Ereignissen auf der sensitiven Pixeloberfläche und dem eingestellten Schwellenwert. Die Signale der verschiedenen Modi verdeutlichen, wann bei einem identischen Eingangssignal entsprechend des ausgewählten Modus der Zähler erhöht wird und wann nicht.

## 2.4 Gasverstärkung

Da die Ladung eines einzelnen Elektrons nicht ausreicht, um von den Pixeln des Timepix-Chips detektiert werden zu können, ist es notwendig diese Ladung zu verstärken. Hierbei sind verschiedene Herangehensweisen möglich, welche meist auf dem Effekt der Gasverstärkung basieren. Auch für die Schul-TPC wird eine solche Verstärkungsmethode genutzt. Um dies umzusetzen, wird auf dem Timepix-Chip eine Micromega-Struktur angebracht. Da diese Struktur direkt auf dem Timepix-Chip angebracht wird, spricht man hier von einem inGrid. Die gesamte Einheit des Timepix-Chips und inGrid wird GridPix genannt. InGrid besteht aus einem auf  $50\mu\text{m}$  hohen Säulen getragenen Gitter (Grid), dessen Löcher deckungsgleich mit den Pixeln des Timepix-Chips sind (Abb. 5).

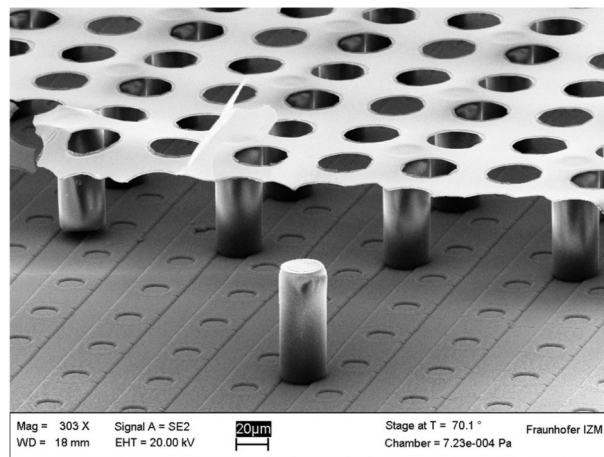


Abbildung 5: Mittels Rasterelektronenmikroskop aufgenommenes Bild eines InGrid [8]

Im Verstärkungsbereich, welcher sich zwischen Pixelebene und Gitter befindet liegt ein hohes elektrisches Feld an mit einer Stärke von  $60\text{-}100\text{kV}/\text{cm}$ . Treffen Elektronen vom Driftbereich des Gasdetektors in die Verstärkungszone, werden diese durch das elektrische Feld beschleunigt. Durch die somit erhaltene Energie können die Elektronen Atome im Verstärkungsbereich ionisieren, wodurch wiederum Elektronen freigesetzt werden und in Richtung Pixelebene beschleunigt werden. Da auch diese Sekundärelektronen weitere Atome ionisieren kann, kommt es hier zu einem Lawineneffekt. Die hieraus resultierende große Ladungsmenge kann vom Timepix-Chip detektiert werden. Das detektierte Signal ist proportional zu der Ladung, welche in den Gasverstärkungsbereich eintritt.

## 2.5 Szintillatoren

Szintillatoren sind Materialien, welche Energie durchfliegender Teilchen oder Strahlung absorbieren und durch das Emittieren von Photonen wieder abzugeben. Diese Photonen lassen sich über Photovervielfacher (Photomultiplier) verstärken und in ein elektrisches Signal umwandeln, dessen Intensität proportional zur im Szintillator deponierten Energie ist. Szintillatoren gibt es aus anorganischen sowie organischen Materialien und werden

im flüssigen Zustand oder festen Zustand verwendet. Bei den organischen Szintillatoren ist eine schnellere Reaktionszeit möglich, weswegen sie meistens für Triggersysteme eingesetzt werden. Dies gilt auch für den in dieser Arbeit geplanten Szintillationstrigger, welcher aus zwei Szintillatoreinheiten besteht. Bei den verwendeten Szintillatoren handelt es sich um organische Plastikszintillatoren, dessen genauere Zusammensetzung sowie Alter nicht bekannt ist, da es sich um einen Altbestand der Arbeitsgruppe handelt.

### 2.5.1 SiPMs

Für die Detektion der im Szintillator erzeugten Lichtblitze werden Photomultiplier eingesetzt. Diese können einzelne Photonen in messbare Signale umwandeln. Im Szintillationsaufbau für die Schul-TPC wird diese Verstärkung von Siliziumphotomultipliern (SiPM) ausgeführt. Diese bestehen aus einer Reihe von Avalanche-Photodioden (APD). In APDs wird die Verstärkung in Halbleitern erreicht, indem in einer Hochfeldzone ähnlich zu der Gasverstärkung (Abschnitt 2.4) das Signal lawinenartig verstärkt wird. Die APDs besitzen anders als bei normalen Photodioden eine zusätzliche pn-Grenzschicht mit einer hohen p- und n-Dotierung (Abb. 6 a)), wodurch an der Grenzschicht ein hohes elektrisches Feld erzeugt wird. Die im dicken, schwächer dotierten n-Bereich durch Absorption einfallender Photonen erzeugten Signalelektronen können in diesem Hochfeldbereich durch den genannten Lawineneffekt verstärkt [6].

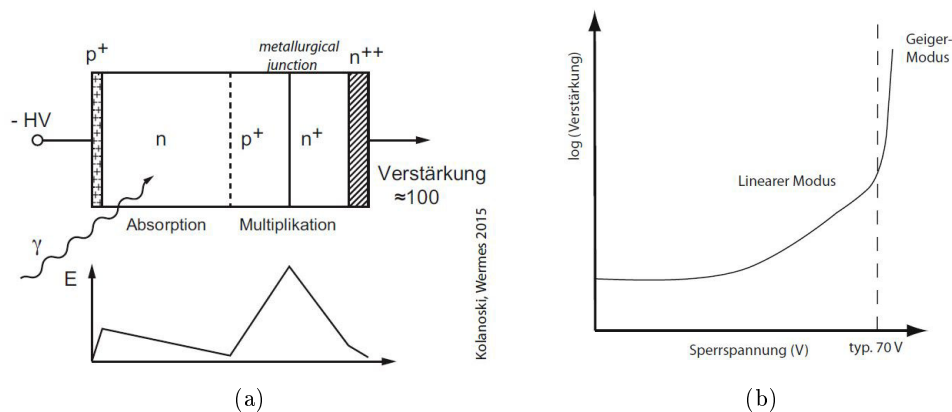


Abbildung 6: a) Dotierungsbereiche und Feldverhältnisse in einer Avalanche-Photodiode  
 b) Verstärkungsverhalten einer APD in Abhängigkeit von der angelegten Spannung ( [6] S. 423,425)

Die Verstärkung ist abhängig von der anliegenden Hochspannung und folgt dem Verlauf in Abb. 6 b). Je nach angeschlossener Spannung kann die APD in linearen Modus oder im Geiger-Modus betrieben werden.

Ein SiPM besteht nun aus einer Matrix von APDs, welche im Geiger-Modus bei einer Verstärkung von circa  $10^6$  betrieben werden. Im Geiger-Modus ist die APD ein 'binär' arbeitender Photodetektor, hat also nur zwei diskrete Signalmöglichkeiten (Photon oder

kein Photon wurde detektiert). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel innerhalb eines von der Zeitaufösung bestimmten Zeitfensters von zwei Photonen getroffen wird, ist sehr gering, weswegen davon ausgegangen wird, dass die Anzahl der getroffenen Pixel der Anzahl der auf den SiPM auftreffenden Photonen entspricht [6]. Da alle APD-Zellen über jeweils einen Widerstand zusammenschaltet werden (parallel), ist das Ausgangssignal auch proportional zu der Anzahl der eingefangenen Photonen. Im Idealfall sollten man nur solche Signale erhalten, welche vielfache eines einzeln detektierten Photons entspricht. Dies ist in Abb. 8 zu sehen. Die Bezeichnung p.e. bedeutet hierbei 'Photoelektronen' entspricht also der Anzahl der Photonen, welche im Absorptionsbereich des APDs ein Photoelektron auslösen können.

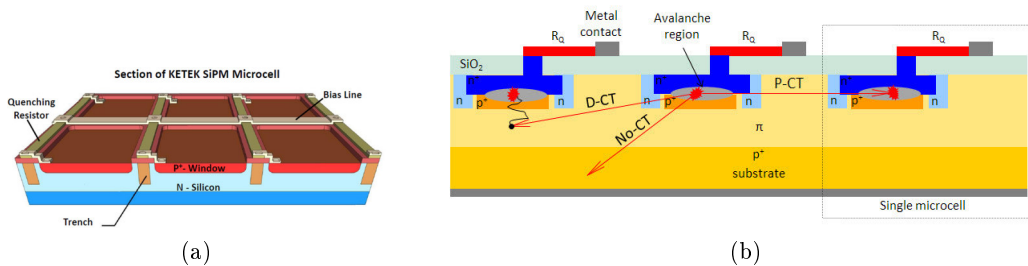


Abbildung 7: a) Matrix der APDs [9] b) Crosstalk zwischen benachbarten APDs [10]

Das Ausgangssignal kann aber auch verfälscht werden insbesondere durch den sogenannten Crosstalk. Dieser beschreibt den Effekt, dass ein Photon, welches aus einer Verstärkungszone emittiert wird, in einer benachbarten APD einen Lawineneffekt auslöst und somit ein zusätzliches simultanes Signal erzeugt wird (siehe Abb. 7). Dies kann entweder auf direktem Weg (P-CT: 'prompt cross talk') oder durch einen erzeugten Ladungsträger in der Nähe der Verstärkungszone einer anderen APD verursacht werden (D-CT: 'delayed cross talk'). Beides führt zu einem falschen Signal, welches durch kein externes Photon ausgelöst wurde. Des Weiteren wird das Ausgangssignal durch sogenannte Afterpulse verfälscht, welche durch im Silizium kurzzeitig gefangene Ladungsträger verursacht werden. Diese Verzögerung führt zu einem zweiten Signal in der selben Zelle.

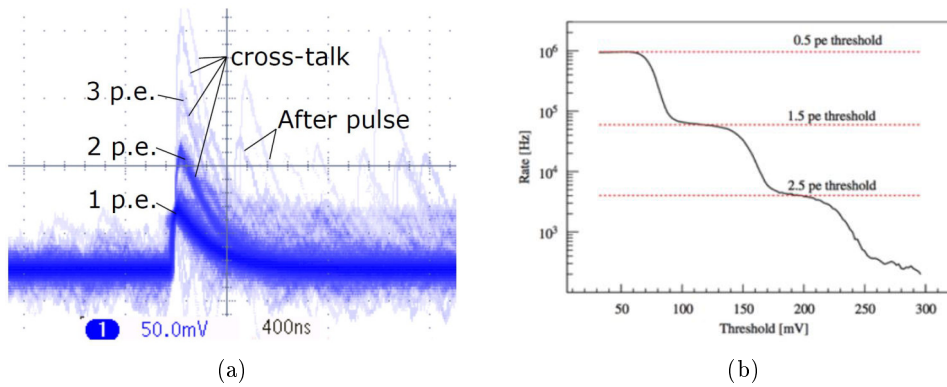


Abbildung 8: a) Ausgangssignal eines SiPM ( [11] S.23) b) Dunkelrate eines SiPMs bei unterschiedlichen Schwellenwerten [10]

Um das Signal von den eben aufgeführten Rauschquellen zu bereinigen, werden Dunkelmessungen genutzt, wodurch bestimmt werden kann ab wann das Rauschen der SiPMs abnimmt. Eine solche Messung ist in Abb. 8 b) zu sehen. Die für SiPMs typische Treppenstufenform der Messwerte lässt Rückschlüsse auf die Höhe der einzelnen Photoelektronensignale zu. Um diese zu bestimmen, wird die Frequenz der auftretenden Signale in Abhängigkeit einer Schwellenspannung, die vom Signal überschritten werden muss, bestimmt.

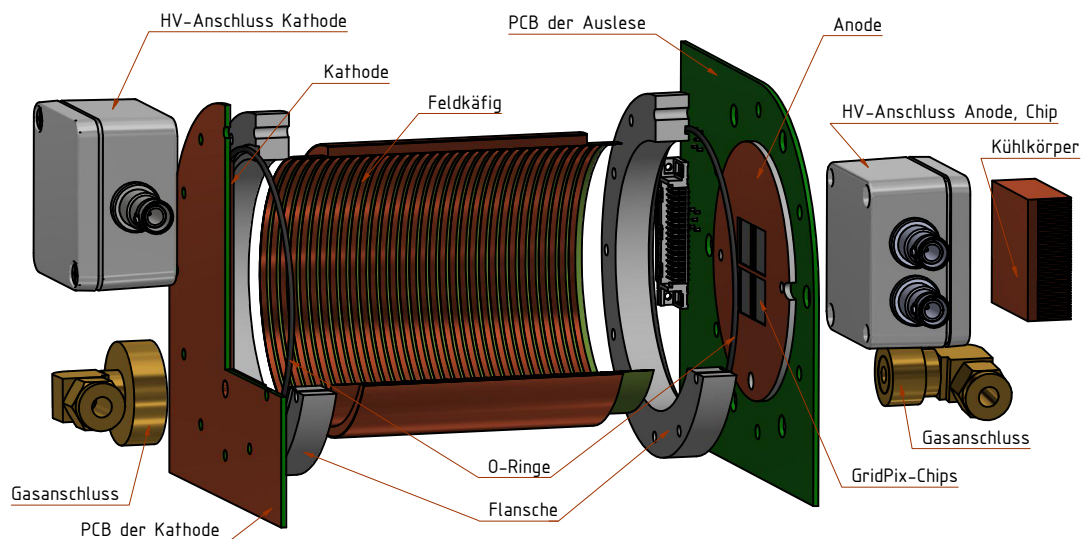


### 3 Aufbau

Die Schul-TPC wurde im Zuge dieser Arbeit durch die Möglichkeit zwei Szintillationsdetektoren anzubringen erweitert. Dies ermöglicht den Messbetrieb von den erwähnten ToA-Messungen bietet aber ebenso viele Ansätze, um Prinzipien von digitaler Mess- und Auswertetechnik zu demonstrieren. Wie eingangs erwähnt, war das Schaffen und Finden dieser Möglichkeiten mitunter Ziel der vorliegenden Arbeit. In den folgenden Abschnitten wird der komplette Aufbau der Zeitprojektionskammer geschildert, wie er in einem möglichen Praktikumsversuch verwendet werden könnte. Die Entwicklung der Szintillationsdetektoren sowie deren Verarbeitungselektronik wird genauer beschrieben.

#### 3.1 Detektor

Der Schematische Aufbau des Detektors ist in Abb. 9 zu sehen. Er hat eine ungefähre Länge von 20cm bei ähnlicher Höhe und Breite. An den zylinderförmigen Feldkäfig, welcher durch weitere Schichten von einer Honigwabenstruktur sowie Kupfer-Kapton-Folie Stabilität erlangt, sind beidseitig Flansche angeklebt, welche das Anbringen der Kathode sowie des Auslese-PCBs<sup>2</sup> ermöglicht.



