

Studien zur Eignung von Silizium Photomultipliern für den Einsatz im erweiterten CMS Detektor am SLHC

von

Jörg Rennefeld

Diplomarbeit in Physik

vorgelegt der

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
der RWTH Aachen

im Februar 2010

angefertigt im

III. Physikalischen Institut B

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Achim Stahl



Überblick

Silizium Photomultiplier sind moderne Halbleiterdetektoren, die das Potential haben, herkömmliche Photomultiplier-Röhren in vielen Anwendungsbereichen zu ersetzen. Im Zuge der Weiterentwicklung des CMS-Experiments am CERN wird ihr Potential für die Verwendung in verschiedenen Detektorkomponenten untersucht.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Temperaturverhalten von Silizium Photomultipliern. Ihr Dunkelstrom ist ein wichtiger Betriebsparameter. Seine Abhängigkeit von der Temperatur wird in dieser Arbeit mit Hilfe von Strom-Spannungskennlinien charakterisiert. Weiterhin wird eine Methode vorgestellt, temperaturstabile Ausgangssignale von Silizium Photomultipliern zu erzielen.

Um das volle Potential der von den Sensoren erzeugten Signale ausschöpfen zu können, ist die Verwendung von angepasster Elektronik notwendig. In dieser Arbeit kommt daher eine Schaltung zum Einsatz, die von der Elektronikabteilung des III. Physikalischen Instituts B speziell für den Betrieb von Silizium Photomultipliern entwickelt wird. Weiterhin werden zwei MPPC-Module untersucht, die von der Firma Hamamatsu Photonics K.K. kommerziell vertrieben werden.

Inhaltsverzeichnis

Überblick	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
1. Einleitung	1
1.1. Aufbau der Arbeit	1
1.2. Konventionen	2
2. Silizium Photomultiplier	3
2.1. Aufbau und Funktion von Lawinenphotodioden	3
2.2. Mechanischer und elektrischer Aufbau von Silizium Photomultipliern . . .	5
3. Large Hadron Collider	11
3.1. Compact Muon Solenoid Experiment	12
3.1.1. Detektorkomponenten	14
3.1.2. Datenerfassung und Datenverarbeitung	15
3.2. LHC und CMS-Ausbaupläne	16
3.2.1. Muon Track fast Tag	17
4. Beschreibung des Messaufbaus	19
4.1. Kühlteststand	19
4.2. Weitere Komponenten des Messaufbaus	21
4.3. Software	23
4.3.1. Aachen Cooling Device Control	23
4.3.2. Keithley Sourcemeter Control	25
5. Hamamatsu MPPC-Modul	29
5.1. Beschreibung und technische Daten	29
5.2. Software	32
5.3. Messungen	34
5.4. Offene Fragen und Probleme	36
5.5. Störungen im analogen Ausgangssignal der MPPC-Module	37

6. Aachen MPPC-Controller	39
7. Strom-Spannungskennlinien von Silizium Photomultipliern	43
7.1. Aufzeichnung von Kennlinien	44
7.2. Kennlinien für Silizium Photomultiplier von Hamamatsu	48
7.3. Temperaturabhängige Anpassung der Betriebsspannung	51
7.4. Vergleich mit Silizium Photomultipliern anderer Hersteller	55
8. Fazit und Ausblick	59
A. Weitere Abbildungen	61
B. Kennlinienscharen weiterer Hamamatsu Sensoren	63
Literaturverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Interner Aufbau einer APD (Hamamatsu S8664-55), sowie der Verlauf des elektrischen Felds.	4
2.2.	Ersatzschaltbild eines Silizium Photomultipliers.	6
2.3.	Prinzip der Signalerzeugung innerhalb eines SiPMs.	6
2.4.	Mikroskopaufnahme eines SiPMs der Firma Hamamatsu Photonics K.K. im Keramikgehäuse.	7
2.5.	Nahaufnahmen der Siliziumoberfläche von Hamamatsu SiPMs.	8
2.6.	Technische Zeichnungen der drei Gehäusevarianten der S10362-Serie.	8
3.1.	Übersicht über den Beschleunigerkomplex des CERN.	12
3.2.	3D-Zeichnung des CMS-Detektors.	13
3.3.	Eine Übersicht des CMS Level-1 Triggers.	17
3.4.	Prinzipschema des Myon Track fast Tag.	18
4.1.	Prinzipskizze des Cold Box Control Serial Interface.	20
4.2.	Ansicht des geöffneten Kühlteststands.	21
4.3.	Ansicht der Spannungsversorgung TDK-Lambda ZUP10-20	21
4.4.	Ansicht der Spannungsversorgung Hewlett-Packard 6634A	22
4.5.	Ansicht des Keithley Model 2400 Sourcemeters	22
4.6.	Ansicht des Tektronix TDS3054 Oszilloskops	22
4.7.	Ansicht des Fluke 8842A Digitalmultimeters	23
4.8.	Screenshot der Benutzeroberfläche von ACDC.	24
4.9.	Flussdiagramm für den Programmablauf des KSC.	27
5.1.	Blockschaltbild eines MPPC-Moduls.	31
5.2.	Eine Draufsicht auf ein Hamamatsu MPPC-Modul.	31
5.3.	Technische Zeichnung des Hamamatsu MPPC-Moduls.	31
5.4.	Programmfenster der MPPC-Modul Software.	32
5.5.	Pulse am analogen Ausgang des MPPC-Moduls.	34
5.6.	Vergleich von zwei Messreihen der beiden MPPC-Module.	35
5.7.	Störungen im analogen Ausgangssignal der MPPC-Module.	38
6.1.	Prototyp der MPPC-Controller-Platine.	39
6.2.	Blockschaltbild der MPPC-Controller-Platine.	40

6.3.	Ansicht eines Stecksockels zur Aufnahme von Silizium Photomultipliern.	42
6.4.	Verschraubung der MPPCC-Platine mit der Bodenplatte des Kühltteststands.	42
7.1.	Ansicht von zwei Gehäusevarianten der Hamamatsu SiPMs.	43
7.2.	IU-Kennlinie des 100U1-SiPM bei $T=20^{\circ}\text{C}$	45
7.3.	Ansicht der Lochrasterplatine mit Stecksockel, Widerstand und Kondensatoren.	46
7.4.	Schaltbild der Glättungsschaltung.	46
7.5.	Vergleich von Kennlinien mit (schwarz) und ohne (blau) die MPPCC-Platine.	47
7.6.	Kennlinienscharen für den 100U1-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller.	49
7.7.	Kennlinienscharen für die Sensoren Typ-50C1 (links) und Typ-25U1 (rechts) mit dem MPPC-Controller.	49
7.8.	Ermitteln des Dunkelstroms anhand der von Hamamatsu empfohlenen Betriebsspannung.	52
7.9.	Kalibrationskurven für den 100U1-Sensor und den 25U1-Sensor.	54
7.10.	Kalibrationskurven für den 100U1-Sensor und den 25U1-Sensor.	54
7.11.	Kennlinienscharen für den 1020X18a-Sensor mit der MPPCC-Platine.	56
7.12.	Kennlinienscharen für den FBK50F1-Sensor (links) und den FBK50F4-Sensor (rechts) mit der MPPCC-Platine.	57
7.13.	Kennlinienscharen für den 1020X18b-Sensor (links) und den 1035X18b-Sensor (rechts) mit der MPPCC-Platine.	57
A.1.	Ansicht eines MPPC-Moduls mit angepasstem Aluminiumwinkel.	61
A.2.	Ansicht einer Silizium APD von Hamamatsu.	61
A.3.	Aufnahme eines Antistatikbeutels mit den Kenndaten des Hamamatsu SiPM.	62
A.4.	Aufnahme eines SiPMs der S10362-11 Serie.	62
B.1.	Kennlinienscharen für den 100U2-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller.	63
B.2.	Kennlinienscharen für den 25U2-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller.	64
B.3.	Kennlinienscharen für den 50C2-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller.	64

Tabellenverzeichnis

2.1. Spezifikationen für die SiPMs der S10362-11 Serie.	9
5.1. Spezifikationen des MPPC-Moduls.	30
6.1. Pinbelegung des D-Sub Steckers und der Pfostenleiste.	41
7.1. Eine Übersicht der verwendeten Silizium Photomultiplier.	44
7.2. Eine Übersicht der Konfigurationsparameter von KSC für Hamamatsu SiPMs.	48

1. Einleitung

Während der Entstehung der vorliegenden Arbeit ist mit dem Neustart des Large Hadron Collider am CERN zum Jahresende 2009 für Teilchenphysiker auf der ganzen Welt eine spannende Zeit angebrochen. Wir erhoffen uns eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen und spannenden Entdeckungen, die einen noch tieferen Einblick in den grundlegenden Aufbau der Materie und unseres Universums erlauben.

Naturgemäß vergehen bei solchen Großexperimenten mit weltweiten Kollaborationen von tausenden Wissenschaftlern vom Beginn der Planungen bis zur Veröffentlichung von Forschungsergebnissen mehrere Jahrzehnte. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass schon jetzt an Möglichkeiten zur Erweiterung und Verbesserung des Teilchenbeschleunigers und seiner Experimente intensiv geforscht wird.

Als Alternative zu herkömmlichen Photomultiplier-Röhren steht mit Silizium Photomultipliern eine vielversprechende Technologie zur Verfügung, die neue Möglichkeiten im Detektorbau eröffnet. Die vorliegende Arbeit stellt die Sensoren und ihre grundlegenden Eigenschaften vor. Unter kontrollierten Umgebungsbedingungen werden Silizium Photomultiplier verschiedener Hersteller auf ihr Temperaturverhalten untersucht. Schließlich wird eine Idee vorgestellt, den Einfluss der Temperatur auf die Ausgangssignale der Sensoren zu kompensieren. Weiterhin wird eine in der Elektronikabteilung des III. Physikalischen Instituts B entwickelte Platine zum Betrieb von Silizium Photomultipliern vorgestellt.

Das Kapitel 1.1 stellt den Inhalt der einzelnen Kapitel dieser Arbeit vor. Verwendete Konventionen werden in Kapitel 1.2 eingeführt.

1.1. Aufbau der Arbeit

Das Kapitel 2 führt die Silizium Photomultiplier ein und stellt ihre Vor- und Nachteile dar. Der Teilchenbeschleuniger *Large Hadron Collider* und seine Experimente werden in Kapitel 3 vorgestellt. Kapitel 4 beschreibt den Aufbau des in dieser Arbeit verwendeten Teststands. Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit MPPC-Modulen der Firma Hamamatsu Photonics K.K.. Eine in der Elektronikabteilung des III. Physikalischen Instituts B entwickelte Platine zum

Betrieb von Silizium Photomultipliern wird in Kapitel 6 vorgestellt. Das Kapitel 7 stellt die Messungen der Strom-Spannungskennlinien von insgesamt 14 Silizium Photomultipliern vor. Das Fazit und einen Ausblick enthält Kapitel 8.