(a)

Abbildung 9: Aufbau der Schul-TPC

Auf dem Board der Auslese befindet sich auf der Seite des Gasvolumens die aufgeschraubte Anode mit vier Ausfräsungen, welche Deckungsgleich mit der aktiven Fläche von vier GridPix-Chips sind. Auf der Rückseite ist ein Kupferkühlkörper auf Höhe der Chips aufgelötet, um mittels passiver Kühlung die im Gridpix während des Messbetriebs

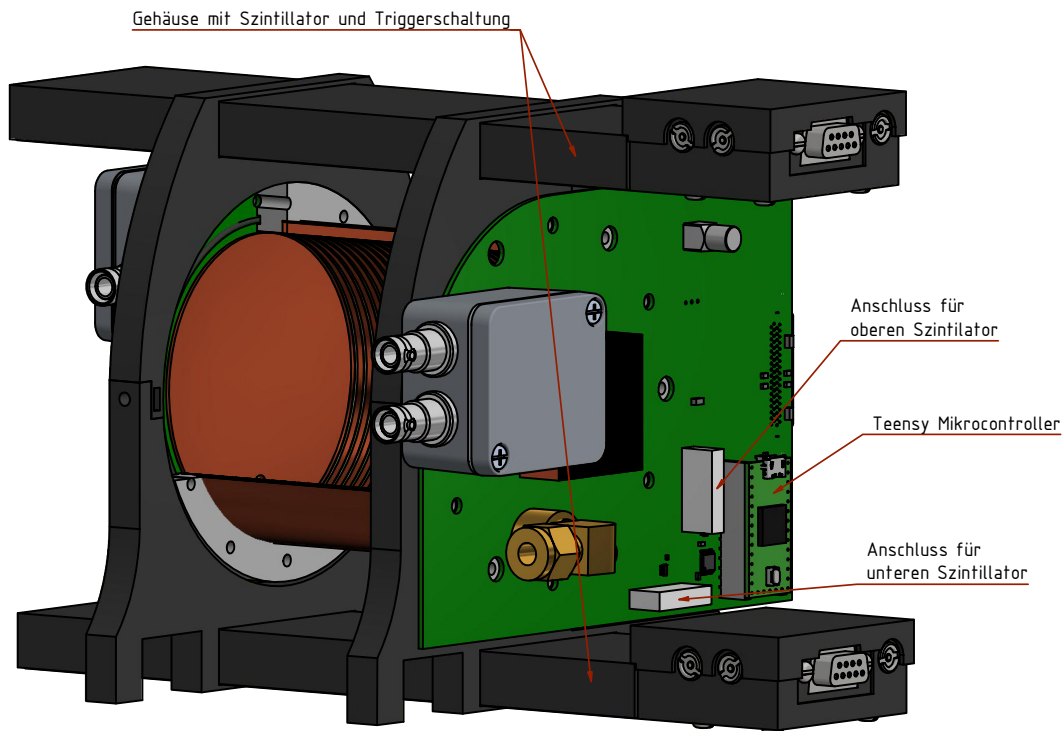
<sup>2</sup>PCB: Printed Circuit Board

entstehende Wärme abzuleiten.

Für den Anschluss der benötigten Hochspannungen, sind auf beiden Seiten des Detektors Aluminiumdosen angebracht, welche durch entsprechende eingeschraubte Stecker für die Verbindung mit SHV-Kabeln<sup>3</sup> ausgelegt sind. Ebenso auf beiden Seiten befindet sich jeweils ein Swagelok Gasanschluss für die Durchflutung des Detektorvolumens.

### 3.2 Szintillatoren

Die Szintillatoren sollen eine optionale Erweiterung des Detektoraufbaus anbieten und somit nicht fest und unwiderruflich mit dem Zeitprojektionskammer verbunden sein. Hierzu wurde eine Halterung für die beiden Szintillatoren entworfen, welche sich wie eine Klammer an den beiden Flanschen der TPC montieren lässt Abb. 10.



(a)

Abbildung 10: Schul-TPC mit angebrachten Szintillatoren

Auf halber Höhe werden die beiden Klammern mit insgesamt vier Schrauben arretiert. Die Szintillatoren lassen sich in den Halterungen mit leichtem Druck in Längsrichtung des Detektors verschieben, um zum Beispiel mittig über dem Gasvolumen zu liegen. Mit dieser Art des Anbringens des Scintillatorhodoskops kann sowohl die Übersichtlichkeit

<sup>3</sup>SHV: Safe High Voltage

des Detektors gewahrt werden als auch das unsensible und rückstandslose An- und Abmontieren gewährleistet werden. Sowohl die Gehäuse der Szintillatoren selbst, als auch die Halterung wurde im 3D-Druck-Verfahren hergestellt. Dies hatte zum einen in der Entwicklung den Vorteil, dass in kurzer Zeit Prototypen angefertigt werden konnten, um die Stabilität der Halterung oder andere mechanischen Eigenschaften zu testen. Ebenso bietet es die Möglichkeit, in relativ kurzer Zeit mit Hilfe der bereits gezeichneten Halterung weitere Aufbauten oder Modifikationen zu gestalten. Ein weiterer Vorteil vor allem für den Messbetrieb ist die geringe Absorption ionisierender Teilchen, welche im Detektorvolumen erfasst werden sollen insbesondere im Vergleich zu einer Aluminiumbox ist dies ein Vorteil. Die Bauteile wurden aus dem sehr gängigem 3D-Druck-Material PLA (Polyactide) hergestellt. Der verwendete 3D-Drucker war ein Ender 3 Pro der Firma Creality mit einer Horizontalen Druckgenauigkeit von  $\pm 0,1\text{mm}$  [12]. Die Vertikale Auflösung beträgt ebenfalls  $0,1\text{mm}$ . Die Herstellung der finalen Elemente benötigte eine Druckzeit von etwa 24 Stunden. Sämtliche Druckerzeugnisse aus PLA weisen eine sehr gute Recyclingfähigkeit auf.

In der aktualisierten Version des Ausleseboards befindet sich nun auf der Rückseite ein Mikrocontroller sowie Auswerteelektronik (siehe Abschnitt 3.3), welche für die Scintillationdetektoren notwendig sind und für das Generieren eines Shuttersignals im getriggerten Messmodus zuständig sind. Ebenso befinden sich hier zwei 8-polige Stiftleisten, welches über ein Kabel mit entsprechender Buchse die Verbindung zwischen Auslese-PCB und Szintillatoren herstellt.

### 3.2.1 Mikrocontroller

Bei dem für die Schul-TPC verwendeten Mikrocontroller handelt es sich um einen Teensy 4.0 des Herstellers PJRC [13]. Es handelt sich hierbei um einen über die Entwicklungsplattform 'Arduino IDE' programmierbaren Mikrocontroller, welcher einige Vorteile mit sich bringt.

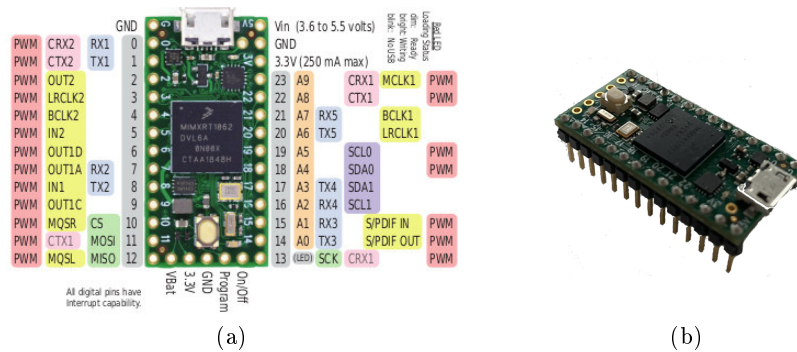


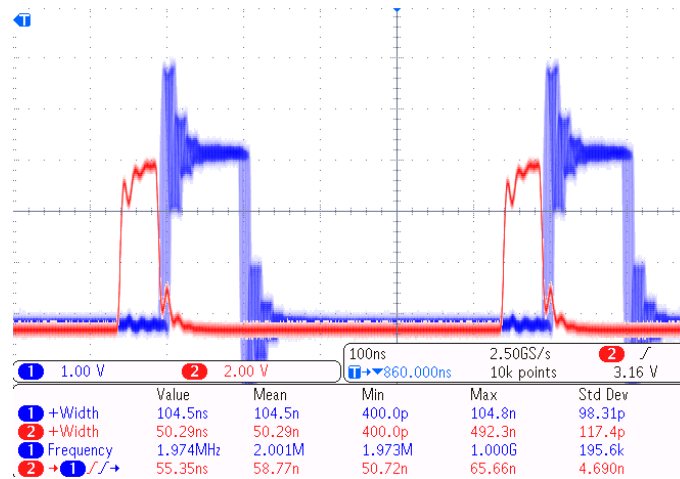
Abbildung 11: Teensy 4.0 Mikrocontroller: a) Pinout [13] sowie b) Seitenansicht

Zum einen bietet er eine sehr große Anzahl an digitalen Ein- und Ausgängen (40 Pins),

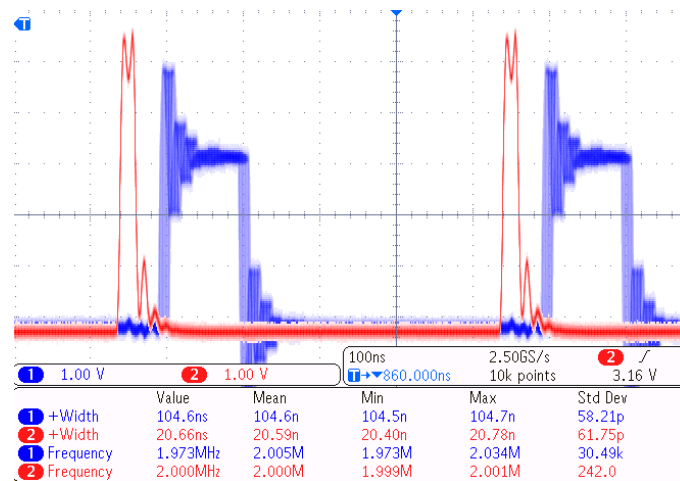
was insbesondere bei einer hohen Anzahl von Messkanälen (in diesem Aufbau 4 SiPMs) viele Möglichkeiten schafft. Zum Beispiel können die Koinzidenzen mehrerer Kanäle betrachtet werden. Auch bei der Verwendung des I2C-Protokolls ist die gute Konnektivität des Teensys ersichtlich. So bietet er die Anschlüsse für 3 separate I2C-Kanäle. Dies hat vor allem dann einen Vorteil, wenn mit mehreren ICs mit der gleichen Adresse kommuniziert werden soll. Dies ist hier der Fall, da die beiden Szintillatoreinheiten den identischen Aufbau haben und für ein mögliches Vertauschen auch die gleichen Adressen zugewiesen bekommen. Dies erleichtert neben der erhöhten Übersichtlichkeit auch das Designen und Herstellen der Boards. Einer der wichtigsten Gründe, welche für den Teensy 4.0 als Mikrocontroller sprechen, ist die sehr hohe Taktung des Prozessors von 600MHz. Damit gilt er als einer der schnellsten Mikrocontroller auf dem aktuellen Markt. Im Vergleich hierzu hat der sehr verbreitete Arduino Nano nur eine Taktfrequenz von 16MHz. Aus der hohen Taktfrequenz des Teensys ergibt sich sowohl eine sehr schnelle Reaktionsgeschwindigkeit auf externe Signale ebenso wie die hohe zeitliche Auflösung von ausgegebenen Signalen. Die hohe Reaktionsgeschwindigkeit ist sehr wichtig für das Betreiben eines Szintillationstriggers, wie er in dieser Arbeit geplant wurde. Die Alternative zum Mikrocontroller wäre ein FPGA<sup>4</sup>, der durch parallele Datenverarbeitung noch höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten erlaubt, jedoch in der Programmierung deutlich komplexer und zumindest für ungeübte unflexibler ist. Damit ein Mikrocontroller jedoch die Generierung eines Triggersignal sinnvoll übernehmen kann, ist die tatsächliche Reaktionsgeschwindigkeit von großer Bedeutung. Bei einer ungefähren Driftgeschwindigkeit von 1cm pro Mikrosekunde, würden schon Verzögerungen im Mikrosekundenbereich zu einem erheblichen Verlust an Messpunkten verloren gehen, da der Shutter zu spät auslöst und die zu detektierenden Elektronen sich bereits einige Zentimeter bewegt haben. Insbesondere in dem hier verwendeten Detektorvolumen mit einer Driftlänge von 10cm würde dies deutliche Effekte auf die Messergebnisse haben. Um die Geschwindigkeit und Genauigkeit des Teensys zu testen wurden mehrere Messungen mit Hilfe eines Signalgenerators und einem Oszilloskops durchgeführt.

---

<sup>4</sup>FPGA: Field Programmable Gate Array



(a)



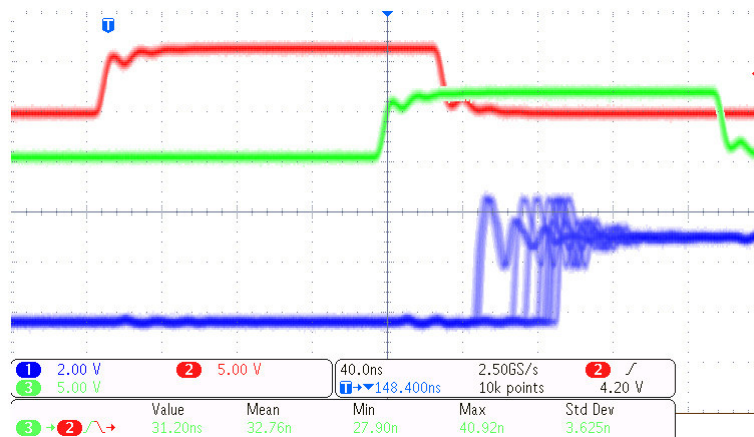
(b)

Abbildung 12: Reaktion auf ein Eingangssignal. a) Eingangssignal (rot) hat eine Länge von 20ns, b) Eingangssignal hat eine Länge von 50ns.

Für die Messungen wurde die ein optimierter Minimalcode verwendet. Auch, wenn dies die schnellsten Reaktionszeiten des Mikrocontrollers hervorruft, kann es ohne einer Verlängerung der Reaktionszeit in einen komplexeren Code wie er für dieses Projekt erstellt wurde integriert werden. Im ersten Test reagiert der Teensy auf ein Eingangssignal indem er möglichst schnell daraufhin ein Signal mit definierter Länge an einem zweiten Pin ausgibt. Die Reaktionszeit wurde durch die zeitliche Differenz der steigenden Flanken des Eingangs- sowie Ausgangssignals bestimmt (Abb. 12 a)). Diese lag zwischen 50,72ns und 65,66ns. Diese Reaktionsgeschwindigkeit entspricht bei der angenommenen Driftgeschwindigkeit von  $1\text{cm}/\mu\text{s}$   $0,59\text{mm}\pm 0,07\text{mm}$ . Dies ist für die angedachten Zwecke der Schul-TPC deutlich ausreichend. Ebenso zeigte sich, dass es möglich war Pulse von einer Länge von nur 20ns zuverlässig zu detektieren (siehe Abb. 12 b)). Die Frequenz des

vom Signalgenerator erzeugten Eingangssignals betrug 2MHz, was auch der Frequenz des Ausgangssignals entsprach. Die von Oszilloskop erfassten Schwankungen der Frequenz lassen sich auf die Schwankungen der Reaktionsgeschwindigkeit des Mikrocontrollers zurückführen. Im Code wird eine Schleife durchgeföhren, welche zu leicht unterschiedlichen Zeitpunkten von einem Eingangssignal unterbrochen werden kann, dies begründet die unterschiedlichen Reaktionszeiten. Auch die Länge der Ausgangssignale kann mit dem Teensy mit einer Schwankung von lediglich 0,1ns ausgegeben werden. Die Länge des Signals kann auf einen einzelnen Taktzyklus des Mikrocontrollers eingestellt werden. Bei 600MHz entspricht dies ca. 1,67ns. Diese Genauigkeit, die hier im ausreichendem Maße gegeben ist, ist ebenso wichtig für eine möglichst exakte Rekonstruktion der Teilchenspür.

Eine weitere Aufgabe des Mikrocontrollers soll es sein ein Signal mit definierter Länge auszugeben, nachdem eine Koinzidenz zweier Eingangssignale detektiert wurden. Um diese Funktion zu testen, wurden von Signalgenerator zwei sich überlappende Rechtecksignale generiert.



(a)

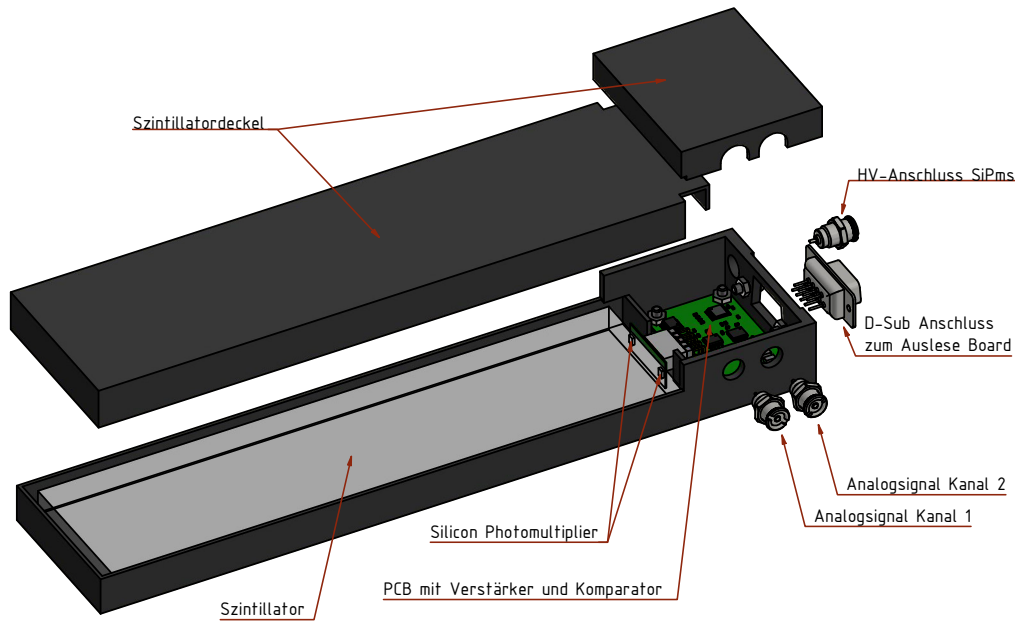
Abbildung 13: Generiertes Ausgangssignal (blau) nach erfassten Koinzidenz. Reaktion auf 31ns Überschneidung der 180ns langen Eingangssignale.

Die Koinzidenz der beiden Eingangssignale konnten ab einer Überlappung von 31ns zuverlässig erfasst werden. Mit einer Reaktionszeit von  $80\text{ns} \pm 18\text{ns}$  konnte daraufhin das Ausgangssignal, was in der späterem Verwendung dem Triggersignal entspricht, ausgegeben werden. Auch hier kommt es wieder zu einer Streuung der Reaktionszeit aus den oben genannten Ursachen im Programmcode.

### 3.2.2 Szintillatorgehäuse

Wie im Abschnitt 3.2 beschrieben, besteht der Triggeraufbau aus zwei identischen Szintillationseinheiten. Diese beinhaltet den eigentlichen Szintillator, das PCB mit der si-

gnalverarbeitenden Elektronik sowie zwei SiPMs. Das Gehäuse besteht aus drei gedruckten Teilen, welche aufeinander gesteckt werden. Zu den Anschlüssen zählen zwei Lemo-Buchsen für die Analogsignale der Vorverstärker beider SiPMs, sowie eine weitere Lemo-Buchse, an welche die Hochspannung für die SiPMs angeschlossen wird. Da die benötigte Hochspannung nur ungefähr  $-57\text{V}$  beträgt, sind die hier ausgewählten Lemo-Stecker sicherheitstechnisch unbedenklich. Für die Verbindung zum PCB der Auslese wurde eine D-Sub-Verbindung mit neun Pins gewählt.



(a)

Abbildung 14: Aufbau der Szintillationsdetektoren

Alle Komponenten befinden sich in der unteren Schale. Das PCB ist mit vier Schrauben und Muttern an dieser fixiert. Die beiden SiPMs sind auf einem kleinen Board verlötet, welches an das PCB mit Verstärker und Komparator aufgesteckt werden kann. Der Szintillator wird an die SiPMs heran gedrückt und durch Zwischenlegen von Abstandshalter am gegenüber liegenden Ende fixiert. Für Szintillationsdetektoren ist es besonders wichtig, dass ausschließlich Licht, welches im Szintillator erzeugt wird auch von den Photosensoren erfasst wird. Somit ist es von großer Wichtigkeit, dass kein Umgebungslicht in das Gehäuse eindringt. Hierzu überlappen sich die ineinander gesteckten Plastikteile mindestens  $1\text{cm}$ . Ebenso sind die Anschlüsse so ausgewählt, dass sie das Gehäuse Lichtdicht abschließen.

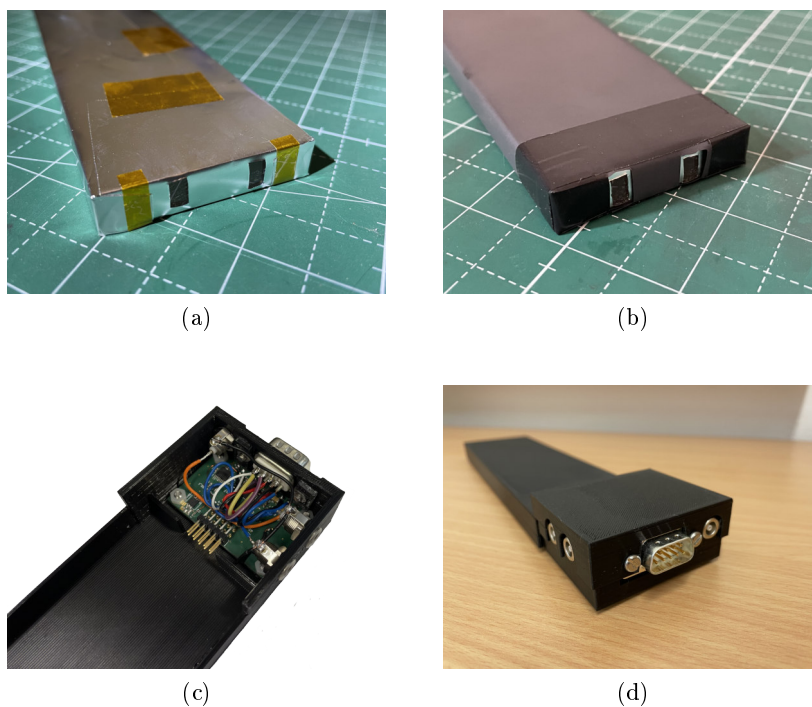


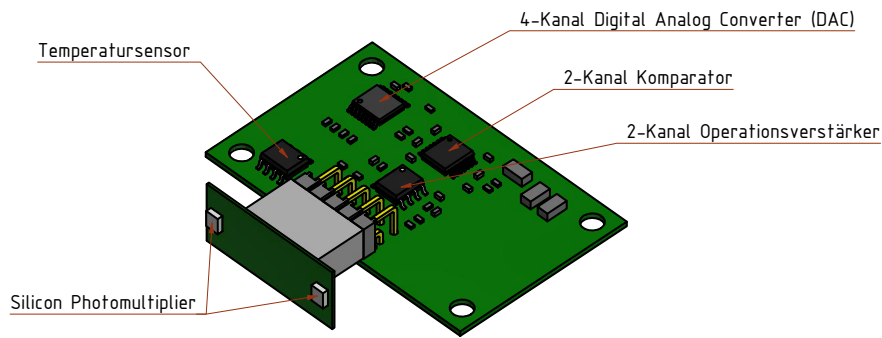
Abbildung 15: a) Die erste Lage der Verpackung des Szintillators besteht aus Aluminiumfolie, b) die äußere Lage ist eine schwarze Kunststoffolie. An der späteren Position der SiPM wurden kleine Rechtecke ausgespart, um den potenziellen Lichteinfall zu minimieren. c) Die Stecker wurden mit kurzen Kabelstücken mit dem PCB verbunden. d) Frontalansicht einer Szintillatoreinheit in geschlossener Form.

Auch direkt am Szintillator wird versucht das Einfangen von Umgebungslicht zu minimieren. Dies geschieht durch das Einpacken des Szintillators in eine Lage Aluminiumfolie (Abb. 15 a)) sowie einer weiteren Lage Kunststoffolie (Abb. 15 b)). Die Aluminiumfolie hat eine stark reflektierende Seite, welche direkt auf der Szintillatroroberfläche aufliegt. Dies führt dazu, dass Photonen hieran reflektiert werden und, anstatt den Szintillator zu verlassen, die Möglichkeit besitzen von den SiPMs detektiert werden zu können. Die zweite Lage erhöht die Lichtdichtigkeit durch das Absorbieren von Umgebungslicht.

### 3.2.3 Szintillator PCB

Das Ausgangssignal der SiPMs muss wegen der kurzen Reichweite der analogen Signale möglichst nah an den Photodioden in ein digitales Signal umgewandelt werden. Dies übernimmt die hierfür konstruiert Leiterplatte (Abb. 16). Zu den verbauten Elementen gehört ein Operationsverstärker, ein Komparator, ein Digital-Analog-Umwandler (DAC) sowie ein Temperatursensor.





(a)

Abbildung 16: Elemente des SiPM-PCB

### 3.2.4 Silizium Photomultiplier

Bei den verwendeten SiPMs handelt es sich um den Typ S13360-1375PE des Herstellers Hamamatsu [14], sie besitzen eine photosensitive Fläche von 1,3mm x 1,3mm, mit 285 Pixeln, die mit einem jeweiligen Abstand von 75µm zueinander platziert sind. Sie sind auf den Wellenlängenbereich von 320nm bis 900nm ausgelegt mit einer maximalen Sensitivität bei 450nm. Die empfohlene Betriebsspannung beträgt -54,41V.

### 3.2.5 Operationsverstärker

Für eine Verarbeitung des Signals der Silizium Photomultiplier muss dieses zunächst verstärkt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Operationsverstärkers, welcher in Verbindung mit einem Widerstand ( $R_F$ ) als Transimpedanzverstärker das Signal verstärkt (Abb. 17). In einem idealen Schaltkreis lässt sich der Verstärkungsfaktor wie folgt berechnen [11]:

$$G = \frac{V_{out}}{I_{SiPM}} = -R_F \quad (3)$$

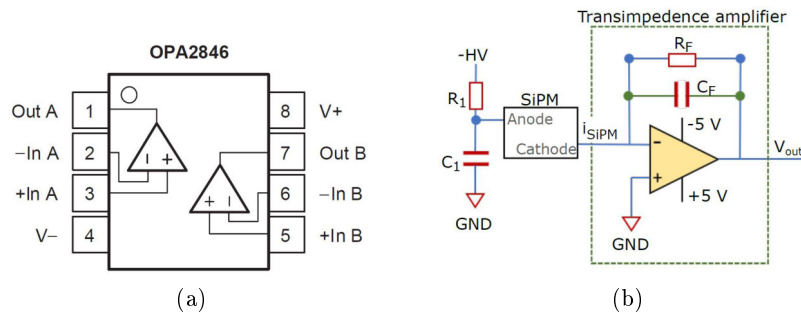


Abbildung 17: a) Schematischer Aufbau des Operationsverstärkers OPA2846 [15] b) Schaltkreis des Transimpedanzverstärkers [11]

Aufgrund von Kapazitäten des SiPM und durch Verbindungen entstehend, wird parallel zum Widerstand ein Kondensator angeschlossen, um diese zu kompensieren. Diese Art des Verstärkers wurde in der Masterarbeit von Divya Pal untersucht und bietet die Vorteile, dass wenige Bauteile verwendet werden müssen, woraus auch eine platzsparende Verstärkungsschaltung resultiert ([11] S. 57). Der verwendete Operationsverstärker ist vom Typ OPA2846 und besitzt zwei Kanäle. Somit kann ein Bauteil die Signale beider SiPMs gleichzeitig verstärken. Für die Verstärkung sind sowohl +5V als auch -5V angeschlossen.

### 3.2.6 Weitere Bauteile des SiPM-Boards

Das verstärkte Signal der SiPMs wird nun mittels eines Komparators in ein digitales Signal umgewandelt. In diesem Projekt wurde der Komparator MAX9202 verwendet, welcher ebenfalls für den zweikanaligen Betrieb ausgelegt ist (Abb. 18 a). Der Komparator vergleicht die Höhe des Eingangssignals (hier vom SiPM kommend) mit einer Schwellenspannung (Threshold), die an einem zweiten Pin angelegt ist. Liegt das Eingangssignal über der Vergleichsspannung, zieht der Komparator das im Normalzustand auf 5V liegende Signal für eine definierte Länge am entsprechenden Ausgang des Kanals auf 0V. Die Länge des Ausgangssignals kann bei jedem Kanal getrennt eingestellt werden, indem eine entsprechende Spannung am Pin 'Latch' angelegt wird. Für diesen Aufbau wird die Länge des ausgegebenen Pulses auf  $150\mu s$  gestellt indem über einen Spannungsteiler 2,5V an beiden Latch-Pins anliegen.