1.2. Konventionen

In dieser Arbeit findet an einigen Stellen die außerhalb der Hochenergiephysik wenig gebräuchliche Einheit Elektronvolt (eV) Anwendung. Ein Elektronvolt entspricht der Änderung der kinetischen Energie eines Elektrons mit Elementarladung e nach dem es im Vakuum eine Potentialdifferenz von 1 V durchquert hat ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Es wird in allen Tabellen und Abbildungen ein Dezimalpunkt an Stelle eines Dezimalkommas verwendet.

Die in Kapitel 7 vorgestellten Strom-Spannungskennlinien sind in Sperrrichtung aufgezeichnet. Alle Spannungs- und Stromwerte in Sperrrichtung in dieser Arbeit tragen ein positives Vorzeichen. Wenn nicht anders angegeben, zeigen alle Graphen den dritten Quadranten.

2. Silizium Photomultiplier

Als Silizium Photomultiplier (SiPM) bezeichnet man Halbleiterbauelemente, die aus einem Array von Lawinenphotodioden (Avalanche Photodiodes – APDs) bestehen. Eine einzelne APD des Arrays wird in diesem Zusammenhang Pixel genannt. Neben der Bezeichnung SiPM gibt es für diese Art Bauelement noch weitere gebräuchliche Bezeichnungen: Multi Pixel Photon Counter (MPPC), Pixelated Photon Detector (PPD) und Micro-Pixel Avalanche Photodiode (MAPD).

So wie der Transistor das Halbleiterpendant zum Röhrenverstärker darstellt, sind APDs bzw. SiPMs das Halbleiterpendant zu Photomultiplier-Röhren (Photomultiplier Tubes – PMTs). Je nach gewünschtem Einsatzbereich haben beide Technologien Vor- und Nachteile. Zur Instrumentierung großer Flächen, beispielsweise in den Astroteilchenphysik-Großexperimenten Superkamiokande [36] oder IceCube [19], sind PMTs sehr gut geeignet. Superkamiokande setzt PMTs mit einem Durchmesser der photosensitiven Fläche von etwa 50 cm (20 inch) ein. SiPMs hingegen sind kommerziell zur Zeit mit Flächen von bis zu 5 mm x 5 mm erhältlich. Etwas größere Flächen lassen sich durch SiPM Arrays abdecken. Dort sind einzelne SiPMs mechanisch auf einem Trägermaterial zusammengefügt und elektrisch verbunden. Vorteile gegenüber PMTs bieten SiPMs vor allem durch ihre schnellen Signale, ihren problemlosen Betrieb innerhalb von Magnetfeldern und ihre geringe Versorgungsspannung ($U < 100\text{ V}$). Desweiteren sind Silizium Photomultiplier mechanisch unempfindlich, bieten eine hohe Zeitauflösung und eine hohe Photon-Nachweiswahrscheinlichkeit. Allerdings besitzen sie eine höhere Temperaturabhängigkeit als PMTs. Dieses Kapitel stellt den Aufbau und die Funktion von Silizium Photomultipliern vor.

In Kapitel 2.1 wird das Funktionsprinzip von Lawinenphotodioden erläutert. Darauf aufbauend beschäftigt sich Kapitel 2.2 mit dem mechanischen und dem elektrischen Aufbau von Silizium Photomultipliern.

2.1. Aufbau und Funktion von Lawinenphotodioden

Im Gegensatz zu normalen Photodioden verstärken Lawinenphotodioden durch ihren internen Aufbau das von einfallenden Photonen erzeugte Signal. Sie nutzen dabei den bei

hohen elektrischen Feldstärken auftretenden Effekt der Stoßionisation. Der interne Aufbau einer APD (wie die verwendeten Halbleitermaterialien, die Dotierung, die Geometrie, etc.) kann je nach Verwendungszweck und beabsichtigtem Verhalten der Diode verschiedenste Formen annehmen. Im Allgemeinen gibt es in jeder Lawinenphotodiode einen Bereich in dem durch das Anlegen einer äußeren Spannung ein so starkes elektrisches Feld erzeugt wird, dass Stoßionisation auftritt.

Abbildung 2.1 zeigt anhand des Modells S8664-55 von Hamamatsu exemplarisch den Aufbau einer APD. Dieses Modell wird im elektromagnetischen Kalorimeter des CMS-Detektors zur Auslese von Bleiwolframat-Kristallen eingesetzt (vergleiche Kapitel 3.1.1). Ein Foto der Diode ist in Abbildung A.2 gezeigt. Man erkennt, dass im Bereich des Übergangs vom p-dotierten in den n-dotierten Bereich das elektrische Feld am stärksten ist. Hier findet die lawinenartige Vervielfachung der Ladungsträger statt. Die beiden Einbuchtungen sind Schutzringe (Guard Rings) zur Begrenzung von Oberflächenleckströmen.

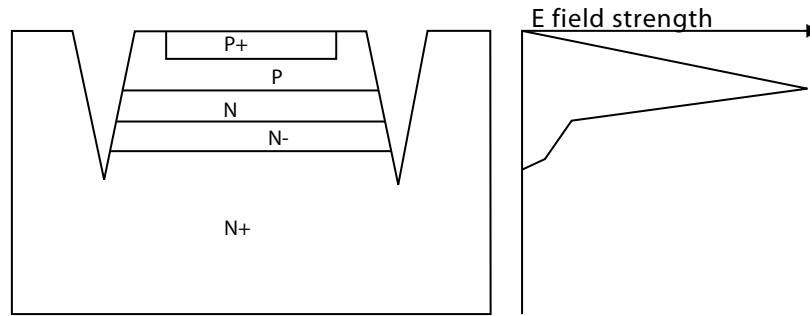


Abbildung 2.1.: Interner Aufbau einer APD (Hamamatsu S8664-55), sowie der Verlauf des elektrischen Felds [43, Seite 5]. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu.

Der Ionisierungskoeffizient beschreibt die Anzahl der von einem Ladungsträger je zurückgelegter Wegstrecke erzeugten Elektron-Loch-Paare. Elektronen und Löcher haben voneinander verschiedene Ionisierungskoeffizienten. Diese hängen von der elektrischen Feldstärke und der Temperatur ab. Man die Verstärkung einer APD in Abhängigkeit der angelegten Sperrspannung V_{Bias} in drei Bereiche unterteilen. V_{BD} steht hierbei für die Durchbruchspannung (von engl. Breakdown).

$0 < V_{\text{Bias}} < V_{\text{APD}}$: In diesem Bereich ist die Verstärkung eins. Die APD verhält sich wie eine Photodiode. Jedes einfallende Photon erzeugt maximal ein Elektron-Loch-Paar. Die Feldstärke im Inneren der Diode reicht nicht aus um Sekundärionisation zu ermöglichen. Die Ionisierungskoeffizienten von Elektronen und Löchern sind null.

$V_{\text{APD}} < V_{\text{Bias}} < V_{\text{BD}}$: Dieser Bereich wird Proportionalbereich genannt. Die Verstärkung nimmt einen endlichen Wert größer als eins an. Der genaue Wert ist abhängig von der angelegten Sperrspannung und unterliegt statistischen Fluktuationen. Für die

S8664-55 APD liegt der erreichbare Verstärkungsfaktor bei 300 [22, Seite 2]. Vereinfacht kann man sich vorstellen, dass nur der Ionisierungskoeffizient der Elektronen größer als null ist. Daher entstehen beim Driften der Elektronen durch die Zone mit hohem elektrischen Feld weitere Elektron-Loch-Paare. Es bilden sich Lawinen von Ladungsträgern aus, die zur Anode bzw. Kathode wandern. Da die Löcher keine Sekundärionisation hervorrufen, kommt die Lawine zum Erliegen wenn alle Elektronen die Zone des hohen elektrischen Felds verlassen haben.

$V_{\text{Bias}} > V_{\text{BD}}$: Wird das elektrische Feld innerhalb der Diode so groß, dass auch der Ionisierungskoeffizient der Löcher größer als null ist, entsteht eine kontinuierliche Lawinenentladung. Diese kommt nicht von selbst zum Erliegen, da immer wieder neue Ladungsträger erzeugt werden. Auch die neu erzeugten Ladungsträger driften durch die Hochfeldzone und generieren weitere Elektron-Loch-Paare. Der Verstärkungsfaktor wird theoretisch unendlich groß. Allerdings kommt es ohne geeignete Gegenmaßnahmen innerhalb von kürzester Zeit zur thermischen Zerstörung der Diode. Eine häufig verwendete Gegenmaßnahme ist das passive „Löschen“ der Lawinenentladung durch einen in Reihe geschalteten Löschwiderstand. Über dem Löschwiderstand fällt beim Fließen eines Stroms eine Spannung ab. Dadurch sinkt die Spannung an der Diode und die elektrische Feldstärke im Innern fällt unter die Durchbruchspannung. Damit kommt die Lawinenentladung zum Erliegen. Betreibt man eine APD in diesem Spannungsbereich, spricht man bei diesem Betriebsmodus in Analogie zum Geiger-Müller Zählrohr vom „Geiger-Modus“.

Die vorstehenden Ausführungen beschreiben eine idealisierte Vorstellung, die dem grundlegenden Verständnis dienen soll. Eine ausführliche Beschreibung von Lawinenphotodioden und des Lawinendurchbruchs in Halbleitern findet sich in [37, Kapitel 13.4 bzw. Kapitel 2.4].

2.2. Mechanischer und elektrischer Aufbau von Silizium Photomultipliern

Ein einzelnes Pixel eines Silizium Photomultipliers besteht aus einer Lawinenphotodiode. Die APDs sind jeweils mit einem Löschwiderstand in Reihe geschaltet und auf dem gemeinsamen Substrat parallel geschaltet. Abbildung 2.2 zeigt das Ersatzschaltbild eines Silizium Photomultipliers.

Mit dem Betrieb einer APD im Geiger-Modus gewinnt man an Verstärkung der Signale, verliert jedoch die Information über die Anzahl der einfallenden Photonen. Durch die Parallelschaltung vieler APDs in einem SiPM gewinnt man diese Information, im Rahmen seines dynamischen Bereichs, wieder zurück. Abbildung 2.3 zeigt das Prinzip der Signalerzeugung

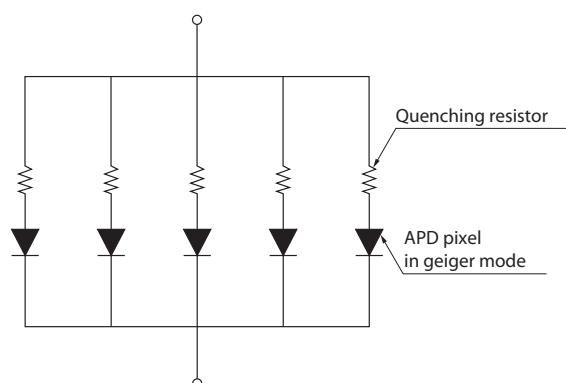


Abbildung 2.2.: Ersatzschaltbild eines Silizium Photomultipliers [20, Abbildung 3].

innerhalb eines SiPMs. Dieses wird im Folgenden kurz skizziert: Zunächst liegt an allen Pixeln die Sperrspannung V_R an. Wird in einem der Pixel ein Elektron-Loch-Paar erzeugt, beginnt die Lawinenentladung. Auf diese Weise fließt ein Strom durch den zugehörigen Löschwiderstand. Durch den Stromfluss fällt eine Spannung über dem Löschwiderstand ab. Damit sinkt die Spannung an der Diode von V_R unter die Durchbruchspannung V_{BR} . Dies sorgt dafür, dass die Lawinenentladung und damit auch der Stromfluss zum Erliegen kommt. Wenn kein Strom mehr fließt, steigt die Spannung an der Diode wieder auf ihren ursprünglichen Wert V_R an. Der Pixel ist bereit für eine erneute Entladung. Dieser Prozess findet in jedem Pixel statt und ist in erster Ordnung unabhängig von den übrigen Pixeln des Sensors. Auf diese Weise erhält man ein zur Anzahl der gleichzeitig durchbrechenden Pixel proportionales Signal.