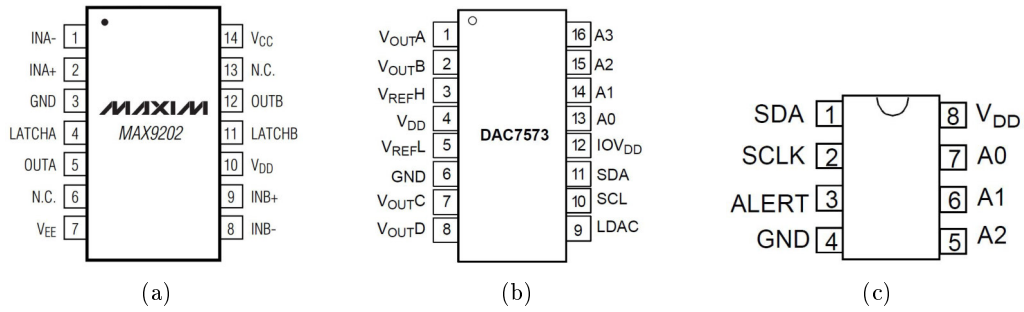


Abbildung 18: Weitere Bauteile auf dem PCB der Szintillatoren. a) Komparator [16], b) Digital-Analog-Wandler [17], c) Temperatursensor MCP9801 [18]

Damit die Schwellenspannungen für die beiden Kanäle des Komparators variiert werden können, befindet sich auf der Platine ein Digital zu Analog Wandler (DAC<sup>5</sup>). Hierbei handelt es sich um den Typ DAC7573, ein 4 Kanal DAC mit einer Auflösung von 12bit. Der Chip besitzt jeweils einen Eingang für den oberen Referenzwert ( $V_{REFH}$ ) sowie für den unteren Referenzwert ( $V_{REFL}$ ), welche das Spannungsintervall bestimmen, auf welches die 4 Kanäle eingestellt werden können. In dem Aufbau für die Schul-TPC wird für der Pin  $V_{REFL}$  auf Erde gezogen (0V), die obere Referenzspannung wurde mittels eines Spannungsteilers auf 2,44V gelegt. Die Auflösung von 12bit entspricht einer Unterteilung des Spannungsintervalls auf 4096 äquidistante Spannungsschritte. Dies führt zu einer möglichen Einstellgenauigkeit von 0,6mV. Die Kommunikation zwischen Chip und Mikrocontroller findet über das I2C-Protokoll statt. Dies führt zu einer sehr geringen Anzahl an benötigten Signal-Pins (SDA, SCL). Über das Protokoll lässt sich jedem der vier Kanäle ein Wert (D) zuschreiben. Die Ausgangsspannung lässt sich mit folgender Formel bestimmen (Quelle 5):

$$V_{OUT} = V_{REFL} + (V_{REFH} - V_{REFL}) \times \frac{D}{4096} \quad (4)$$

$$V_{OUT} = V_{REFH} \times \frac{D}{4096} \quad (5)$$

Der vierte Chip auf der Leiterplatte ist ein Temperatursensor vom Typ MCP9801. Dieser besitzt eine Genauigkeit von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  und wurde verbaut, um in der weiteren Entwicklung der Szintillationseinheit die Möglichkeit zu haben, temperaturabhängige Effekte zu bestimmen und daraus Kalibrierungen für ein temperaturabhängiges Einstellen der an den SiPMs anliegenden Hochspannung. Auch bei diesem Chip wird das I2C-Protokoll verwendet. Da die Signale hier parallel zu denen des DACs geschaltet werden, werden keine zusätzlichen Verbindungen zum Auslese-PCB benötigt.

<sup>5</sup>DAC: Digital Analog Converter

### 3.3 Signalweg und Datenverarbeitung

Das Signal, welches in den beiden SiPMs erzeugt wird, wird also zuerst vom Operationsverstärker verstärkt. Daraufhin wird, wenn das Signal über der vom DAC eingestellten Vergleichsspannung liegt, der entsprechende Ausgang des Komparators für 150µs von 5V auf 0V gezogen. Die Referenzspannung des DACs wird über den Mikrocontroller, welcher mit dem DAC kommuniziert, geregelt. Die Ausgangssignale des Komparators werden nun auf das Auslese-PCB geleitet. Für die flexible Auswertung des Signals, sind hier verschiedene Signalwege vorgesehen (Abb. 19).

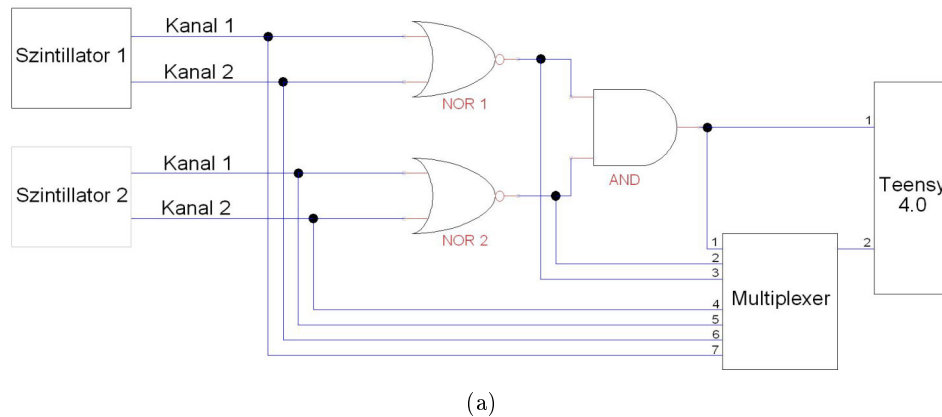


Abbildung 19: Schematischer Schaltplan der Signalwege

Wie in Abschnitt 2.5.1 beschrieben, handelt es sich bei dem Ausgangssignal der SiPMs vor allem im niedrighschwelligem Rauschbereich um ein hochfrequentes Signal, dessen charakteristischer Verlauf einer Treppenfunktion ähnelt. Um dieses Verhalten zu untersuchen und daraus die Verbindung zwischen Schwellenspannung und Anzahl der detektierten Photoelektronen zu erhalten, muss der Mikrocontroller in der Lage sein ein entsprechend hochfrequentes Signal zu erfassen. Dies ist bei den meisten Mikrocontrollern wie auch bei dem hier verwendeten Teensy 4.0 nur an einem einzelnen Eingangspin möglich. Um dennoch alle vier Kanäle sowie die Koinzidenzen dieser Kanäle mit einer derartigen Messung zu untersuchen, ist auf dem PCB der Auslese ein 8-Kanal Multiplexer angebracht. Dieser ermöglicht das Auswählen der 4 verschiedenen SiPM-Kanäle, der Koinzidenz der SiPMs (NOR1, NOR2) an einem Szintillator sowie die Koinzidenz aller vier Kanäle (AND-Gatter). Da die Koinzidenz aller vier Kanäle später als Trigger verwendet werden soll (ohne Frequenzmessung), ist dieser zusätzlich mit einem separaten Pin des Mikrocontrollers verbunden.

#### 3.3.1 Mikrocontroller-Code

Um das eben angesprochene Verhalten der einzelnen SiPM-Signale bei verschiedenen Schwellenspannungen zu analysieren, wurde im Zuge dieser Arbeit ein Programm geschrieben, welches auf dem Teensy 4.0 laufen wird und das Einstellen aller Werte so-

wie das Auslesen der Signale übernimmt. Ein ähnlicher Code wurde für von Fabian P. Schmidt für den Arduino Nano programmiert. Auch wenn viele Funktionen die gleichen sind, wurde für diese Arbeit ein neuer Code verfasst. Zum einen, da sich Unterschiede aus der anderen Hardwarewahl ergeben (zum Beispiel wurde ein anderer DAC verwendet mit anderem Kommunikationsprotokoll), zum andern, um einen möglichst einfachen Code zu erstellen, der nur die nötigsten Funktionen beinhaltet. So ist der Code für eine erhöhte Übersichtlichkeit um einige automatische Abläufe gekürzt worden. Dies bietet sich insbesondere für den Praktikumsversuch an, da die Studierenden mit dem Code arbeiten können sowie einzelne Auswertungsaufgaben (wie die Umrechnung des Thresholdwertes in Photoelektronen) durch ein händisches Ausführen besser verstehen lernen. Folgende Funktionen sind implementiert:

- Einstellen des Thresholdwertes des Komparators an jedem einzelnen Kanal
- Das Aufzeichnen aller gemessenen Frequenzen bei Durchlaufen der DAC-Werte (Frequenzspektrum). Hier kann die Schrittweite festgelegt werden sowie die Länge des Intervalls, in welchem die Frequenz bestimmt wird
- Das Aufzeichnen des Frequenzspektrums bei Berücksichtigung der Koinzidenzen der zwei SiPMs an einem Szintillator
- Das Aufzeichnen des Frequenzspektrums bei Berücksichtigung der Koinzidenzen aller vier SiPMs
- Das Ausgeben der Temperatur am oberen oder unteren Szintillator
- Das Zählen von Koinzidenzen an einem oder beiden Szintillatoren bei festgelegtem Threshold zur Bestimmung der Ereignisrate
- Das manuelle Auswählen der einzelnen Multiplexerkanäle für eine Untersuchung der Signale am Oszilloskop
- Die Ausgabe aller eingestellten Thresholds und gewählten Einstellungen

Die Schrittweite sowie Intervalllänge legen die Dauer und Genauigkeit der Messung fest. Die Schrittweite kann maximal 1 betragen, was zu einer Messung mit 4096 Schritten in den Thresholdwerten führt. Da dies bei einem Messintervall von einer Sekunde schon zu einer Messdauer von über einer Stunde führen würde, wurden die meisten Testmessungen bei einer Schrittweite von 8 durchgeführt. Dies führt mit einer Auflösung von 512 Messpunkten in den meisten Fällen zu einem guten Ergebnis.

### 3.3.2 Auslese

Für die Auslese wird ein SRC (Scalable Readout System) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein universell einsetzbare Ausleseplattform, die aus einem gemeinsamen Front-End und einem Detektor-spezifischen Back-End besteht. Für den Messbetrieb der Schul-TPC wird eine FEC (front-end concentration card) verwendet, auf welcher sich ein

FPGA-Chip befindet, welcher mit der Timepix Operation Firmware (TOF) bespielt wurde. Eine Adapterkarte, welche die Verbindung zwischen Auslese-PCB und FEC mittels VHDCI-Kabel ermöglicht, wird über einen PCI Anschluss mit der FEC verbunden (Abb. 20).

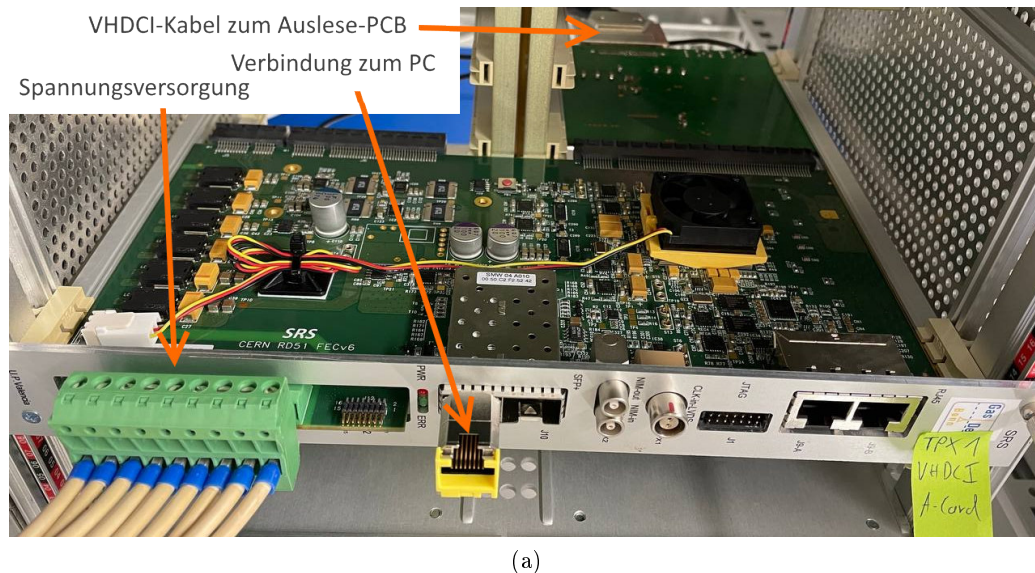


Abbildung 20: FEC mit angeschlossener A-Card für die Verbindung per VHDCI-Kabel zum Auslese-PCB an der Schul-TPC

Die Timepix-Chips werden über die Timepix Operation Software (TOS) angesteuert. Das Programm, welches von Christian Kahra von der Universität Mainz verfasst wurde, wurde von Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe erweitert und ist in C++ geschrieben. Gesteuert wird das Programm über die Kommandozeile. Eine Anleitung für die Bedienung des TOS wurde ebenfalls von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe verfasst und kann hier gefunden werden [19].

Nachdem das Programm gestartet wurde, muss die Anzahl der FECs und die Anzahl der GridPix-Chips angegeben werden. Folgende Funktionen, die für den Betrieb und insbesondere den möglichen Praxiseinsatz wichtig sind, sind möglich [11]:

- Die DACs, Matrix sowie Thresholdmatrix kann für den Chip erstellt und geladen werden.
- Der THS-Wert kann von jedem Chip optimiert werden und eine Threshold-Äqualisierung kann durchgeführt werden
- Die Chips können für den ToA-Betrieb kalibriert werden.
- Die Chips können für den ToT-Betrieb kalibriert werden, wodurch in späteren Messungen die deportierten Ladungsmengen bestimmt werden können.

- Der Shutter kann entweder komplett manuell betätigt werden oder für eine voreingestellte Zeit geöffnet werden. Ebenso kann er in regelmäßigen Abständen (Frames) betätigt werden. Zudem ist es möglich durch einen externen Trigger, wie er zum Beispiel von den konstruierten Szintillationsdetektoren generiert wird, den Shutter zu betätigen.
- Messungen können entweder als komplette Matrix gespeichert werden oder im 'zero suppressed mode', in welchem lediglich die x- und y-Koordinaten mit der Anzahl der Counts.
- Es können die Spannungen der DACs über Analog-Digital-Wandler (ADC) gelesen werden.

### 3.4 Spannungsversorgungen

Wie zu Beginn dieser Arbeit erwähnt war für die Schul-TPC eine mobile Hochspannungsquelle für den Feldkäfig wie die Gasverstärkung geplant. Da diese bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht funktioniert und eine Neukonzeption mit funktionierender Trip-Schaltung nötig ist, wird für den jetzigen Betrieb die stationäre Hochspannungsversorgung im Labor der Arbeitsgruppe verwendet, welches den Einsatzort aktuell auf das Physikalischen Institut beschränkt. Für ein Praktikumsversuch ist dies jedoch kein Hindernis. Insgesamt werden in diesem Aufbau 4 Hochspannungen benötigt. Kathodenspannung, Anodenspannung, Gasverstärkung sowie die Hochspannung an den SiPMs. Letztere muss an einem speziell verkabelten HV-Modul angeschlossen sein, da hier eine negative Spannung benötigt wird. Somit werden hier zwei ISEG-HV Module eingesetzt. Für die HV an den SiPMs könnte auch ein Labornetzteil verwendet werden, welches Spannungen bis 60V erlaubt, um die Anzahl der HV-Module auf eines zu reduzieren.