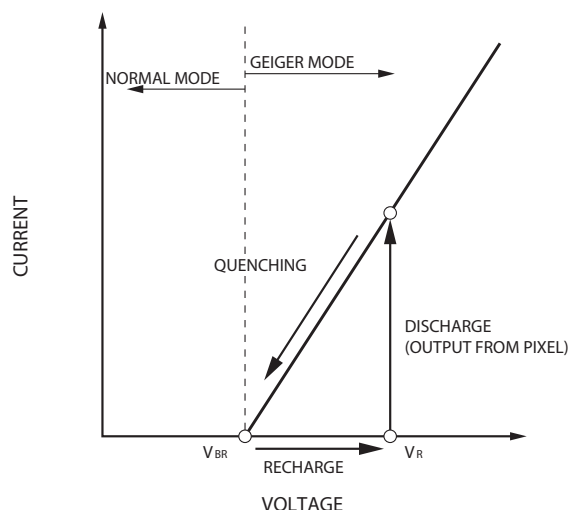


Abbildung 2.3.: Prinzip der Signalerzeugung innerhalb eines SiPMs [20, Abbildung 2].

Die modernen Produktionsverfahren der Halbleitertechnik machen es problemlos möglich, tausende von Pixeln mit ihren Löschwiderständen auf einer Siliziumfläche von einem Quadratmillimeter unterzubringen. Die Mikroskopaufnahme eines SiPMs im Keramikgehäuse ist in Abbildung 2.4 gezeigt. Es handelt sich bei dem gezeigten SiPM um das Modell S10362-13-050C der Firma Hamamatsu mit einer Pixelgröße von $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$. Er ist den Modellen der S10362-11 Serie sehr ähnlich. Eine Übersicht aller in dieser Arbeit verwendeten Silizium Photomultiplier findet sich in Tabelle 7.1.

Abbildung 2.5 zeigt Nahaufnahmen der Siliziumoberfläche von Hamamatsu SiPMs. Durch die Reduzierung der Pixelgröße lassen sich auf gleicher Fläche mehr Pixel unterbringen. Dies erhöht den dynamischen Bereich des Sensors, hat jedoch den Nachteil einer geringeren Nachweiswahrscheinlichkeit für Photonen. Die Nachweiswahrscheinlichkeit sinkt aufgrund des mit der Pixelzahl abnehmenden Füllfaktors (siehe Seite 9).

Die verschiedenen Eigenschaften eines SiPMs lassen sich dem Datenblatt des Herstellers entnehmen. Tabelle 2.1 zeigt das Datenblatt der S10362-11 Serie von Hamamatsu. Silizium Photomultiplier dieser Serie werden in der vorliegenden Arbeit verwendet. Anhand dieses Datenblatts werden im Folgenden die Bezeichnungen der SiPMs und verschiedene Parameter erläutert.

Die S10362-11 Serie fasst drei Sensoren mit unterschiedlichen Pixelzahlen und drei verschiedenen Gehäusevarianten zusammen. Alle Sensoren der Serie haben eine Gesamtfläche von $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$.

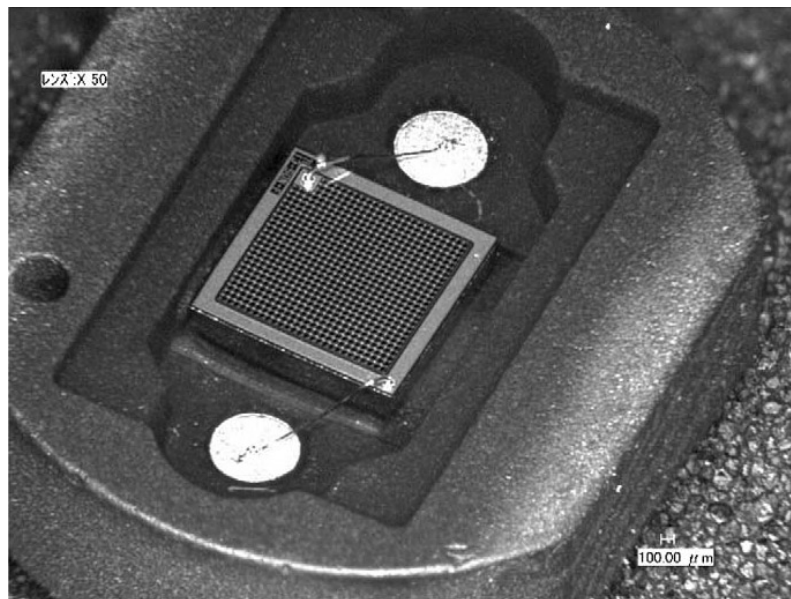


Abbildung 2.4.: Mikroskopaufnahme eines SiPMs der Firma Hamamatsu Photonics K.K. im Keramikgehäuse [44, Abbildung 1].

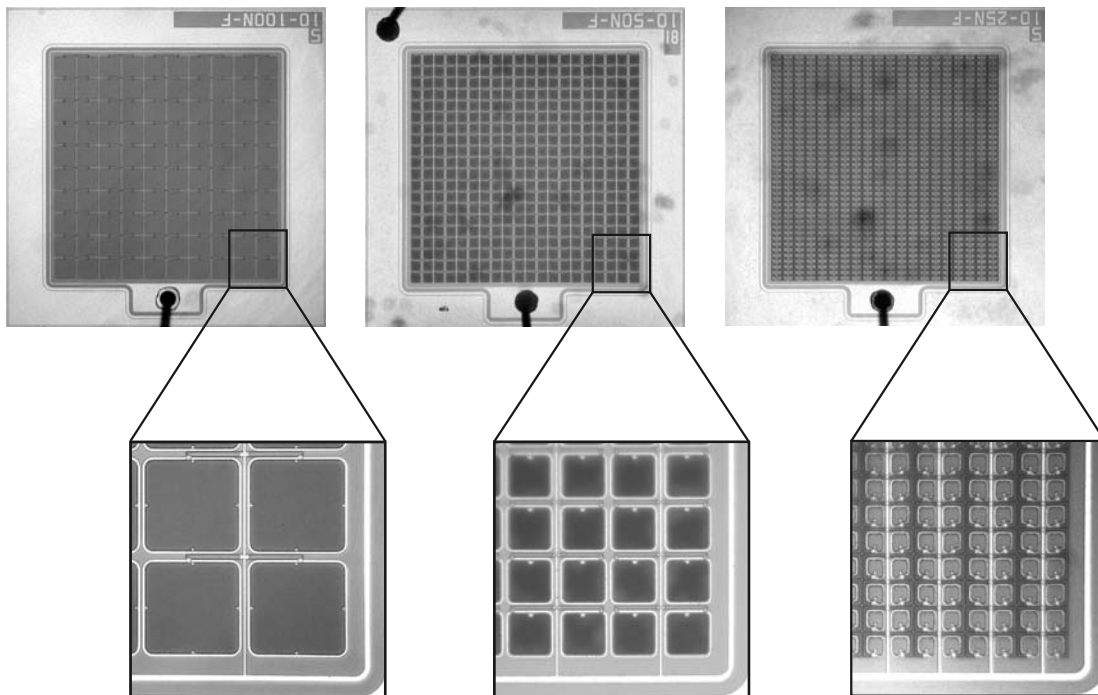


Abbildung 2.5.: Nahaufnahmen der Siliziumoberfläche von Hamamatsu SiPMs. Links ein Sensor mit 100 Pixeln der Größe 100 µm x 100 µm, in der Mitte ein Sensor mit 400 Pixeln der Größe 50 µm x 50 µm und rechts ein Sensor mit 1600 Pixeln der Größe 25 µm x 25 µm.

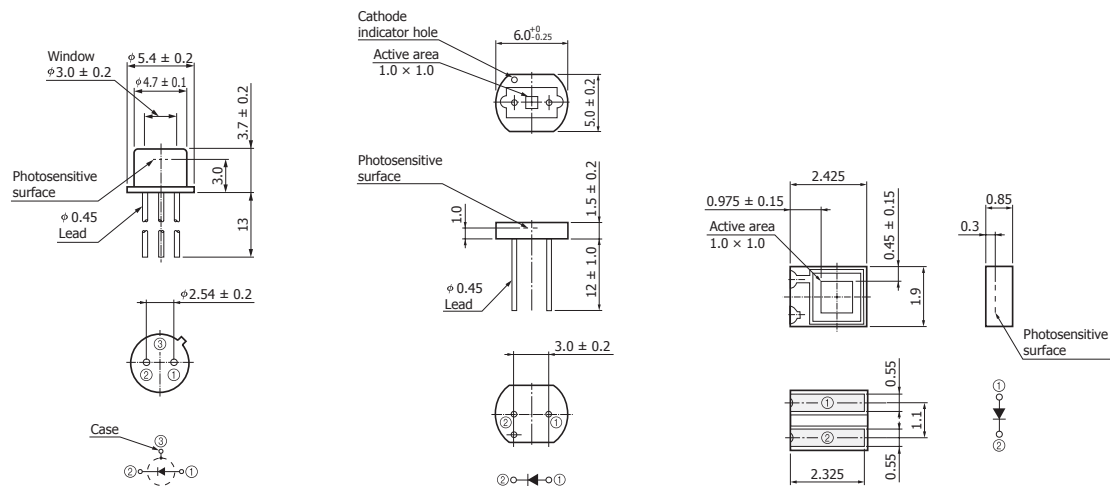


Abbildung 2.6.: Technische Zeichnungen der drei Gehäusevarianten der S10362-Serie [21, Seite 6]. Auf der linken Seite sieht man das Metallgehäuse (U). In der Mitte ist das Keramikgehäuse (C) zu sehen und rechts ist die SMD-Ausführung (P) gezeigt. Alle Abmessungen in mm.

Tabelle 2.1.: Spezifikationen für die SiPMs der S10362-11 Serie [21, Seite 5].