## 4 Test des Triggeraufbaus

Um das PCB der Szintillationseinheiten sowie den geschriebenen Code mit allen Funktionen zu testen, wurden die beiden Einheiten erst separat getestet und anschließend an ihrem späteren Ort über und unter der Schul-TPC angebracht. Sowohl beim PCB am Szintillator als auch an der aktualisierten Version des Auslese-PCBs sind bei ersten Tests der Verbindungen und der Kommunikation zwischen Mikrocontroller und I2C-Bauteilen fehlende Verbindungen an manchen spannungsversorgenden Pins aufgefallen. Ebenso kam bei weiteren Recherchen nach Bestellung der PCBs raus, dass die Pins des Teensy 4.0 nicht für eine dauerhaft anliegende Spannung von 5V ausgelegt sind. Letzteres konnte am entscheidenden Pin durch einen angelöteten Spannungsteiler gelöst werden. Die fehlenden Verbindungen wurden über extern verlaufende Drähte korrigiert. Beide Probleme werden in der nächsten Version der PCBs ausgebessert im Zuge dieser Arbeit war dies zeitlich bedingt nicht mehr möglich. Nachdem die Spannungsversorgungen und Kommunikation zwischen Mikrocontroller und DAC sowie Temperatursensor liefen, konnten die SiPMs angeschlossen und der Szintillator in das Gehäuse eingesetzt werden.

### 4.1 Analogsignal der SiPMs

Der erste Test bestand daraus die analogen Signale, welche von Operationsverstärker ausgegeben werden zu untersuchen. Dies wurde mit Hilfe eines Oszilloskops durchgeführt. Durch Variieren des Triggers am Oszilloskop konnte das kleinste SiPM-Signal gefunden werden, welches dem Signal eines Photoelektrons entspricht und damit (bei Vernachlässigung des Crosstalks) einem vom SiPM detektierten Photon. Auch die Signale mehrerer Photoelektronen sind deutlich zu erkennen, wie auch die in den Grundlagen angesprochenen Afterpulse (Abb. 21).

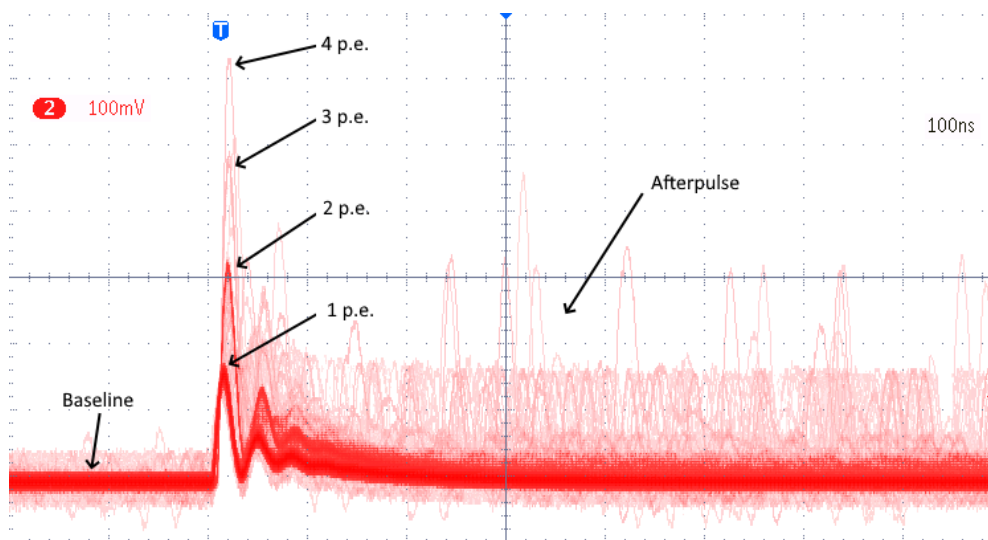


Abbildung 21: Verstärktes Analogsignal eines SiPMs



Die Baseline beschreibt die vom Operationsverstärker minimale ausgegebene Spannung. Diese kann über eine Spannung, welche über den DAC eingestellt werden kann, variiert werden. Da in der Schaltung, die für dieses Projekt entworfen wurde eine negative Spannung notwendig wäre, um die Baseline nach unten zu bewegen, und der DAC nur positive Werte ausgeben kann, wird die Baseline nicht variiert. Dies führt zwar in den späteren Messungen zu hohem Rauschen im niedrigen Spannungsbereich, schränkt aber die Funktionen des Triggersystems nicht ein. Die Signalhöhe bei einem Photoelektron lag bei allen 4 verwendeten SiPMs zwischen 176mV und 188mV.

Um das Funktionieren des DACs sowie des Komparators zu überprüfen, wird über die serielle Verbindung zwischen PC und Mikrocontroller der Schwellenwert des Diskriminators verändert und dabei mit dem Spannungswert am Oszilloskop überprüft.

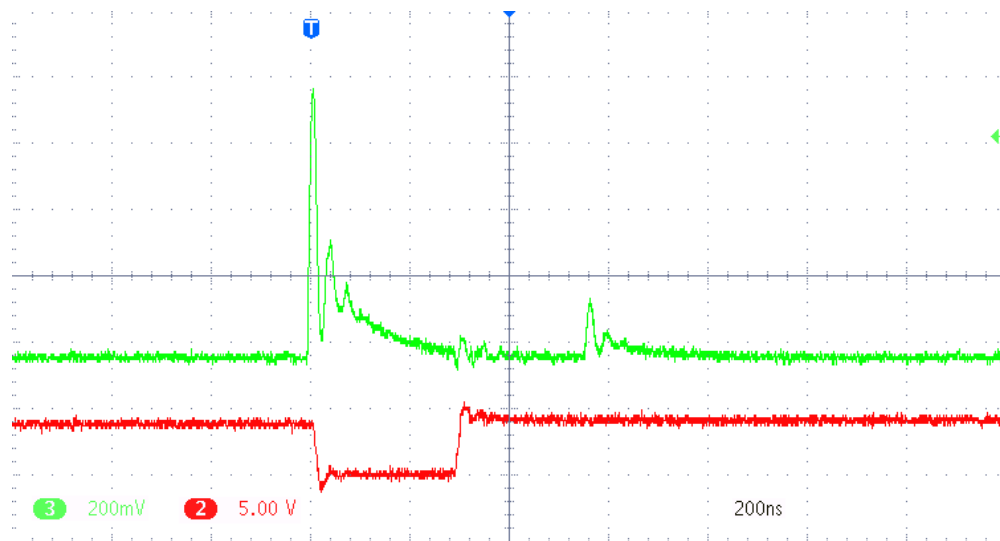


Abbildung 22: Verstärktes Analogsignal eines SiPMs (grün) sowie das Ausgangssignal des Komparators (rot)

In Abb. 22 ist zu erkennen, wie das Komparatorsignal mit Überschreiten der eingestellten Schwelle für 150ns auf 0V gezogen wird. Durch Variieren des Schwellenspannung und Beobachtung der Signale des Komparators konnten die DAC-Einstellungen überprüft werden.

## 4.2 Frequenz des DAC-Ausgangssignal

Wie in Abschnitt 2.5.1 gezeigt, erhält man beim Durchlaufen verschiedener Schwellenspannungen am Komparator einen charakteristischen Frequenzverlauf der, welcher mit höheren Schwellenspannungen Stufenförmig abnimmt. Um dies zu erkennen, ist die Frequenz logarithmisch aufgetragen. Die Frequenz wird von Mikrocontroller gemessen, indem für ein definiertes Messintervall die Anzahl der Eingangssignale gezählt werden. Für die folgenden Messungen wurde ein Messintervall von einer Sekunde gewählt. Die DAC-Werte werden mit einer Schrittweite von 8 von 0 bis 4096 durchgefahen, wobei 512

Einzelmessungen stattfinden. In den folgenden Messungen wurde jeweils ein Szintillator vermessen, indem beide entsprechenden SiPM zuerst bei einer Dunkelmessung untersucht wurden und daraufhin ein Quelle mit radioaktiven Strontium 90 (Sr90) auf dem Szintillator platziert und die Messung wiederholt. Strontium 90 zerfällt durch  $\beta^-$ -Zerfall, wobei Elektronen mit hohen Energien freigesetzt werden (0,546MeV).

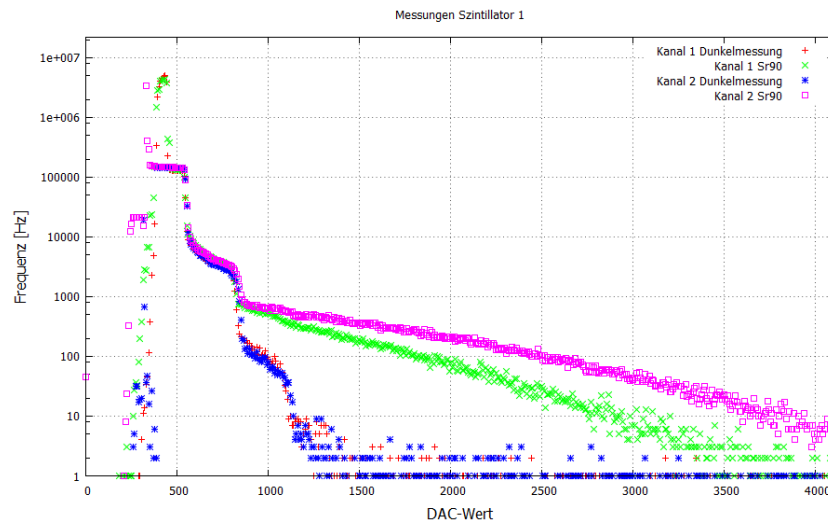


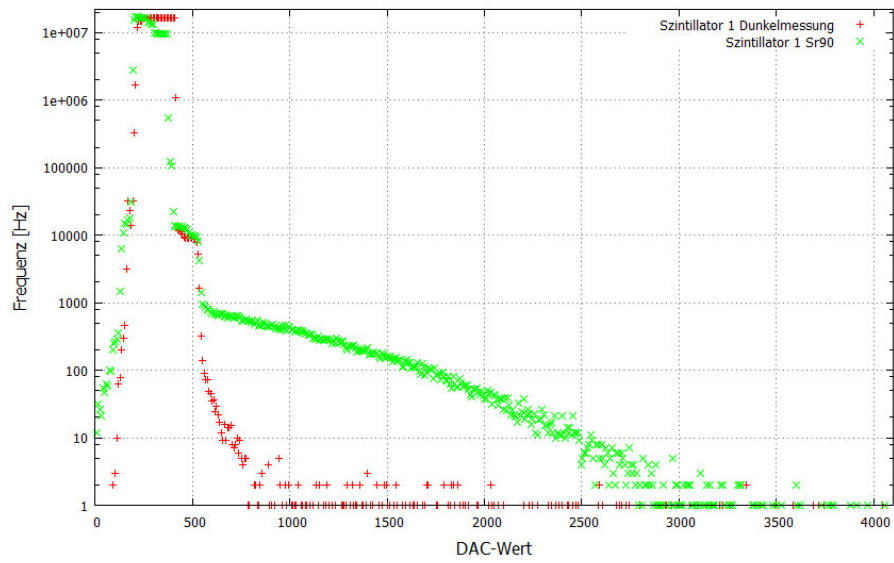
Abbildung 23: Dunkelmessungen und Messungen mit radioaktivem Präparat Strontium 90 an beiden SiPMs an Szintillator 1

Zu erkennen ist bei den Dunkelmessungen ein deutlicher treppenähnlicher Verlauf wie es auch erwartet wurde. Bei DAC-Werten unter 500 ist die Frequenz bei allen Messungen erst sehr niedrig und dann sehr hoch. Dies lässt sich mit der Baseline der Operationsverstärker erklären. Da bei niedrigen Schwellenwerten der Ausgang des Komparators dauerhaft auf 0V liegt, liegt die Frequenz des Signals bei 0Hz. Im weiteren Verlauf werden unter anderem durch das Rauschen der Baseline sehr häufig Signale unterhalb der eingestellten Spannung detektiert, was zu den sehr hohen Frequenzen vor der ersten Stufe führt. Es ist zu erkennen, dass die ungewollten Rauschsignale ab dem DAC-Wert 1100 stark abfallen. Dies entspricht ungefähr drei Photoelektronen. Ab diesem Wert liegt das Verhältnis zwischen Dunkelmessung und Signal, welches durch die Probe erzeugt wird bei circa 1:10. Ein nur minimal schlechteres Rauschverhältnis gilt ab 2 Photoelektronen, welches der Stufe bei DAC-Wert 800 entspricht. Was im Vergleich der Messungen auffällt ist, dass bei den Messungen mit Sr90 mehr Signale bei Kanal 2 ankommen als bei Kanal 1. Dies kann, trotz Verwendung von optischen Fett) durch eine nicht optimale optische Verbindung zwischen SiPM und Szintillator liegen.

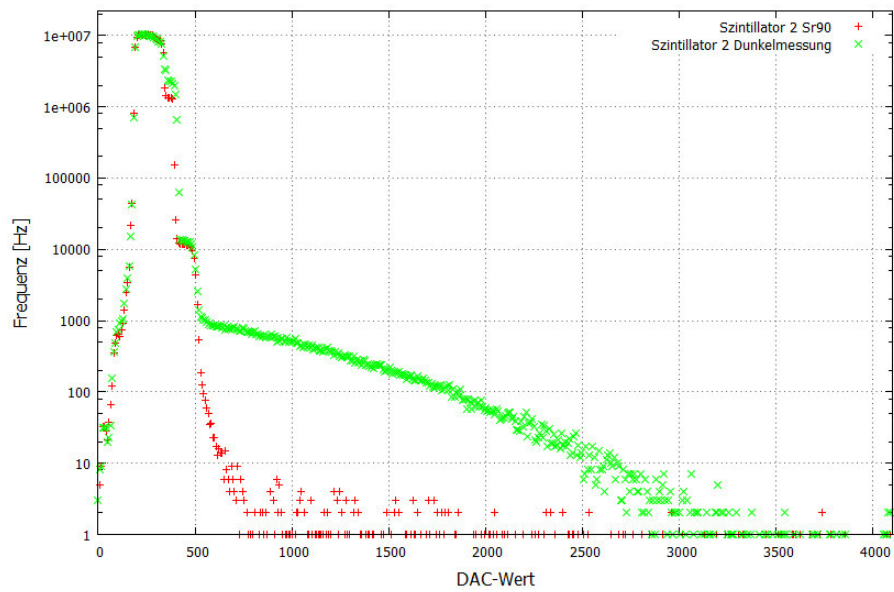
### 4.3 Koinzidenzmessungen

Ein nächster Schritt des Tests des Szintillatorkonstrukts war das Durchführen von Koinzidenzmessungen. Diese sollte das Rauschen bei niedrigen Schwellenspannungen verringern,

da ein Signal nur dann detektiert wird, wenn es an beiden SiPMs gleichzeitig auftritt.



(a)



(b)

Abbildung 24: Koinzidenzmessung an Szintillator 1(a) und 2(b)

Wie erwartet fällt der Frequenzverlauf nach Erreichen des DAC-Werts 500 steil ab. Dies entspricht der Schwellenspannung der Signalhöhe von einem Photoelektron. Mit Formel (5) lässt sich dies überprüfen. Die Stufe liegt bei dem DAC-Wert 500. Daraus ergibt sich eine eingestellte Schwellenspannung von 304mV, was der im Oszilloskop be-

trachteten Höhe des kleinsten Signals entspricht (Abb. 21). Es zeigt sich somit, dass schon mit der einfachen Koinzidenz beider SiPMs das Rauschverhalten deutlich reduziert werden kann und das Signal zu Rauschverhältnis bereits ab einer Schwellenspannung von einem Photoelektron sehr hoch ist. Was in den beiden Graphen auch gut zu erkennen ist, sind die Ereignisse bei sehr hohen DAC-Werten. Hier bleibt die Zählrate bzw. Frequenz annähernd konstant, was für ein sehr starkes Signal mit mehreren ausgelösten Photoelektronen spricht. Da bei allen Messungen der Szintillator von 5cm dicken Bleiblöcken umgeben war, sprechen diese Ereignisse für kosmische Myonen, welche den Szintillator passieren.

Nach Betrachtung der Koinzidenzen an den beiden Szintillatoren wird nun die Gesamtkoinzidenz betrachtet. Diese wird im späteren Aufbau auch für das Auslösen des Shutters verwendet. Für einen ersten Test werden alle vier verstärkten Analogsignale der SiPMs an das Oszilloskop angeschlossen. Die Triggerschwelle wurde auf 1V gestellt, somit sind mindestens 4 Photoelektronen nötig, damit das Oszilloskop stoppt. Mit der Einzelmessfunktion des Oszilloskops konnten nach wenigen Versuchen mehrere vierer Koinzidenzen beobachtet werden (Abb. 25). Dies zeigt, dass sich Teilchen durch die beiden Szintillatoren bewegen und dieses an allen 4 SiPMs gleichzeitig detektiert wird. Damit ist die Grundvoraussetzung für die Triggereinheit gegeben und es kann die digitale Seite der Signale weiter betrachtet werden.

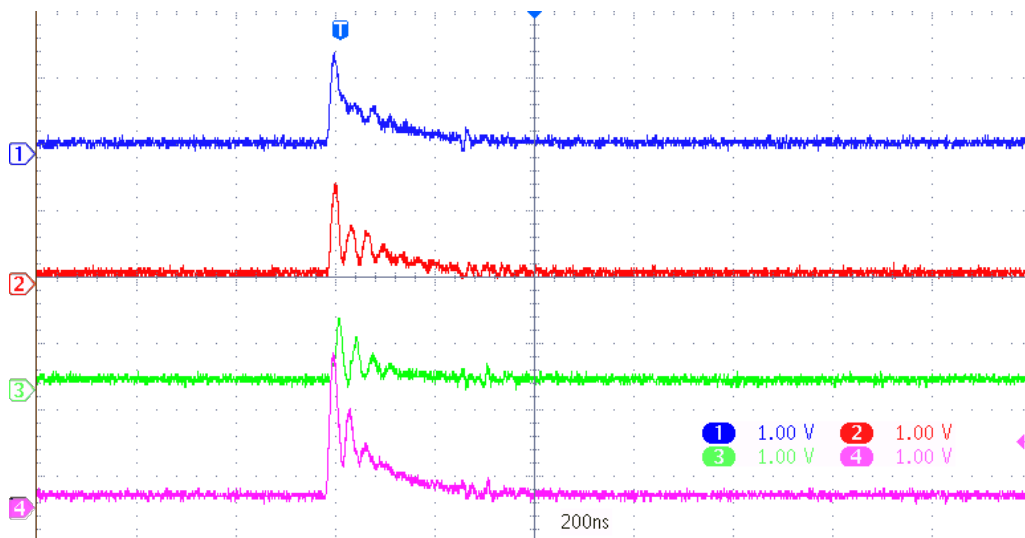


Abbildung 25: Koinzidenz der 4 verstärkten Analogsignale der SiPMs

Für die erste Messung werden beide Szintillatoren aufeinander gelegt, um möglichst viele Teilchen mit unterschiedlichen Flugrichtungen und Winkeln zu erfassen. Da es sich bei dieser Messung im Vergleich zu den vorherigen Frequenzmessungen vor allem bei den interessanten höheren Schwellenwerten um eine geringe Ereignisrate handelt, wird das Messintervall, in dem die Signale für die Frequenzbestimmung gezählt werden, vergrößert. So beträgt das Messintervall in dieser Messung eine Minute. Bei 512 Messpunkten ergibt

sich somit eine Messdauer von circa 8,5 Stunden. Der Frequenzverlauf zeigt wieder einen ähnlichen Verlauf, wie die Koinzidenzmessungen an den einzelnen Szintillatoren. Jedoch nimmt die Frequenz nach Durchlaufen des DAC-Wertes 500 noch steiler ab, wenn eine Koinzidenz in allen vier SiPMs verlangt ist. Das hohe Rauschen vor 500 ist auch hier durch die Baseline des vom Operationsverstärker ausgegebenen Signal bedingt. Ab einem DAC-Wert von 500 kann man davon ausgehen, dass ein Teilchen beide Szintillatoren passiert hat, da die Zählraten der einzelnen Szintillatoren bei ungefähr 100Hz liegen. Eine zufällige Überschneidung von zwei 150ns langen Signalen ist somit äußerst unwahrscheinlich.

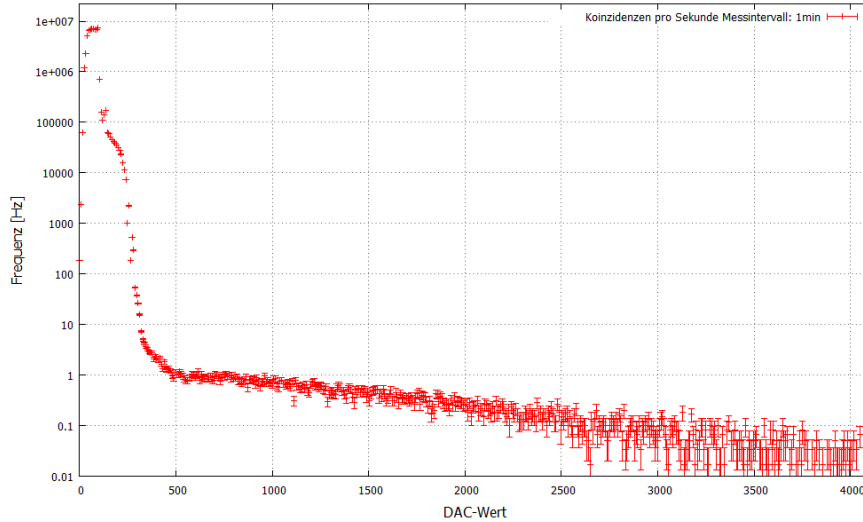


Abbildung 26: Frequenz des Ausgangssignals des AND-Gatters, welches ein Signal bei vierfacher Koinzidenz ausgibt in Abhängigkeit der Schwellenspannung. Bei dieser Messung lagen die beiden Detektoren aufeinander.

Anhand dieser Messung (Abb. 26) kann auch etwas über die maximal zu erwartende Ereignisrate gesagt werden. So kann man bei DAC-Wert = 500 eine Rate von ungefähr 1Hz. Da für diese Messungen die Szintillatoren wieder mit Blei umgeben waren, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei diesen Ereignissen hauptsächlich um Myonen handelt. Die auf Meeresebene herrschende Myonenrate entspricht etwa 200 Myonen pro Sekunde pro Quadratmeter [20]. Bei einer Szintillatorfläche von  $20 \times 5 \text{ cm}^2$  würde dies 2 Myonen pro Sekunde entsprechen, welche die Szintillatoren durchqueren. Manche Myonen, welche in einem fast rechtwinkligen Winkel zu den Szintillatoren fliegen, können jedoch nicht beide passieren, was etwas die Zahl der Myonen reduziert. Somit ergibt sich eine Effizienz von circa 50%. Die Verluste könnten ebenso durch das Alter der Szintillatoren begründet sein. Diese könnten mehrere Dekaden alt sein. Trotz dessen ist die Effizienz ausreichend für den Lehr- und Demonstrationsbetrieb der Schul-TPC.

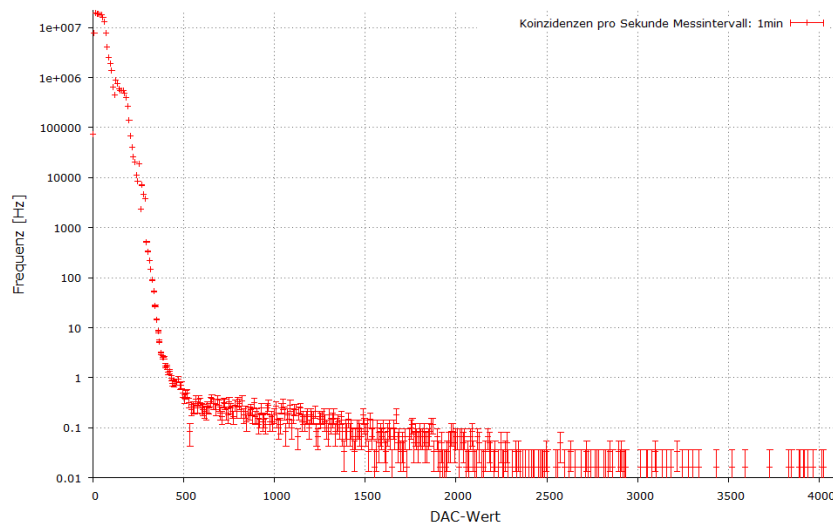


Abbildung 27: Koinzidenzen der vier SiPMs bei Anbringen der Szintillatoreinheiten an die Schul-TPC.

In Abb. 27 ist die gleiche Messung der Frequenzen ein zweites Mal durchgeführt worden, diesmal nach Anbringen der Szintillatoren an der Schul-TPC. Es ist deutlich, dass die Ereignisse stark an der Zahl abnehmen. Dies ist dadurch begründet, dass nur Teilchen, deren Flugbahn maximal 18 Grad von der Senkrechten abweicht, in beiden Szintillatoren erfassen werden können. Dies entspricht nur einem Bruchteil der sich durch den Detektor bewegendem Teilchen. Aus der Messung lässt sich eine ungefähre Rate von einem Ereignis alle 2-4 Sekunden bestimmen.

#### 4.4 Auslösung des Shuttersignals durch den konstruierten Triggereaufbau

Im letzten Schritt der Tests wird versucht das Koinzidenzsignal aller vier SiPMs über den Mikrocontroller an die FEC zu übermitteln, damit diese den Shutter für eine bestimmte Zeit auslöst. Auch wenn eine Implementierung in das TOS vorhanden ist, welche externe Trigger annimmt, hat dies nicht funktioniert. Eine weitere Funktion, welche von Divya Pal programmiert wurde, ist in der Lage für eine einzelne Messung ein externes Triggersignal abzuwarten und für die Länge dieses Signals den Shutter zu aktivieren. Eine automatisch laufende Messung, welche mehrere Frames aufnimmt, nachdem jeweils ein Triggersignal eingeleitet wird, war noch nicht möglich. Auch wenn dies für einen späteren Einsatz wichtig ist, konnte der Trigger dennoch mit der Einzelmessungsmethode getestet werden. Um zu zeigen, dass die FEC ein Triggersignal empfängt und daraufhin ein Shutter signal für die Dauer des Triggersignals ausgibt, wurden die entsprechenden Signalpins mit dem Oszilloskop überprüft:

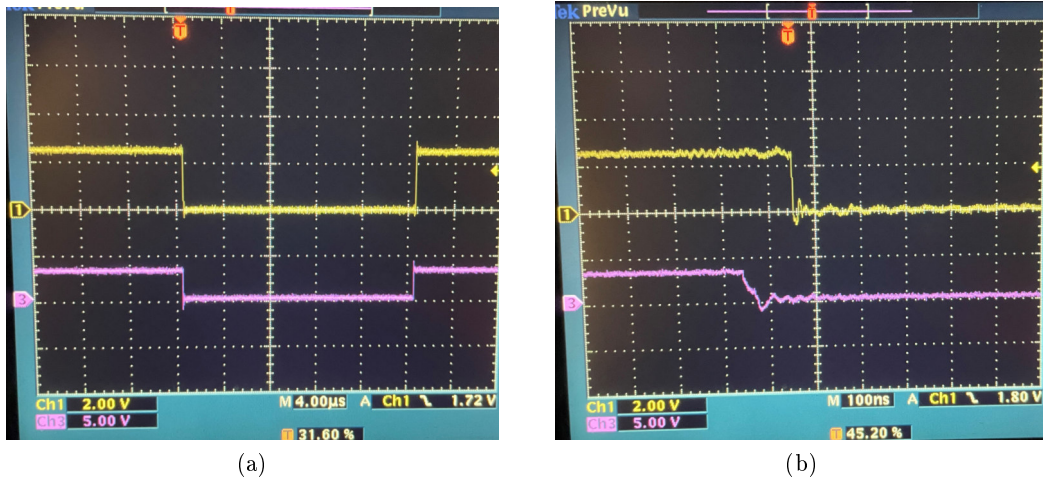


Abbildung 28: Vom Mikrocontroller generiertes Triggersignal (lila) und das von der FEC ausgegebene Shuttersignal (gelb), welches an die Timepix-Logik geleitet wird.

Mit einer Verzögerung von nur knapp 100ns kann die FEC ein Shuttersignal an die Timepix-Logik ausgeben, dessen Länge dem Triggersignal entspricht. Die Länge des Triggersignals kann vom Mikrocontroller auf wenige Nanosekunden genau eingestellt werden.

#### 4.5 Erste Messungen an der Schul-TPC mit Triggervorrichtung

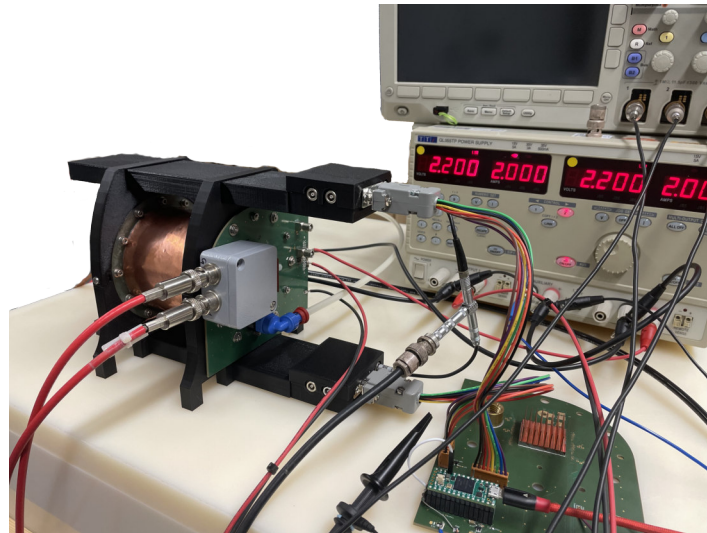


Abbildung 29: Aufbau des Test-Setups. Die Triggerschaltung läuft über das neue Auslese-PCB, auf welchem noch keine Chips montiert sind

Mit der eben beschriebenen Messmethode können nun einzelne Frames aufgezeichnet werden, welche vom Szintillationstrigger ausgelöst werden. Da auf Version 2 des Auslese-PCBs die Hochspannung noch nicht mit dem InGrid verbunden war, konnten nur ein Auslese-Board mit einem angeschlossenen Chip ausgelesen werden. Die Triggerlänge wurde auf  $40\mu\text{s}$  eingestellt, um das komplette Passieren der Teilchen zu detektieren. Der Threshold-Wert für den Chip wurde auf 312 gesetzt. Zu Beginn wurden der Chip im ToT-Modus betrieben.