Specifications (Typ. Ta=25 °C, unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	S10362-11 series			Unit
		-025U, -025C, -025P	-050U, -050C, -050P	-100U, -100C, -100P	
Effective active area	-	1 × 1			mm
Number of pixels	-	1600	400	100	-
Pixel size	-	25 × 25	50 × 50	100 × 100	μm
Fill factor *1	-	30.8	61.5	78.5	%
Spectral response range	λ	320 to 900			nm
Peak sensitivity wavelength	λp	440			nm
Photon detection efficiency *2 (λ=λp)	PDE	25	50	65	%
Operating voltage range	-	70 ± 10 *3			V
Dark count *4	-	300	400	600	kcps
Dark count Max. *4	-	600	800	1000	kcps
Terminal capacitance	Ct	35			pF
Time resolution (FWHM) *5	-	200 to 300			ps
Temperature coefficient of reverse voltage	-	56			mV/°C
Gain	M	2.75 × 10 ⁵	7.5 × 10 ⁵	2.4 × 10 ⁶	-

*1: Ratio of the active area of a pixel to the entire area of the pixel

*2: Photon detection efficiency includes effects of crosstalk and afterpulses.

*3: For the recommended operating voltage of each product, refer to the data attached to each product.

*4: 0.5 p.e. (threshold level)

*5: Single photon level

Note: Each value was measured at recommended operating voltage (refer to the data attached to each product).

The last letter of each type number indicates package materials (U: metal, C: ceramic, P: SMD).

Der am Ende der Typenbezeichnung angehängte Buchstabe bezeichnet die Ausführung des Gehäuses. U steht für ein Metallgehäuse. C steht für ein Keramikgehäuse. P steht für ein SMD-Gehäuse. Abbildung 2.6 zeigt technische Zeichnungen der drei Bauformen. Auf der linken Seite sieht man das Metallgehäuse (U). In der Mitte ist das Keramikgehäuse (C) zu sehen und rechts ist die SMD-Ausführung (P) gezeigt. Fotos der Bauformen U und C bzw. P finden sich in Abbildung 7.1 bzw. in Abbildung A.4. Die dreistellige Zahl der Typenbezeichnung bezeichnet die Pixelgröße. Diese gibt es in den Größen 100 μm x 100 μm, 50 μm x 50 μm und 25 μm x 25 μm. Mit sinkender Pixelgröße steigt die Gesamtzahl der Pixel von 100 auf 400, bis hin zu 1600. Die Verstärkung der Sensoren nimmt mit steigender Pixelzahl ab.

Die Verstärkung (gain) lässt sich definieren als das Verhältnis der durch die Lawinenentladung erzeugten Ladungsträger zu den primär durch Photoeffekt oder thermische Anregung erzeugten Ladungsträgern.

Der Füllfaktor (fill factor) bezeichnet das Verhältnis der gesamten aktiven Pixelfläche zur Gesamtfläche eines Sensors. Da der Platzbedarf für den Löschwiderstand und die Metallisierungen gleich bleibt, sinkt der Füllfaktor mit der Pixelzahl.

Die Quanteneffizienz (quantum efficiency) bezeichnet das Verhältnis aus der Anzahl der auf die aktive Fläche einfallenden Photonen und der Zahl der schließlich durch den Photoeffekt erzeugten Elektronen bzw. Löcher. Diese wird nur in älteren Datenblättern der Sensoren angegeben. Sie beträgt mindestens 70 % [20, Seite 3].

Der Lawinkoeffizient (avalanche probability) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein freier Ladungsträger innerhalb der Diode eine Lawinenentladung auslöst. Dieser wird im Datenblatt der Sensoren nicht angegeben und ist daher nicht genau bekannt.

Die Photon-Nachweiswahrscheinlichkeit (photon detection efficiency) eines Silizium Photomultipliers gibt das Gesamtverhältnis aus der Anzahl der einfallenden Photonen und der Anzahl der nachgewiesenen Photonen an. Sie ist das Produkt aus Quanteneffizienz, Füllfaktor und Lawinkoeffizient. Vergleiche hierzu [21, Seite 20].

Auch ohne einfallende Photonen brechen ständig einzelne Pixel eines Sensors durch. Dies geschieht durch die thermische Anregung von Elektron-Loch-Paaren. Daher bezeichnet die Dunkelrate die Anzahl der pro Zeiteinheit durchbrechenden Pixel, ohne dass Photonen auf den Sensor treffen. Die Abkürzung p.e. steht für „photon equivalent“. Ein Photonäquivalent steht für den Puls, der von einem einfallenden Photon erzeugt wird. Es wird als Äquivalent bezeichnet, da das Signal anstelle eines Photons auch von einem thermisch generierten Ladungsträger erzeugt worden sein könnte. Dies lässt sich prinzipbedingt nicht unterscheiden.

3. Large Hadron Collider

Die Europäische Organisation für Kernforschung (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* – CERN) betreibt mit dem Teilchenbeschleuniger *Large Hadron Collider* (LHC) in der Schweiz, in der Nähe von Genf, das weltweit größte wissenschaftliche Experiment [15]. Der Large Hadron Collider wurde im August 2008 in Betrieb genommen, musste jedoch schon nach wenigen Tagen aufgrund von technischen Problemen wieder abgeschaltet werden [8]. Im November 2009 erfolgte ein Neustart und kurz darauf erreichte der LHC mit einer Schwerpunktsenergie 2,36 TeV (Tera-Elektronvolt) einen neuen Energieweltrekord für Proton-Proton Kollisionen.

Das Design des LHC sieht vor, dass in ihm Protonen auf eine Energie von sieben TeV beschleunigt und mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV zur Kollision gebracht werden. Weiterhin sind auch Experimente mit im Beschleuniger umlaufenden Bleiionen geplant. Diese sollen dann auf eine Energie von bis zu 2,74 TeV/u (Energie pro Nukleon) beschleunigt werden. Bis diese Designparameter tatsächlich erreicht werden, wird noch einige Zeit vergehen. Während der Entstehung der vorliegenden Arbeit wird der Beschleuniger auf das Erreichen einer Schwerpunktsenergie von 7 TeV vorbereitet.

Der LHC-Ring liegt in einer durchschnittlichen Tiefe von 100 m und hat einen Umfang von etwa 27 km. Die im Ring umlaufenden Teilchenpakete werden von insgesamt 1232 supraleitenden Dipolmagneten auf ihrer Kreisbahn gehalten. Dazu ist es nötig die einzelnen Sektoren des Beschleunigerrings auf eine Temperatur von $-271,3^{\circ}\text{C}$ abzukühlen. Nur bei dieser Temperatur erreichen die mit suprafluidem Helium gekühlten Magneten die nötige Feldstärke, um die Teilchen auf ihrer Kreisbahn zu halten. Bevor die Protonen oder Bleiionen den LHC selbst erreichen, durchlaufen sie eine ganze Kette von Vorbeschleunigern. Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht über den Beschleunigerkomplex des CERN. Nähere Informationen zum LHC finden sich im Design Report [24].

Um den Ring des Large Hadron Collider verteilt gibt es vier Wechselwirkungspunkte, an dem die Teilchen zur Kollision gebracht werden. An jedem dieser Wechselwirkungspunkte steht eines der vier Großexperimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. Zusätzlich gibt es noch eine Reihe weiterer, kleinerer Experimente.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment, [6]) ist spezialisiert auf die Analyse der Kollisionen von Bleiionen. ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS, [7]) und CMS (Compact Muon

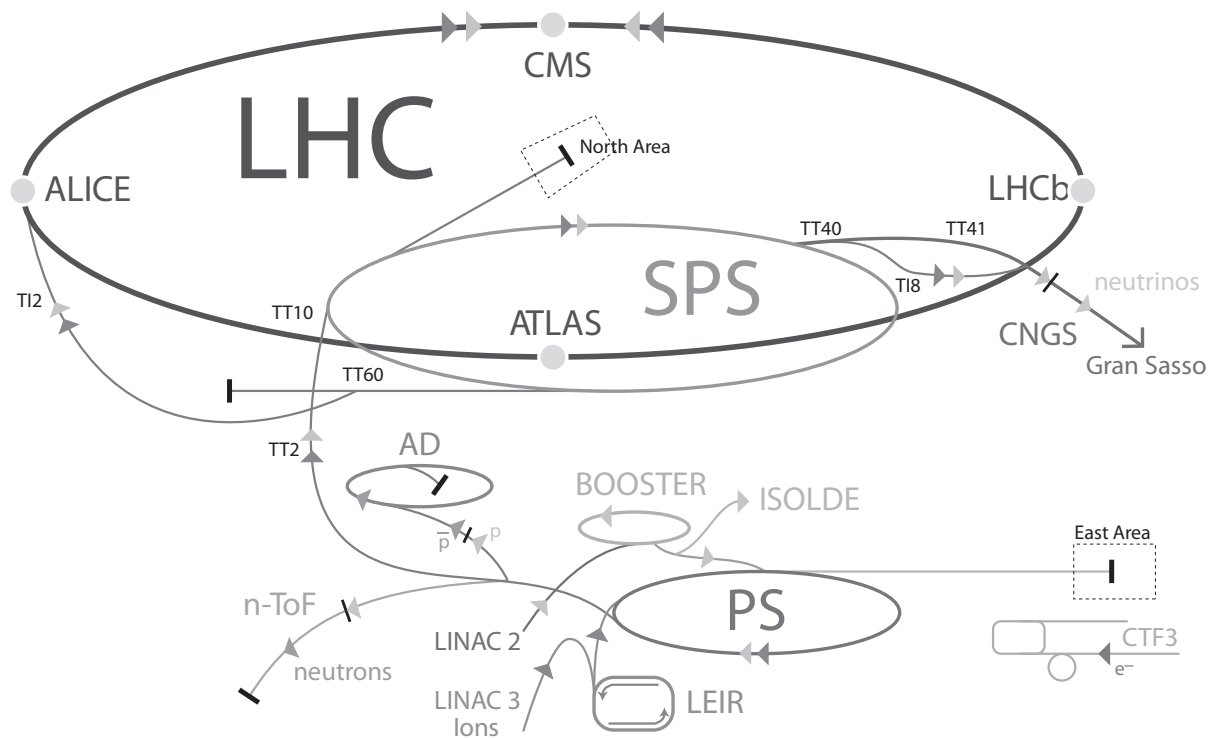


Abbildung 3.1.: Übersicht über den Beschleunigerkomplex des CERN [41]. Eine kurze Erklärung und eine Einführung der Bezeichnungen findet sich in [41, Seite 12f]

Solenoid, [39]) sind Allzweckdetektoren. Sie sollen das größtmögliche Spektrum an physikalischen Fragestellungen abdecken. LHCb (The Large Hadron Collider beauty experiment, [40]) ist auf Physik mit B-Hadronen spezialisiert.

Das CMS-Experiment ist eine der größten internationalen wissenschaftlichen Kollaborationen. Im August 2008 hatte die Kollaboration, in deren Rahmen auch die vorliegende Arbeit entstanden ist, 3600 Mitglieder von 183 Instituten aus 38 Ländern.

Kapitel 3.1 stellt den CMS-Detektor in Kürze näher vor. Die Pläne für den Ausbau des Beschleunigers und des CMS-Detektors werden in Kapitel 3.2 erläutert.