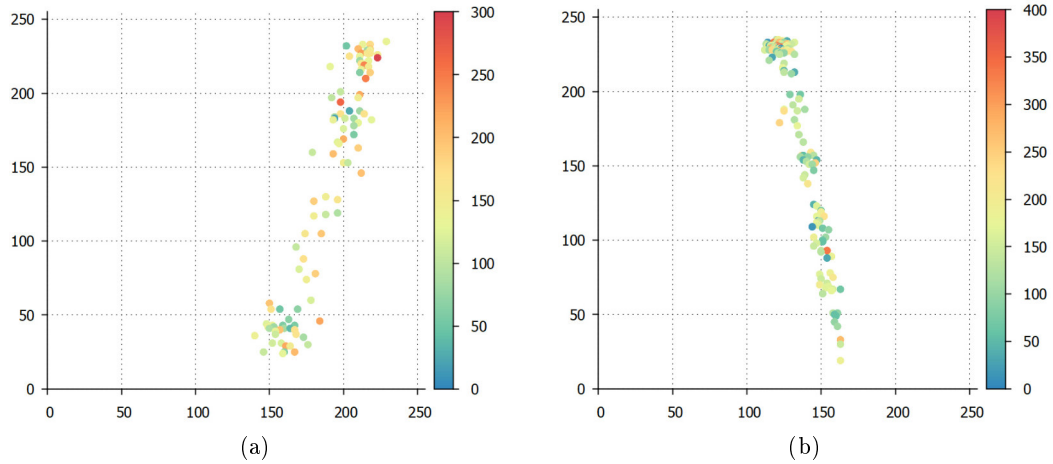


Abbildung 30: GridPix-Messungen im ToT-Modus mit externem Shutter. Die Farbskala entspricht der Zeit des Signals oberhalb des eingestellten Thresholds

Während der Messungen zeigte sich, dass der Trigger sehr gut funktioniert und nach ungefähr jedem 5ten Triggersignal eine deutliche Teilchenspur aufgezeichnet wurde. Wie in den Messungen zu erkennen ist, ist das aufgenommene Bild absolut rauscharm und zeigt lediglich die klar definierte Teilchenspur. Es lassen sich Unterschiede in der Streuung der Spur erkennen, was darauf hindeuten kann, dass Teilchenspuren weiter weg von der Sensorebene bis zum Chip stärker streuen als Teilchenspuren in direkter Nähe zum Chip. Nachdem die Messungen im ToT-Modus gut geklappt haben, wurde der Chip nun für den ToA-Modus bereitgemacht.



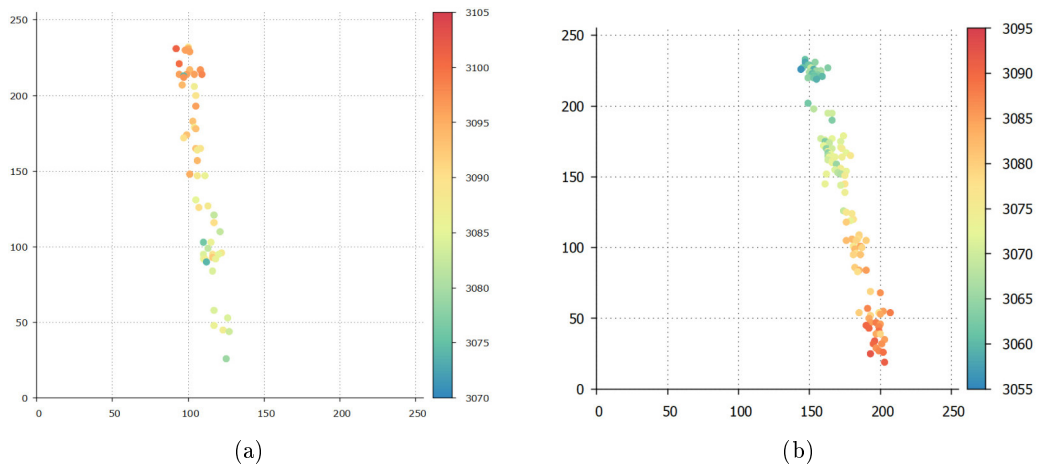


Abbildung 31: GridPix-Messungen im ToA-Modus mit externem Shutter

Auch hier zeigte sich, dass der Trigger zu sehr guten Messungen führen konnte. Bei allen Messungen, welche nicht leer waren (weil das Teilchen, welches den Trigger ausgelöst hat nicht durch die Projektionsfläche des GridPix geflogen ist.), konnte eine deutliche Teilchenspur aufgezeichnet werden. Ebenso wurde die Zeitinformation aufgenommen, welche die Anzahl der Taktzyklen zwischen Detektion auf dem Chip und Ende des Shuttersignals angibt. Diese Information ist in den Graphen mit Hilfe einer Farbskala dargestellt. Für eine Rekonstruktion der dritten Dimension der Teilchenspur müsste noch die Driftgeschwindigkeit ermittelt werden. Qualitativ lässt sich aber bereits an den Graphen erkennen, ob sich das Teilchen auf den Chip zu oder von ihm wegbewegt hat. Pixel im blauen Bereich stammen aus der Teilchenspur weiter weg von der Sensorebene, Pixel im roten Farbbereich wurden durch Primärelektronen im Bereich nahe des Chips aktiviert.

## 5 Mögliche Versuchsteile und Messungen

Mit dem funktionierenden Trigger aus den beiden Szintillatoren ist die Schul-TPC nun noch besser geeignet zur Demonstration einer Zeitprojektionskammer und kann auch gewinnbringend im Lehrbetrieb eingesetzt werden. Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit möglichen Praktikumsteilen, welche für einen Praktikumsversuch mit der Schul-TPC geplant werden könnten. Durch die ausführliche Betrachtung der Konstruktion des Triggeraufbaus sowie der Durchführung der Tests an dieser, gilt der folgende Teil als ein erster Überblick über die Möglichkeiten an der Schul-TPC zu experimentieren und zu lernen.

Wie in den meisten Praktikumsversuchen bietet sich auch bei einem Versuch mit der Schul-TPC an, diesen in drei Teile zu unterteilen: Versuchsvorbereitungen, Messungen und Auswertung.

### 5.1 Aufbau

In den Versuchsvorbereitungen geht es vor allem um den korrekten Aufbau aller Elemente des Versuchs. Für die Schul-TPC bedeutet das die Gasdurchflutung zu starten, die Hochspannungen anlegen, den Szintillationsaufbau montieren und anschließen sowie die Auswerteelektronik anschließen. Dies schafft den Studierenden einen Überblick über benötigte Technik und lässt insbesondere beim Anschluss der Hochspannungen hinterfragen, welche Spannungen an welchen Orten des Detektors nötig sind. Mit einer Skizze des Feldkäfigs mit Widerständen, Anode und Kathode kann die Aufgabe gestellt werden mit einzelnen Bedingungen (z.B. die gewünschte Feldstärke) die Spannungen für die Hochspannungen berechnet. Zu beachten ist hierbei, dass falsche Spannungen den Detektor schaden können. Somit wäre es ratsam die Berechnungen durchführen zu lassen aber die einzustellenden Spannungen in der Versuchsbeschreibung festzuhalten.

Die Gasanlage sollte schon mehrere Stunden vor Messbeginn in Betrieb genommen werden, damit das komplette Detektorvolumen durchgespült ist. Hier bietet es sich an den Gasfluss von Praktikumsbetreuer am Tag vorher zu starten.

In den weiteren Versuchsvorbereitungen geht es vor allem um das Starten der Elektronik und die Kalibrierung der Szintillatoren sowie der Timepix-Chips.

### 5.2 Arbeit an den Szintillatoren

Um den Aufbau sowie Betrieb des Szintillationsaufbaus zu verstehen, könnten einige Schritte in den Versuch integriert werden. Beginnend mit der Betrachtung der analogen Signale können die Studierenden den Aufbau der SiPMs nachvollziehen und verschiedene Charakteristika wie sie in Abschnitt 2.5.1 dargestellt wurden (Signale detektierter Photoelektronen, Baseline sowie Afterpulse). Hier können auch schon die Amplituden der Photoelektron-Signale bestimmt werden, welche für die darauffolgende Arbeit mit den Schwellenspannungen am Komparator wichtig sind.

Nach Betrachtung der analogen Signale ist nun das Aufzeichnen einer Frequenzkurve, wie sie in dieser Arbeit für den Test der Szintillatoren durchgeführt wurde, sinnvoll. Hier

sollten in kurzen 4 Minuten-Messungen (Messintervall 1 Sekunde, Schrittweite 16) die 4096 DAC-Werte eines einzelnen SiPM-Kanals durchgefahen werden und die Frequenz vom Mikrocontroller erfasst werden. Diese Messwerte werden von Mikrocontroller bei serieller Schnittstelle im Terminal angezeigt und können von den Studierenden kopiert werden und in ein Text-File eingesetzt werden. Im weiteren Schritt ist es notwendig die aufgenommenen Messwerte graphisch darzustellen, wobei auf eine logarithmische y-Achse zu achten ist. Dies kann für alle 4 Kanäle durchgeföhrt werden. Sind die Daten alle visualisiert, können die Studierenden eine Kalibrierung einzelner Kanäle vornehmen. Das Ergebnis der Kalibrierung sollte folgende Form haben [21]:

$$thr_{Kanal}(x) = offset_{Kanal} + gain_{Kanal} \cdot x \quad (6)$$

Mit dieser Formel lässt sich der Schwellenwert ( $thr = \text{Threshold}$ ) für eine bestimmte Photoelektronenanzahl ( $x$ ) bestimmen. Der  $gain$ -Wert (Verstärkungswert) entspricht der Breite einer Stufe und kann aus dem Mittel mehrerer Stufenbreiten bestimmt werden. Der Offset entspricht der nullten Photoelektron-Stufe. Diese kann mit Hilfe der Lage der ersten Photoelektron-Stufe herausgefunden werden, indem der mit dem Oszilloskop bestimmte Wert des singulären Photoelektronsignals mit folgender Formel in eine DAC-Wert umgerechnet wird (vgl. Abschnitt 3.2.6):

$$D = 4096 \times \frac{V_{OUT}}{V_{REF}H} \quad (7)$$

Darauffolgend können Koinzidenzmessungen durchgeföhrt werden und dessen Unterschiede zu den einzelnen Kanälen diskutiert werden. Hier ist insbesondere die Baseline, das Rauschverhalten sowie der Crosstalk und dessen Auftreten in den unterschiedlichen Messungen (Koinzidenz im Vergleich zu Einzelkanalmessung) zu thematisieren. Dies benötigt und fördert das Verständnis bezüglich Aufbau und Funktion der Silizium Photomultiplier.

### 5.3 Timepix-Chips

Im weiteren Verlauf wird sich nun mit der Auslese der Timepix-Chips beschäftigt. Hierzu ist es nötig, dass die Studierende Grundfunktionen des TOS (Timepix Operating Software) kennen und verstehen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Da die Bedienung von TOS durch eine Vielzahl an Funktionen für die Studierenden, die noch nie damit gearbeitet haben, sehr kompliziert ist, ist es hier notwendig mit einer detaillierten Anleitung zu arbeiten.

Zu den Aufgaben, welche vor dem Messbetrieb durchgeföhrt werden müssen, zählen die THS-Optimierung, die Threshold-Äqualisierung sowie das Einstellen einer Chip weiten Schwellspannung und das Editieren des gewünschten Betriebsmodus. Für die Auswertung der verschiedenen Betriebsmodi ist ebenso das Durchföhren einer ToT-Kalibrierung, ToA-Kalibrierung sowie eines S-Curve Scans notwendig. Die THS-Optimierung sowie Threshold-Äqualisierung ist notwendig um die Unterschiede der Diskriminator-Schwellen in den einzelnen Pixeln zu kompensieren. Dies ist zu Beginn des Betriebs der Timepix-Chips notwendig. Daraufhin kann mit einem THL-Scan das Rauschverhalten des Chips überprüft werden, in dem der THL-Wert durchgefahen wird und jeweils die Anzahl der

detektierten Signale gezählt wird. So lässt sich ein möglichst kleiner Schwellenwert finden, bei welchem kein Rauschen mehr auftritt. Für eine Messung müssen nun die Werte P0 und P1 festgelegt werden, um den Betriebsmodus der Timepix-Chips auszuwählen. Nun bietet es sich an vor den Messungen noch die oben genannten Kalibrierungen durchzuführen. Abschließend kann eine Messung gestartet werden. Für den Triggerbetrieb ist es notwendig den Triggerausgang des Mikrocontrollers mit der FEC zu verbinden und die gewünschte Shutterzeit einzustellen. Wie bereits erwähnt, war das TOS zum Zeitpunkt der Abgabe noch nicht in der Lage kontinuierlich triggerausgelöste Messungen durchzuführen, sodass nur Einzelmessungen möglich sind.

## 5.4 Myonen

Wie beim Test des Szintillationsaufbau geschildert, war dieser in der Lage Myonen zu detektieren und daraufhin ein Triggersignal auszusenden. Die Myonenspur konnte daraufhin in der TPC aufgezeichnet werden. Wie in den Testmessungen zu erkennen, verlaufen die Myonenspuren in unterschiedlichen Winkel. Diese Winkelverteilung kosmischer Myonen lässt sich durch  $R(\alpha) = \cos^2(\alpha)$  beschreiben. Um diese Winkelverteilung zu messen, ist der in den Testmessungen maximal mögliche Winkelbereich von  $36^\circ$  zu gering. Kann der Detektor jedoch im ToA-Modus die Spuren detektieren, so ist es möglich aus der bestimmten Zeit einer Detektion die dritte Raumkomponente zu bestimmen. Hiermit lässt sich nun ein größerer Winkelbereich nutzen:

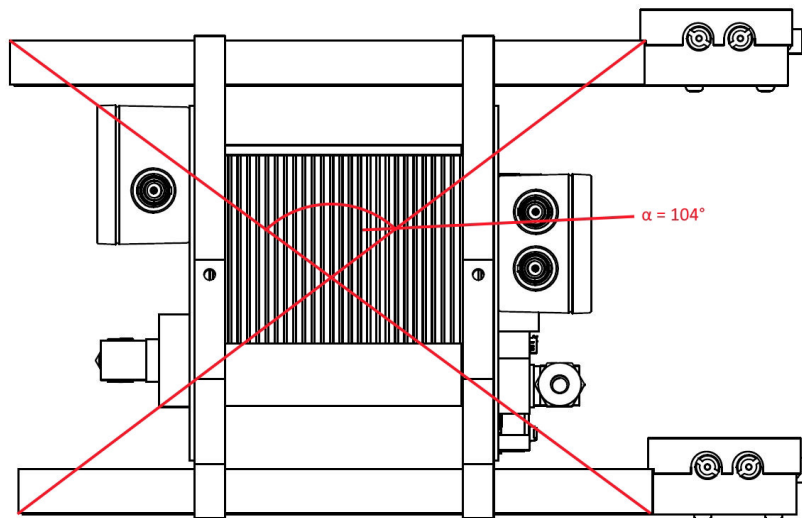


Abbildung 32: Winkelbereich der Triggerrückbaus

Entsprechend der Triggerrate von ungefähr 1Hz müsste die Messung jedoch über eine längere Zeit laufen, um genügend Spuren zu erhalten. Daraufhin wäre eine automatisierte Bestimmung der dritten Raumkomponente nötig, woraus sich dann durch Projektion der Spur auf die y-z-Ebene die Steigung mittels Geradenfit bestimmen lässt. Geschieht dies

mit einer Großzahl von Messungen, sollte sich im Idealfall die vermutete Verteilung von  $R(\alpha) = \cos^2(\alpha)$  ergeben.