3.1. Compact Muon Solenoid Experiment

Der CMS-Detektor besitzt, wie fast alle Detektoren am LHC, riesige Ausmaße. Bei einer Länge von 21,6 m und einem Durchmesser von 14,6 m besitzt er eine Gesamtmasse von ca. 12500 t. Abbildung 3.2 zeigt eine dreidimensionale Zeichnung des Detektors. Er besteht aus

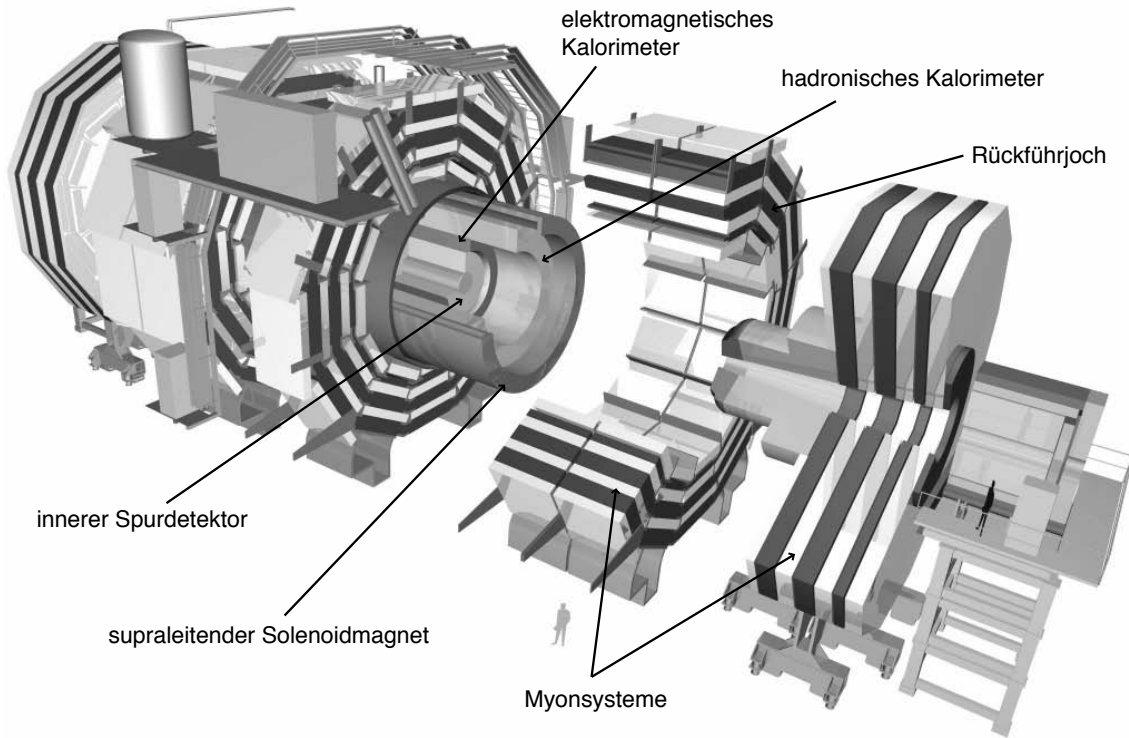


Abbildung 3.2.: 3D-Zeichnung des CMS-Detektors [10].

einem zentralen „Barrel“-Bereich und zwei Endkappen-Bereichen. Die Endkappen schließen sich jeweils links und rechts an den Zentralteil an. Der gesamte Detektor besteht aus fünf Hauptkomponenten. Dies sind, in der Reihenfolge von Innen nach Außen, der innere Spurdetektor, das elektromagnetische Kalorimeter, das hadronische Kalorimeter, der supraleitende Solenoidmagnet und das Myonsystem. Die einzelnen Komponenten decken jeweils unterschiedliche Raumwinkelbereiche ab. Diese Abdeckung wird üblicherweise in der Raumkoordinate η angegeben. Die Raumkoordinate η wird Pseudorapidität genannt und berechnet sich aus dem Polarwinkel θ gemäß

$$\eta = -\ln \tan(\theta/2) . \quad (3.1)$$

Die Definition des CMS-Koordinatensystems findet sich in [4, Kapitel 1.2]. Das Gesamtkonzept des zylindersymmetrisch um die Strahlachse aufgebauten Detektors ordnet sich dem großen supraleitenden Magneten unter, dessen Magnetfeld mit einer Stärke von 3,8 T den gesamten Detektor in Inneren durchsetzt. Außer dem Myonsystem befinden sich alle Komponenten innerhalb des Magneten. Dies ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber dem zweiten, ebenfalls als Universaldetektor ausgelegten ATLAS-Experiment.

Ein idealer Detektor sollte möglichst den gesamten Raumwinkelbereich von 4π abdecken, den Teilchen möglichst wenig nicht instrumentierte Materie in den Weg stellen und dennoch ihre gesamte Energie messen können. Diese Anforderungen stehen im Widerspruch zueinander. So müssen beim Design eines Detektors in Bezug auf diese Idealvorstellungen Kompromisse eingegangen werden.

In Kapitel 3.1.1 werden die einzelnen Komponenten des CMS-Detektors erläutert. Das Kapitel 3.1.2 geht auf die Erfassung und Verarbeitung der mit dem CMS-Detektor produzierten Daten ein.

3.1.1. Detektorkomponenten

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die einzelnen Detektorkomponenten des CMS-Detektors.

Innerer Spurdetektor: Der innere Spurdetektor befindet sich möglichst nah an der Strahlachse. Mit einem radialen Abstand von $r = 4,4$ cm zur Strahlachse beginnt der Siliziumpixeldetektor. Dieser wird in einem Abstand von $r = 21$ cm von einem Siliziumstreifendetektor abgelöst. Diese beiden Komponenten des inneren Spurdetektors haben die Aufgabe den Impuls und die Flugstrecke von geladenen Teilchen genau zu vermessen. Der Pixeldetektor deckt einen Akzeptanzbereich von $|\eta| < 2,4$ ab, wohingegen der Siliziumstreifendetektor eine Abdeckung bis $|\eta| < 2,5$ gewährleistet. Weiterführende Literatur zum inneren Spurdetektor findet sich in [12, Kapitel 3].

Elektromagnetisches Kalorimeter: Das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL) besteht aus über 80000 Bleiwolframat-Kristallen deren Szintillationslicht von Lawinenphotodioden bzw. Vakuumphototrioden aufgenommen wird. Zu Lawinenphotodioden vergleiche auch Kapitel 2.1. Das ECAL befindet sich in einem radialen Abstandsbereich von $129 \text{ cm} < r < 175 \text{ cm}$ zur Strahlachse und deckt einen Akzeptanzbereich von $|\eta| < 3,0$ ab. Die Energie von Photonen und Elektronen soll hier vollständig absorbiert und präzise vermessen werden. Weiterführende Literatur zum elektromagnetischen Kalorimeter findet sich in [12, Kapitel 4].

Hadronisches Kalorimeter: Das hadronische Kalorimeter (HCAL) ist als so genanntes „Sampling“-Kalorimeter ausgeführt. Es wechseln sich Lagen aus Absorbermaterial und Szintillatormaterial innerhalb des Kalorimeters ab. Als Absorbermaterial kommen Messingplatten zum Einsatz. Das Szintillationslicht von Plastikszintillatoren wird von Hybrphotodioden aufgenommen. Das hadronische Kalorimeter erstreckt sich über einen radialen Abstandsbereich von $181 \text{ cm} < r < 286 \text{ cm}$ zur Strahlachse und deckt einen Akzeptanzbereich von $|\eta| < 3,0$ ab. Das *Hadron-Forward* (HF) Kalorimeter erweitert diesen Bereich bis zu einer Abdeckung von $|\eta| < 5,0$. Dort

kommen Stahlplatten mit Quarzfasern anstelle von Messingplatten und Photomultiplier anstelle von Hybridephotodioden zum Einsatz. Weiterführende Literatur zum hadronischen Kalorimeter findet sich in [12, Kapitel 5].

Magnetsystem: Der mit flüssigem Helium gekühlte, supraleitende Solenoidmagnet krümmt die Flugbahn elektrisch geladener Teilchen und ermöglicht so ihre Impulsbestimmung. Weiterführende Literatur zum Magnetsystem findet sich in [12, Kapitel 2].

Myonsystem: Das Myonsystem befindet sich außerhalb des Magneten und ist in eine Trägerstruktur aus Eisen eingebettet. Diese Trägerstruktur dient einerseits der Stabilisierung des Detektors und andererseits als Rückführjoch für das Magnetfeld. Im Myonsystem kommen drei verschiedene Detektorkomponenten zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Driftröhrenkammern, Kathodenstreifenkammern und Widerstandsplattenkammern. Das Myonsystem hat einen Akzeptanzbereich von $|\eta| < 2,4$. Um diese Abdeckung zu erreichen, besitzt es eine aktive Fläche von etwa 25000 m^2 . Weiterführende Literatur zum Myonsystem findet sich in [12, Kapitel 7].

3.1.2. Datenerfassung und Datenverarbeitung

Beim Betrieb des LHC mit der Designluminosität von $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ treten pro Sekunde etwa 600 Millionen Kollisionen auf. Nur ein winziger Bruchteil davon ist relevant für physikalische Analysen. Da nicht vorhersagbar ist, wann eine interessante Wechselwirkung auftritt, müssen möglichst alle Kollisionen vom Detektor erfasst werden. Durch mehrere Millionen Auslesekanäle des CMS-Detektors kommt innerhalb von kürzester Zeit eine gigantische Datenmenge zusammen. Es ist daher unerlässlich die Daten von nicht relevanten Ereignissen möglichst früh in der Auswertungskette zu verwerfen. Dazu kommt beim CMS-Detektor ein komplexes, mehrstufiges Trigger-System zum Einsatz. Das unterste Trigger-System ist der Level-1 Trigger. Es ist in spezieller Hardware ausgeführt und befindet sich direkt am Detektor. Der Level-1 Trigger verarbeitet die Eingaben aller Detektorsysteme bis auf den inneren Spurdetektor. Die Trigger-Systeme der höheren Stufen (L2, L3) sind im *High Level Trigger* (HLT) zusammengefasst. Die Algorithmen des HLT sind in Software ausgeführt und werden von einer Rechnerfarm aus kommerzieller Hardware in der Nähe des Detektors verarbeitet. Durch die Realisierung in Software ist es beim HLT im Gegensatz zum Level-1 Trigger möglich, ohne großen Aufwand Anpassungen vorzunehmen. Weiterführende Literatur zum Trigger-System findet sich in [12, Kapitel 8].

Trotz der erheblichen Datenreduzierung durch das Trigger-System bleibt immer noch eine riesige Datenmenge übrig. Beim Betrieb des LHC mit Designparametern fällt jährlich eine Datenmenge von etwa 15 Pebibyte (1 PiB = 2^{50} Byte) an. Diese Datenmenge entspricht der Speicherkapazität von etwa 16900 handelsüblichen Terabyte-Festplatten. Sie muss nicht nur

archiviert sondern auch Wissenschaftlern in der ganzen Welt verfügbar gemacht werden. Zu diesen Zwecken wurde das *Worldwide LHC Computing Grid* (WLCG) eingerichtet [42]. Das WLCG bündelt die Ressourcen von weltweit 170 Computing Centern in 34 Ländern. Es basiert auf einem global verteilten Modell zur Datenspeicherung und Analyse. Nähere Informationen zu dem Modell und der Struktur des WLCG finden sich in [33] oder in [12, Kapitel 11].

3.2. LHC und CMS-Ausbaupläne

Während der Entstehung der vorliegenden Arbeit wird der LHC auf Kollisionen mit einer Schwerpunktsenergie von 7 TeV vorbereitet. Es wird noch einige Jahre dauern, bis der LHC mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV und mit einer Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ seine Designwerte erreicht. Da bei einem Experiment dieser Größenordnung vom Beginn der Planungen bis zur Veröffentlichung von ersten physikalischen Ergebnissen durchaus mehrere Jahrzehnte vergehen können, werden bereits Konzepte für einen Ausbau des LHC zum *Super Large Hadron Collider* (SLHC) entwickelt. Die Planung für den SLHC sieht vor, die Luminosität schrittweise auf einen Maximalwert von $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zu erhöhen. Dies würde es den Experimenten erlauben in kürzerer Zeit mehr Statistik zu sammeln, um dadurch die Genauigkeit ihrer Messungen zu verbessern und Prozesse mit noch geringeren Wirkungsquerschnitten zu untersuchen. An der Schwerpunktsenergie von 14 TeV wird sich nach derzeitigen Plänen für den SLHC nichts ändern.

Auch die Experimente des LHC werden schrittweise erweitert und erhalten verbesserte Komponenten. Es gibt zwei wesentliche Gründe, die einen Austausch von Komponenten notwendig machen. Dies ist zum einen die hohe Strahlenbelastung und die daraus resultierende begrenzte Lebensdauer. Zum anderen sind viele Komponenten der Detektoren nicht zum reibungslosen Betrieb bei einer Luminosität von $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ fähig.

Beim CMS-Detektor ist das Trigger-System eine der Komponenten, die für einen Betrieb unter SLHC Bedingungen ausgetauscht werden müssen. Abbildung 3.3 zeigt eine Übersicht des CMS Level-1 Triggers. Derzeit werden im Level-1 Trigger des CMS-Detektors keine Informationen des inneren Spurdetektors berücksichtigt. Dies wird aber beim SLHC nötig, wenn man die Raten des Level-1 Triggers auf gleichem Niveau halten möchte. Dies sei am Beispiel des *Global Muon Trigger* erläutert, der einen der Eingabeparameter für den globalen Level-1 Trigger darstellt. Der Transversalimpuls eines Myons ist ein wichtiges Kriterium für eine Triggerentscheidung. Unter SLHC-Bedingungen wird die Myonrate ansteigen, die Rate des Level-1 Triggers soll jedoch konstant bleiben. Mit dem derzeitigen Myonsystem ist dies aufgrund der begrenzten Auflösung der Impulsmessung nicht möglich, zu viele niederenergetische Myonen würden fälschlicherweise als hochenergetisch eingestuft. Der innere

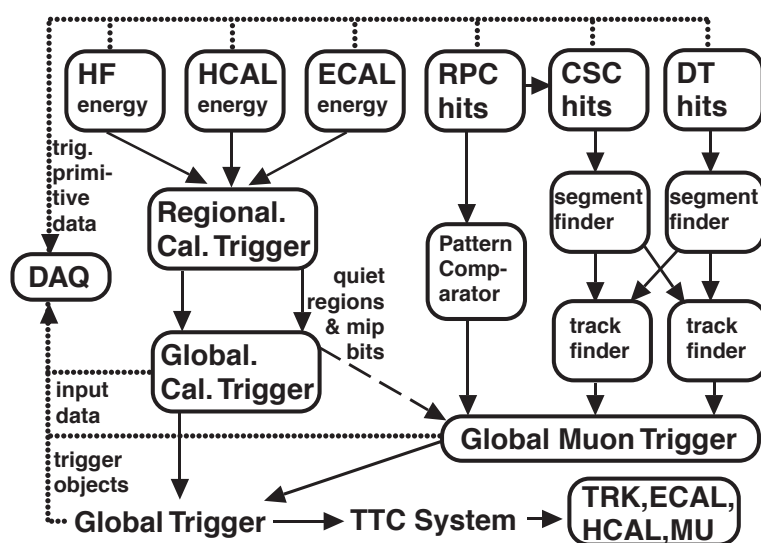


Abbildung 3.3.: Eine Übersicht des CMS Level-1 Triggers [11, Abbildung 1.2]. Die verwendeten Abkürzungen werden in der angegebenen Referenz erläutert.

Spurdetektor ist ideal geeignet um Impulse von geladenen Teilchen wie Myonen über ihre Spurkrümmung zu bestimmen. Macht man seine Messungen dem Myon-Trigger zugänglich, kann man die Auflösung der Impulsmessung verbessern.

Das nächste Abschnitt stellt mit dem *Muon Track fast Tag* eine Idee vor, die genau dieses Ziel verfolgt.

3.2.1. Muon Track fast Tag

Der *Muon Track fast Tag* (MTT) ist ein Vorschlag für die Erweiterung des CMS Myon-Triggers [3]. Seine grundlegende Idee basiert darauf, dem Myon-Trigger Messungen des inneren Spurdetektors zugänglich zu machen, um die Genauigkeit der Bestimmung des Transversalimpulses zu verbessern. Beim aktuellen Trigger-System gibt es ein Zeitfenster von $3,2\,\mu\text{s}$, in dem eine Trigger-Entscheidung fallen muss. In diesem Zeitraum ist es nicht möglich den gesamten inneren Spurdetektor auszulesen und seine Messungen dem Myon-Trigger zuzuführen. Daher soll mit dem MTT eine zusätzliche Detektorkomponente außerhalb des Magneten installiert werden, die es ermöglicht einzelne Teilbereiche des Spurdetektors und innerhalb dieser Teilbereiche nur einzelne Detektorlagen (TkL) für den Trigger auszulesen. Abbildung 3.4 zeigt das Prinzipschema des MTT. Mit Hilfe eines schnellen, 2D-segmentierten Detektors außerhalb des Magneten soll der Durchgang von Myonen registriert werden. Durch die bekannten Positionen der Detektorsegmente und des Wechselwirkungspunkts lässt sich für jedes Detektorsegment ein Volumen im Inneren des Detektors

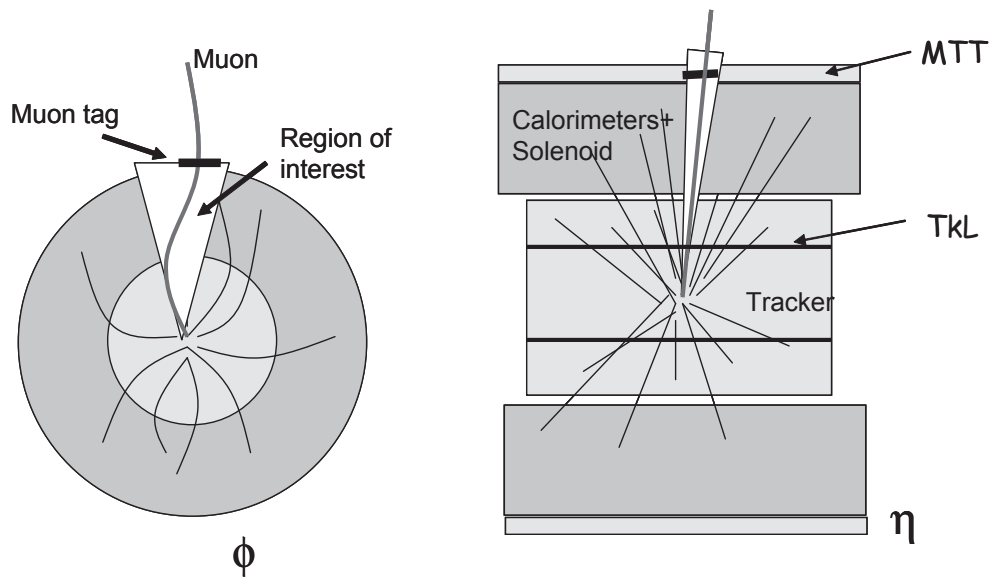


Abbildung 3.4.: Prinzipschema des Myon Track fast Tag [3, Abbildung 3].

definieren, das ein Myon durchflogen haben muss (Region of Interest). Auf diese Weise müssen für jedes getroffene Detektorsegment nur einzelne Lagen im korrespondierende Bereich des inneren Spurdetektors ausgelesen werden. Weiterführende Informationen zum MTT finden sich in [3].

Eine Entscheidung zum Bau des MTT ist noch nicht gefallen. Es gibt auch andere Ansätze das Trigger-System des CMS-Detektors mit Informationen des Spurdetektors zu erweitern. So könnte man mit einem Neubau des inneren Spurdetektors einen eigenen *Tracking Trigger* direkt in den globalen Level-1 Trigger integrieren [30].

Eine Entscheidung für die Technologie, die beim MTT-Detektor zum Einsatz kommen soll, ist ebenfalls noch nicht gefallen. Da jedoch bei der Planung des CMS-Detektors diese Komponente nicht vorgesehen war, ist der verfügbare freie Platz sehr begrenzt (etwa 1 cm in der Höhe). Daher wird zur Zeit der Einsatz von Kacheln aus Plastiksintillator, ausgelesen von Silizium Photomultipliern, favorisiert. Diese Arbeit soll durch Studien von Silizium Photomultipliern dazu beitragen, den Vorschlag des MTT einen Schritt näher an seine tatsächliche Realisierung zu bringen.

4. Beschreibung des Messaufbaus

Dieses Kapitel beschreibt den Messaufbau und seine Funktion. Zunächst wird in Kapitel 4.1 der Kühlteststand vorgestellt. Der Kühlteststand wird für alle Messungen verwendet, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden. Er ermöglicht den Betrieb von Silizium Photomultipliern unter kontrollierten Umgebungsbedingungen. Auf diese Weise ist es möglich, die Parameter von SiPMs im Bezug auf ihre Temperaturabhängigkeiten zu vermessen. In Kapitel 4.2 werden weitere Komponenten des Messaufbaus vorgestellt die für seinen Betrieb und die Messungen notwendig sind. Schließlich wird in Kapitel 4.3 die zugehörige Software vorgestellt und das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten beschrieben.

4.1. Kühlteststand

Die wesentliche Komponente des Messaufbaus ist der Kühlteststand [18]. Er wurde ursprünglich für Modultests von Siliziumstreifendetektoren für den inneren Spurdetektor des CMS-Detektors gebaut.