## 5.5 Arbeit mit dem Mikrocontroller

Da der Szintillationstrigger von einem klassischen Mikrocontroller gesteuert wird, welcher über die C ähnliche Entwicklungsplattform Arduino IDE programmiert werden kann, bietet es sich hier an, die Studierenden damit arbeiten zu lassen. Möglich wäre es, die Studierenden die Implementierung eines Threshold-Scans programmieren zu lassen, welchen sie dann für ihre Messungen verwenden.

Ebenso würde es sich anbieten, das Kommunikationsprotokoll I2C, welches für den Betrieb des DACs sowie die Auslese des Temperatursensors verwendet wird, implementieren zu lassen. I2C ist ein serieller Datenbus, welcher lediglich mit zwei Datenverbindungen arbeitet, das eigentliche Signal (SDA) sowie eine Clock bzw. Taktleitung (SCL). Diese klassische Datenverbindung wird sehr häufig bei verschiedenen Sensoren, DACs oder ADCs verwendet. So wird sie im Übrigen auch für die Kommunikation mit den DACs der Timepix-Auslese verwendet.

Für das Implementieren der I2C-Kommunikation in den Mikrocontroller-Code ist die Arbeit mit dem Datenblatt des Chips, welcher angesteuert werden soll, notwendig. Dieser Umgang mit Datenblättern ist von großer Bedeutung, wenn es darum geht im wissenschaftlichen Alltag neue Schaltungen zu entwerfen und neue Auswerte oder Messapparaturen zu entwickeln.

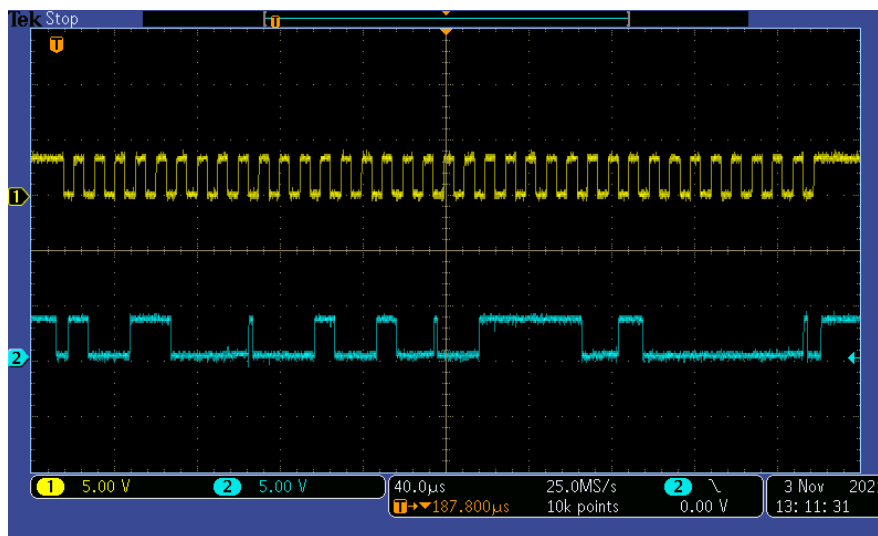


Abbildung 33: Taktleitung SCL (gelb) und Datenleitung SDA (türkis) während der Übertragung eines DAC-Wertes

In Abb. 33 sind die beiden Leitungen SDA und SCL während der Übertragung an den DAC zu sehen. Das Datensignal enthält die Adresse des DAC-Chips, den gewünschten Kanal sowie ein 12bit-Wert, auf welchen der entsprechende Kanal eingestellt ist. Es ist

zu erkennen, dass die Datenübertragung sehr kompakt und übersichtlich ist, wodurch es sich besonders eignet, um die Prinzipien der seriellen Datenübertragungen zu verstehen und anwenden.

## 6 Einsatz außerhalb der Universität

Mit der Konstruktion des Szintillationstriggers hat die Schul-TPC eine weitere Funktion dazugewonnen, deren physikalischen Hintergründe und Einsatzarten demonstriert werden können. Dabei hat sie nicht ihre übersichtliche Form und Kompaktheit verloren. Trotz dessen ist es für den Einsatz außerhalb der Universität und unabhängig der Technik der Arbeitsgruppe notwendig die Spannungsversorgung zu konstruieren, welche eine funktionierende Trip-Schaltung beinhaltet ebenso wie die neu dazu gekommene Anschlussmöglichkeit der HV für die Szintillatoren. Daneben muss noch die mobile Gasdurchflutung konzipiert und getestet werden. Ebenso gilt es, die mobile Auslese, welche über USB an einen PC angeschlossen werden kann genauer ins Auge zu fassen. Hier war es bereits möglich einen einzelnen Chip auszulesen, was jedoch noch nicht mit den geplanten vier GridPix-Chips funktioniert hat. Letzteres ist für den außeruniversitären Einsatz ein sehr wichtiger Punkt, da auch die Steuerung über das USB-Modul mit einer graphischen Benutzeroberfläche deutlich einfacher ist und somit anschaulicher für den Demonstrationsbetrieb ist.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Aufbau der Schul-TPC mit dem konstruierten Szintillationstrigger ein vielseitiges und in seinen Grundfunktionen bereits funktionierendes Demonstrationsmodell einer Zeitprojektionskammer ist. An den Szintillatoren wie auch an der Schul-TPC selbst lassen sich viele Möglichkeiten entdecken, welche in einem Praktikumsversuch Studierenden Einblicke in die Funktionsweise moderner Pixel-detektoren geben kann. Mit einem Versuch an der Schul-TPC kann auch ein Teilgebiet der Arbeitsgruppe repräsentiert werden, welche bereits seit einigen Jahren mit dem Timepix-Chip arbeitet und ebenso an der Entwicklung von Gasdetektoren forscht.

Um den Praktikumsversuch konkreter zu planen ist es notwendig die verschiedenen Messungen, Kalibrierungen und Variationen des Aufbaus durchzuführen. Dies war in dieser Arbeit zeitlich nicht mehr möglich auch, da die GridPix-Chips auf der Auslese noch nicht vollständig angeschlossen waren. Trotz dessen konnte gezeigt werden, dass mit dem Funktionieren des Triggers sowie der TPC an sich keine prinzipiellen Veränderungen am Aufbau nötig sind für einen lehrreichen Praktikumsversuch.

Ein weiteres Ziel der Schul-TPC ist nach wie vor der Einsatz mit Schülerinnen und Schülern. Auch hier wurden die Möglichkeiten durch den Szintillationstrigger erweitert und lassen es insbesondere zu, den Schülerinnen und Schülern Einblicke in die Programmierung einfacher Mikrocontroller zu geben, welche in vielen Bereichen aktueller Forschung zur Anwendung kommen. Aber auch außerhalb des wissenschaftlichen Betriebs haben Mikrocontroller eine hohe Bedeutung und unzählige Einsatzzwecke. Dies lässt sich nutzen, um Schülerinnen und Schüler zu motivieren. An separaten Mikrocontrollern können die SuS zum Beispiel ein kleines Programm schreiben, welches einen Temperatursensor ausliest. Ebenso können die Begriffe der Schwellenspannung bzw. Thresholds kennengelernt werden, indem ein Feuchtigkeitssensor, welcher in der Erde steckt bei Unterschreiten einer Schwelle ein Signal ausgibt. Diese Konzepte können dann auf die Funktionsprinzipien des Szintillationsdetektors übertragen werden oder auch auf die Detektion von Ladung im Timepix-Chip. Die Auswertung der Myonen-Winkelverteilung könnten die Schülerinnen und Schüler durch Winkelbestimmung mit dem Geodreieck an ausgedruckten TPC-Messungen durchführen. Hier müsste natürlich eine gesamte Klasse zusammenarbeiten, um ein gutes Ergebnis zu erhalten. Besonders interessierte SuS könnten auch in die computerbasierte Auswertung der Spuren eingeführt werden. Um einer der beliebtesten Frage von Schülerinnen und Schülern zu entgegnen: 'wofür wird das genutzt?', schließe ich diese Arbeit mit einer Schlagzeile:



## Archäologie mit Myonen / Riesiger Hohlraum in Cheops-Pyramide entdeckt

**Elementarteilchen namens Myonen regnen auf die Erde hinab, was sich mit speziellen Detektoren nachweisen lässt. Jetzt haben Wissenschaftler mithilfe dieser Myonen die Cheops-Pyramide untersucht: Über Monate entstand eine Art 3D-Bild des Innenraums. Nach der Analyse war den Forscher klar: „Wir hatten etwas Großes entdeckt.“**

Von Frank Grotelüschen | 02.11.2017

Abbildung 34: Archäologie mit Myonen - Schalgzeile des Deutschlandfunks von 2.11.2017  
[22]

Hinter dieser Entdeckung steht die Untersuchung der Myonenrate an unterschiedlichen Stellen in und außerhalb der Pyramide. Durch teilweise Absorption der kosmischen Myonen im Gestein, ließen sich unbekannte Hohlräume entdecken. Neben dieser ungewohnten Zusammenkunft von Archäologie und Teilchenphysik gibt es natürlich auch noch etliche Bedeutungen der Myonen im Gebiet der Teilchenphysik oder gar im Bereich Relativitätstheorie.

## Literatur

- [1] Georg Federmann. Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, 2003.
- [2] X. Llopert, R. Ballabriga, M. Campbell, L. Tlustos, and W. Wong. Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 581(1).
- [3] M. Meiß. Studien zu einer Zeitprojektionskammer für den Schuleinsatz, 2017.
- [4] J. Streun. Entwicklung einer TPC für den Schulunterricht, 2019.
- [5] M. Koch. Fertigstellung und erste Messungen mit der Schul-TPC, 2020.
- [6] H. Kolanoski, N. Wermes. *Teilchendetektoren Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag, 2016.
- [7] M. Ummenhofer. Inbetriebnahme einer Zeitprojektionskammer mit Pixel-Auslese, 2008.
- [8] M. Lupberger. The Pixel-TPC: first results from an 8-InGrid module. *Journal of Instrumentation*, 9(01):C01033–C01033, jan 2014.
- [9] The Silicon Photomultiplier (SiPM) Concept and Design Development. <https://www.appc.org/news/the-silicon-photomultiplier-sipm-concept-and-design-development>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [10] What is an SiPM and how does it work? <https://hub.hamamatsu.com/jp/en/technical-note/how-sipm-works/index.html>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [11] Divya Pal. Prototype of a Boron based neutron Time Projection Chamber, 2020.
- [12] Das ALICE-Experiment Broschüre. <https://all3dp.com/de/1/creality-ender-3-vs-ender-3-pro-3d-drucker-vergleich/>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [13] Teensy 4.0 Development Board. <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>. (zuletzt aufgerufen 14.11.2021).
- [14] MPPCs for precision measurements. <https://www.hamamatsu.com>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [15] Dual, Wideband, Low-Noise, Voltage-Feedback Operational Amplifier. <https://www.ti.com/product/OPA2846>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [16] Low-Cost, 7ns, Low-Power Voltage Comparators. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9201-MAX9203.pdf>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).

- [17] I2C Interface Digital-to-Analog Converter. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink> (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [18] 2-Wire High-Accuracy Temperature Sensor. <https://www.mouser.de/datasheet/2/268/21909d-41753.pdf>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [19] M.Gruber, J.Kaminski, M.Lupberger. Manual for the Timepix Readout. Technical report, Physikalisches Institut Bonn, 2019.
- [20] Kernphysik - Die Kamiokande. <https://www.uni-muenster.de/MExLab/experimentum/kernphysik.html>. (zuletzt aufgerufen 10.11.2021).
- [21] A. Lambertz. Entwicklung eines großflächigen Szintillator-Triggersystems mit wellenlängenverschiebenden Fasern für Neutronendetektoren, 2018.
- [22] Deutschlandfunk: Archäologie mit MyonenRiesiger Hohlraum in Cheops-Pyramide entdeckt. <https://www.deutschlandfunk.de/archaeologie-mit-myonen-riesiger-hohlraum-in-cheops-100.html>. (zuletzt aufgerufen 14.11.2021).

## Abbildungsverzeichnis

1	Verschiedene Messmethoden . . . . .	1
2	Aufbau einer TPC . . . . .	5
3	Schematischer Aufbau einer Timepix Pixelzelle . . . . .	6
4	Betriebsmodi des Timepix-Chips . . . . .	7
5	InGrid . . . . .	8
6	Avalanche-Photodiode . . . . .	9
7	Silizium Photomultiplier . . . . .	10
8	Signale SiPM . . . . .	11
9	Schul-TPC schematischer Aufbau . . . . .	12
10	Schul-TPC schematischer Aufbau mit Szintillatoren . . . . .	13
11	Teensy Mikrocontroller . . . . .	14
12	Reaktionszeit des Teensys . . . . .	16
13	Koinzidenzmessung Teensy . . . . .	17
14	Aufbau der Szintillationsdetektoren . . . . .	18
15	Konstruktion des Szintillator . . . . .	19
16	Aufbau des SiPM-PCB . . . . .	20
17	Operationsverstärker . . . . .	21
18	Weitere Bauteile des SiPM-PCBs . . . . .	22
19	Schaltplan NOR- und AND-Gatter . . . . .	23
20	FEC mit angeschlossener A-Card . . . . .	25
21	Analogsignal eine SiPM . . . . .	27
22	Analogsignal und Diskriminatorsignal . . . . .	28
23	Messungen am Szintillator 1 . . . . .	29
24	Koinzidenzmessung Szintillator 1 und 2 . . . . .	30
25	4er Koinzidenz . . . . .	31
26	Ereignisrate der vierer Koinzidenz . . . . .	32
27	Ereignisrate der vierer Koinzidenz im Detektoraufbau . . . . .	33
28	Trigger- und Shattersignal . . . . .	34
29	Test-Setup der Schul-TPC . . . . .	34
30	GridPix-Messungen im ToT-Modus . . . . .	35
31	GridPix-Messungen im ToA-Modus . . . . .	36
32	Winkelbereich der Triggeraufbaus . . . . .	39
33	I2C Spannungsverlauf . . . . .	40
34	Archäologie mit Myonen - Schalzeile des Deutschlandfunks . . . . .	44