Die Innentemperatur der Kühlbox lässt sich computergesteuert im Bereich von -20°C bis 30°C regeln (vergleiche Kapitel 4.3). Durch die permanente Spülung mit trockener Luft wird auch bei tiefen Temperaturen die Bildung von Kondenswasser verhindert. Weiterhin ist die Kühlbox auf der Innenseite der Isolationsschicht aus Styrodur C-Platten mit einer Kupferfolie zur elektromagnetischen Abschirmung beklebt. Die Kühlung des Teststands erfolgt durch Peltierelemente, welche direkt mit den Boden- bzw. Deckenplatten des Einschubrahmens aus Aluminium verbunden sind. Die Peltierelemente werden über ein Laborstromgerät versorgt. Ihre Abwärme wird durch eine Wasserkühlung abgeführt, die an die hauseigene Kühlwasserversorgung angeschlossen ist. Die Regelung erfolgt über das *Cold Box Control Serial Interface* (Cooli). Dies ist die mikrocontrollergesteuerte Verbindungseinheit zwischen der Kühlsteuersoftware ACDC (vergleiche Kapitel 4.3), den Sensoren und den Peltierelementen bzw. deren Stromversorgung. Abbildung 4.1 zeigt die Prinzipskizze des Cooli. Ausführliche Informationen zu seiner Funktion finden sich in [18, Kapitel 5.5].

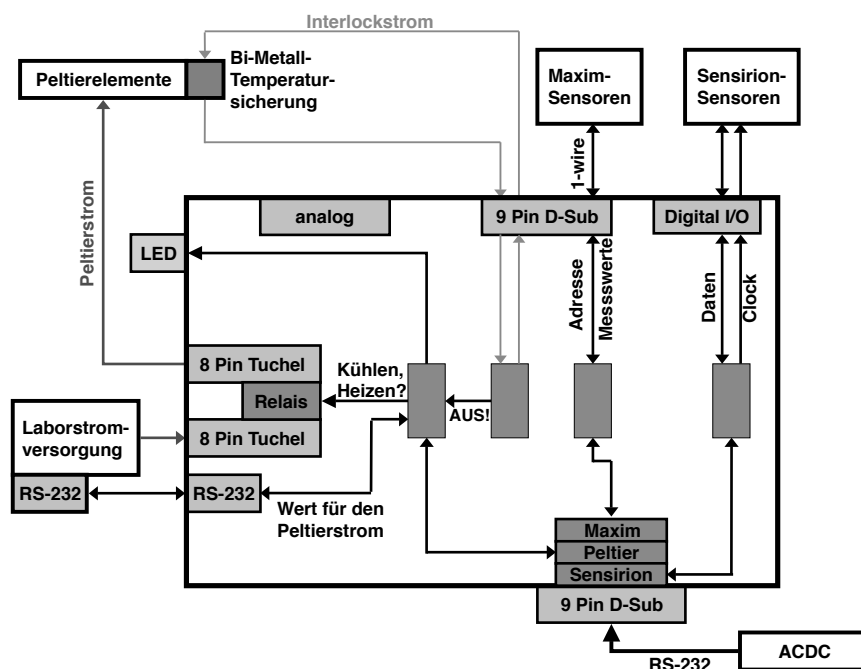


Abbildung 4.1.: Prinzipskizze des Cold Box Control Serial Interface [18]. Die Kommunikation mit einem angeschlossenen PC und dem Laborstromgerät erfolgt über die RS-232 Schnittstelle. Ein Relais schaltet die Richtung des Stromflusses durch die Peltierelemente. Weitere Schnittstellen binden die Temperatur- und Luftfeuchte-Sensoren an. Eine Temperatursicherung verhindert ein Überhitzen der Peltierelemente.

Abbildung 4.2 zeigt die geöffnete Kühlbox mit dem Laborstromgerät und dem Cooli. Das Cooli verarbeitet auch die Signale von Temperatur- und Luftfeuchte-Sensoren. Es kommen hierbei Sensoren der Hersteller Maxim [25] und Sensirion [31] zum Einsatz. Der Maxim-Temperatursensor DS18B20 hat einen Messbereich von -55°C bis 125°C . Die absolute Genauigkeit der Temperaturmessung wird vom Hersteller wie folgt angegeben. Im Temperaturintervall von -10°C bis 85°C liegt sie bei $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ und im gesamten Messbereich bei $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Das Datenblatt sowie technische Informationen zum DS18B20 finden sich in [14]. DS18B20-Temperatursensoren sind an verschiedenen Stellen in der Kühlbox angebracht. Zusätzlich ist auf jeder MPPCC-Platine ein Sensor dieses Typs verbaut. Die MPPCC-Platine wird in Kapitel 6 vorgestellt. Innerhalb des Kühlteststands sind weiterhin zwei Sensoren vom Typ SHT11 der Firma Sensirion verbaut. Diese können neben der Temperatur auch die Luftfeuchtigkeit messen. Das Datenblatt sowie technische Informationen zum SHT11 finden sich in [34]. Sie werden in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet, da ihr Messfehler bei Temperaturmessungen größer ist als bei den Maxim Sensoren.

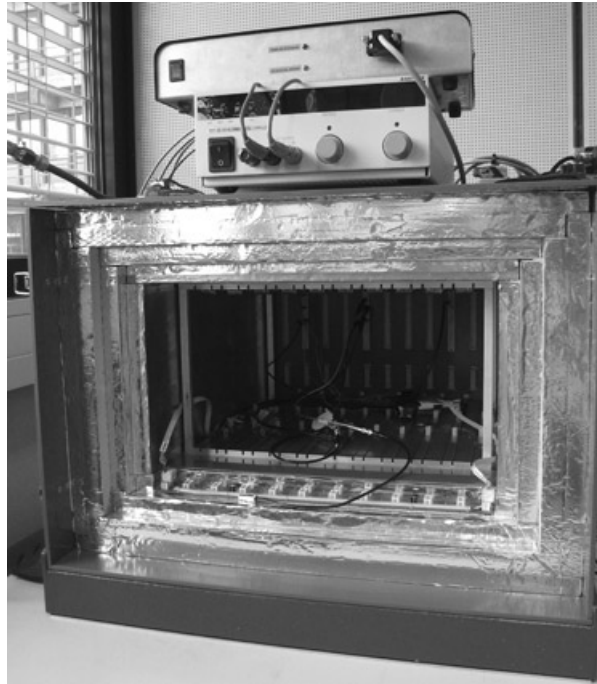


Abbildung 4.2.: Ansicht des geöffneten Kühltteststands. Auf der Kühlbox befinden sich der Cooli (oben) und das Laborstromgerät (unten).

4.2. Weitere Komponenten des Messaufbaus

Die folgende Aufzählung beschreibt weitere Geräte, die in dem Aufbau verwendet werden.

Spannungsversorgung TDK-Lambda ZUP10-20 [45]:

Das ZUP10-20 (Abbildung 4.3) liefert Gleichspannung bis 10 V bei einer Leistung von bis zu 200 W. Es lässt sich über die lokalen Taster, sowie über die RS-232- und die RS-485-Schnittstelle bedienen. Auch wenn das Gerät vom Netz getrennt wird, bleiben die zuletzt gewählten Einstellungen erhalten. So genügt nach dem Wiedereinschalten ein Druck auf den mit „OUT“ beschrifteten Taster, um den Ausgang des Geräts mit der zuletzt gewählten Spannung zu aktivieren. Zwei dieser Geräte werden zur Spannungsversorgung (± 5 V) der Operationsverstärker auf den MPPCC-Platinen verwendet. Die MPPCC-Platinen werden in Kapitel 6 vorgestellt.



Abbildung 4.3.: ZUP10-20

Spannungsversorgung HP 6634A [1]: Das Hewlett-Packard 6634A (Abbildung 4.4) liefert Gleichspannung bis 100 V bei einer elektrischen Leistung von bis zu 100 W. Es lässt sich über das lokale Bedienfeld sowie über eine GPIB-Schnittstelle bedienen. Eines dieser Geräte liefert die benötigte Sperrspannung für die Silizium Photomultiplier. Dies sind in Abhängigkeit des verwendeten Sensors maximal 80 V. Es lassen sich mit einem Gerät auch problemlos mehrere SiPMs versorgen. Die individuelle Sperrspannung jedes einzelnen Sensors wird über einen Spannungsregler auf der MPPCC-Platine (siehe Kapitel 6) eingestellt.



Abbildung 4.4.: HP 6634A

Keithley Model 2400 Sourcemeter [27]: Das Keithley Model 2400 Sourcemeter (Abbildung 4.5) wird im Messaufbau als Spannungsquelle verwendet. Es hat die Fähigkeit Strom und Spannung hochpräzise gleichzeitig zu messen. Das Keithley 2400 besitzt sowohl eine RS-232- als auch eine GPIB-Schnittstelle, über die das Gerät gesteuert werden kann und die Messwerte zur weiteren Analyse übertragen werden können. Aufgrund seiner Fähigkeit Ströme mit einer Auflösung von 10 pA zu messen, ist es für die Anwendung mit Silizium Photomultipliern sehr gut geeignet. Für die vorliegende Arbeit ist das Keithley 2400 das wichtigste Messgerät.



Abbildung 4.5.: Model 2400 Sourcemeter

Tektronix TDS3054 Oszilloskop [38]: Das Tektronix TDS3054 (Abbildung 4.6) ist ein digitales Speicheroszilloskop mit vier Kanälen und einer Bandbreite von 500 MHz. Die Messwerte werden mit einer Rate von 5 GHz erfasst und mit einer Genauigkeit von 8 Bit digitalisiert. Das Oszilloskop ist mit dem Zusatzmodul TDS-3GV ausgerüstet, welches neben einem VGA-Ausgang zum Anschluss externer Anzeigen eine RS-232- und eine GPIB-Schnittstelle zur Steuerung und Datenübertragung bereitstellt.



Abbildung 4.6.: TDS3054

Fluke 8842A Digital Multimeter [2]: Das Fluke 8842A (Abbildung 4.7) ist ein digitales, 5¹/₂-stelliges Tischmultimeter. Kalibriert hat es für ein Jahr eine Grundgenauigkeit von 0,005 %. Eine GPIB-Schnittstelle ermöglicht eine Fernsteuerung des Geräts sowie die Übertragung von Messdaten an einen angeschlossenen Computer.



Abbildung 4.7.: Fluke 8842A

4.3. Software

Zum Betrieb des Teststands und zur Durchführung von Messungen wird auf diverse Software zurückgegriffen, welche auf zwei verschiedenen Computern ausgeführt wird. Ein Computer verwendet das Microsoft Betriebssystem Windows XP, der andere verwendet Debian GNU/Linux 5.0. Die Verwendung von zwei verschiedenen Betriebssystemen auf zwei Computern ist notwendig, da kein Betriebssystem sämtliche benötigte Software unterstützt.

Die zentrale Steuersoftware für den Kühltteststand wird in Kapitel 4.3.1 vorgestellt. In Kapitel 4.3.2 wird eine Anwendung zur Aufzeichnung von Strom-Spannungskennlinien vorgestellt.

4.3.1. Aachen Cooling Device Control

Das *Aachen Cooling Device Control* (ACDC) ist die zentrale Steuersoftware für den Kühltteststand. Es kommuniziert direkt über die RS-232-Schnittstelle mit dem Cooli. ACDC ist als virtuelles Instrument (VI) für National Instruments LabVIEW [29] ausgeführt. Es wurde ursprünglich für LabVIEW 6i unter Windows entwickelt [18, Kapitel 5.6]. Leider steht diese Version nicht mehr zur Verfügung. Daher werden Modifikationen an ACDC vorgenommen, um es unter LabVIEW 8.5 lauffähig zu machen. Weitere Veränderungen sind nötig, um die Kommunikation von ACDC mit einer anderen Software als dem ursprünglich vorgesehenen ARCS zu ermöglichen. ARCS steht für *APV Readout Controller Software*. Es handelt sich um eine ebenfalls als LabVIEW VI ausgeführte Software, die für Modultests von Siliziumstreifenmodulen des CMS-Spurdetektors verwendet wurde.

Abbildung 4.8 zeigt ein Fenster der graphischen Bedienoberfläche von ACDC. In ihm werden die Messdaten aller Sensoren, der Status der Regelung und verschiedene weitere Parameter übersichtlich dargestellt. Als zentrale Steuersoftware für den Kühlprozess wertet ACDC die Messwerte der Temperatur- und Luftfeuchte-Sensoren des Kühlteststands aus. Aus diesen Informationen und der Angabe eines Regelsensors sowie dessen Nominaltemperatur regelt die Software die Stromstärke und die Stromrichtung des Laborstromgeräts, welches die Peltierelemente versorgt.

Der Regelsensor ist ein ausgewählter Sensor, dessen Ist-Temperatur durch die Regelung der Nominaltemperatur angeglichen wird. Neben der Regelung erfolgt die Überwachung des Kühlprozesses auf Abbrüche der Kommunikation und die Einhaltung von Sicherheitsgrenzwerten von Temperatur und Luftfeuchtigkeit. So wird bei Bedarf der Regelprozess unterbrochen und eine Beschädigung der Geräte verhindert. Tritt ein Leck im Kühlwasserkreislauf auf, wird das austretende Wasser von einer Wanne aufgefangen. Durch einen Feuchtigkeitssensor in der Wanne werden zwei Magnetventile geschaltet, welche Zu- und Ablauf des Kühlwasserkreislaufs verschließen.

Dieses System ist unabhängig von ACDC. Dort wird jedoch das Auslösen der Magnetventile durch den Anstieg der Kühlwassertemperatur erkannt und der Regelprozess dementsprechend unterbrochen.

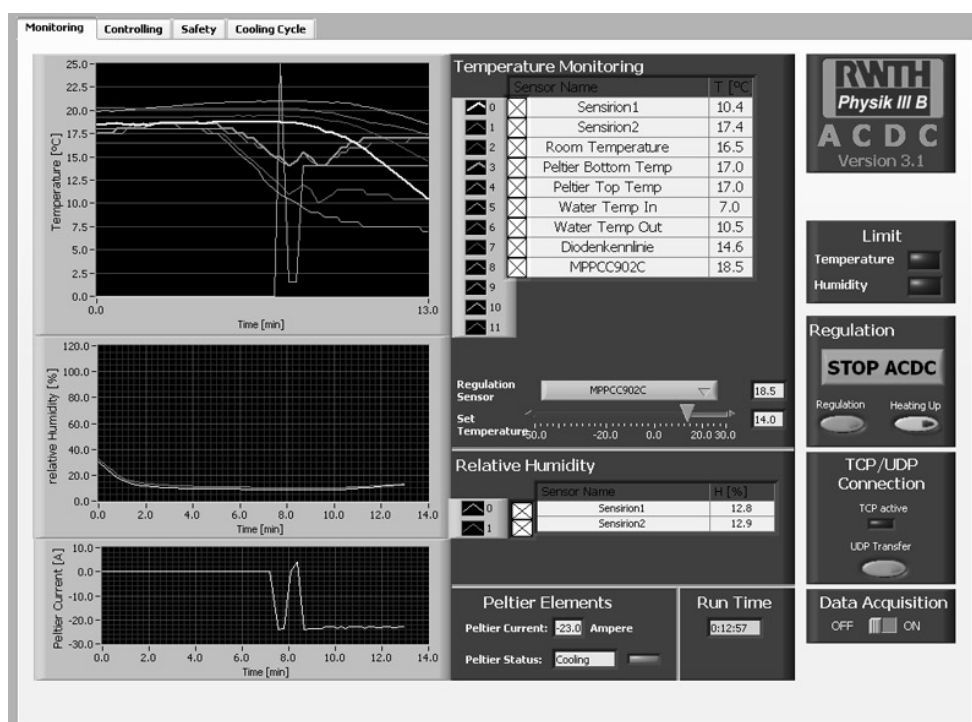


Abbildung 4.8.: Screenshot der Benutzeroberfläche von ACDC.

Zur Kommunikation mit anderen Anwendungen besitzt ACDC einen TCP- und einen UDP-Server. Über eine TCP-Verbindung lässt sich die Nominaltemperatur des aktiven Regelsensors verändern. Die Änderung bleibt auch nach Beendigung der TCP-Verbindung bestehen. Aktiviert man in der Bedienoberfläche von ACDC den entsprechenden Schalter, so sendet der UDP-Server in regelmäßigen Abständen von einigen Sekunden ein Statuspaket an eine vorgegebene IP-Adresse. Das Statuspaket enthält unter anderem die Bezeichnungen und die aktuellen Messwerte der einzelnen Sensoren sowie den Wert des momentan durch die Peltierelemente fließenden Stroms. Weiterhin ist der aktive Regelsensor markiert und Status-Bits geben Auskunft über verschiedene Parameter der Regelung.

Es ist nicht bekannt, dass eine ausführliche Dokumentation der Schnittstellen von ACDC existiert. Insbesondere der Ablauf der TCP- und UDP-Kommunikation und der Aufbau der Statuspakete lässt sich ohne eine solche Dokumentation nicht vollständig klären. Für die beschriebenen Abläufe lassen sich die Funktionen von ACDC aber nutzen.

4.3.2. Keithley Sourcemeter Control

Um mit dem Keithley 2400 IU-Kennlinien von Silizium Photomultipliern aufzeichnen zu können, wurde die Software *Keithley Sourcemeter Control* (KSC) entwickelt. Es handelt sich um eine Konsolenanwendung für GNU/Linux. Die erste Version des Programms ist in der Lage eine einzelne Kennlinie aufzuzeichnen. Da es sehr zeitaufwändig ist jede Messung manuell anzustoßen, ist die aktuelle Version von KSC in der Lage Messreihen für verschiedene Temperaturen ohne Benutzereingriff aufzuzeichnen. Gesteuert wird KSC durch eine Konfigurationsdatei, die beim Start eingelesen wird und die alle notwendigen Informationen enthält.

Angaben für den Kühlzyklus: Starttemperatur, Endtemperatur und Schrittweite der Temperaturänderungen.

Angaben für die Kennlinien: Startspannung, maximale Endspannung, Schrittweite der Spannungsänderungen, maximaler Endstrom und Anzahl der Einzelmessungen pro Spannungswert.

Angaben zum verwendeten Verstärker und SiPM: Bezeichnung SiPM und Bezeichnung MPPC-Controller-Platine.

Zur Kommunikation mit ACDC besitzt die Anwendung einen TCP- und einen UDP-Client. Es ist nun problemlos möglich, über eine TCP-Verbindung mit ACDC die Nominaltemperatur des aktiven Regelsensors zu verändern. Der UDP-Client kann die von ACDC in regelmäßigen Abständen gesendeten Statuspakete entgegennehmen. Der Programmablauf des Keithley Sourcemeter Control wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Das Flussdiagramm in Abbildung 4.9 stellt den Ablauf graphisch dar. Nach dem Start der Anwendung wird die Konfigurationsdatei ausgewertet. Wird dabei festgestellt, dass die Konfiguration fehlerhaft oder unvollständig ist, beendet sich die Anwendung mit einer entsprechenden Fehlermeldung.

Ist die Konfiguration vollständig, beginnt der erste Kühlzyklus mit dem Senden der in der Konfiguration festgelegten Starttemperatur. Dazu wird eine TCP-Verbindung mit ACDC aufgebaut und die Nominaltemperatur des aktiven Regelsensors verändert. Nach zehn Sekunden wird die TCP-Verbindung getrennt und durch das Auswerten eines von ACDC per UDP gesendeten Statuspakets festgestellt, ob die Änderung erfolgreich war. Eine direkte Rückmeldung über die TCP-Verbindung ist von ACDC nicht vorgesehen. Sollte die Änderung der Nominaltemperatur mehr als dreimal fehlschlagen, wird ein Problem mit ACDC oder der Kommunikation angenommen und der Benutzer per Email informiert. Bei erfolgreicher Änderung der Nominaltemperatur wartet die Anwendung nun darauf, dass sich die Temperatur innerhalb der Kühlbox stabil auf den gewünschten Wert einpendelt. Als Kriterium für eine stabile Temperatur wird folgende Bedingung gewählt: Die Temperaturdifferenz aus Nominaltemperatur und Temperatur des Regelsensors muss mindestens fünf Minuten lang innerhalb von $\pm 0,3^\circ\text{C}$ liegen.

In der Praxis kann es vorkommen, dass die Verbindung von ACDC mit dem Cooli abbricht. Dies wird dadurch erkannt, dass der im Statuspaket gemeldete Strom durch die Peltierelemente in zehn aufeinanderfolgenden Paketen null ist. Ist die Anwendung nicht selbstständig in der Lage die Regelung wieder zu aktivieren, wird ein Benutzereingriff notwendig. Dies wird dem Benutzer per Email mitgeteilt. Sollte der Benutzereingriff notwendig werden, erwärmt sich die Kühlbox in der Zwischenzeit. Dies führt nach dem Wiedereinschalten der Regelung zu einer längeren Abkühlphase.

Ist die Temperatur innerhalb der Kühlbox stabil, beginnt die Anwendung mit der Aufzeichnung einer IU-Kennlinie des angeschlossenen Silizium Photomultipliers. Dies geschieht durch die Fernsteuerung des Keithley 2400 über die serielle Schnittstelle.

In der Konfiguration sind als Abbruchbedingungen für die Messung Maximalwerte für den Dunkelstrom und die angelegte Sperrspannung des SiPMs hinterlegt. Nach jeder Aufzeichnung von Messwerten werden diese Abbruchbedingungen überprüft. Anschließend wird entweder die Sperrspannung weiter erhöht oder die Aufzeichnung der Kennlinie beendet. Nach dem Ende der Aufzeichnung wird erneut die Temperatur in der Kühlbox überprüft, da es vorkommen kann, dass die Regelung während der Aufzeichnung aussetzt. Damit würde die Temperatur vom Sollwert abweichen. Ist sie weiterhin stabil, wird davon ausgegangen, dass sie es während der gesamten Aufzeichnung war und die Kennlinie wird gespeichert. Andernfalls wird die Aufzeichnung wiederholt.

Schließlich wird nach dem Speichern der Kennlinie überprüft, ob ein weiterer Kühlzyklus mit geänderter Nominaltemperatur notwendig ist oder ob der in der Konfiguration ange-

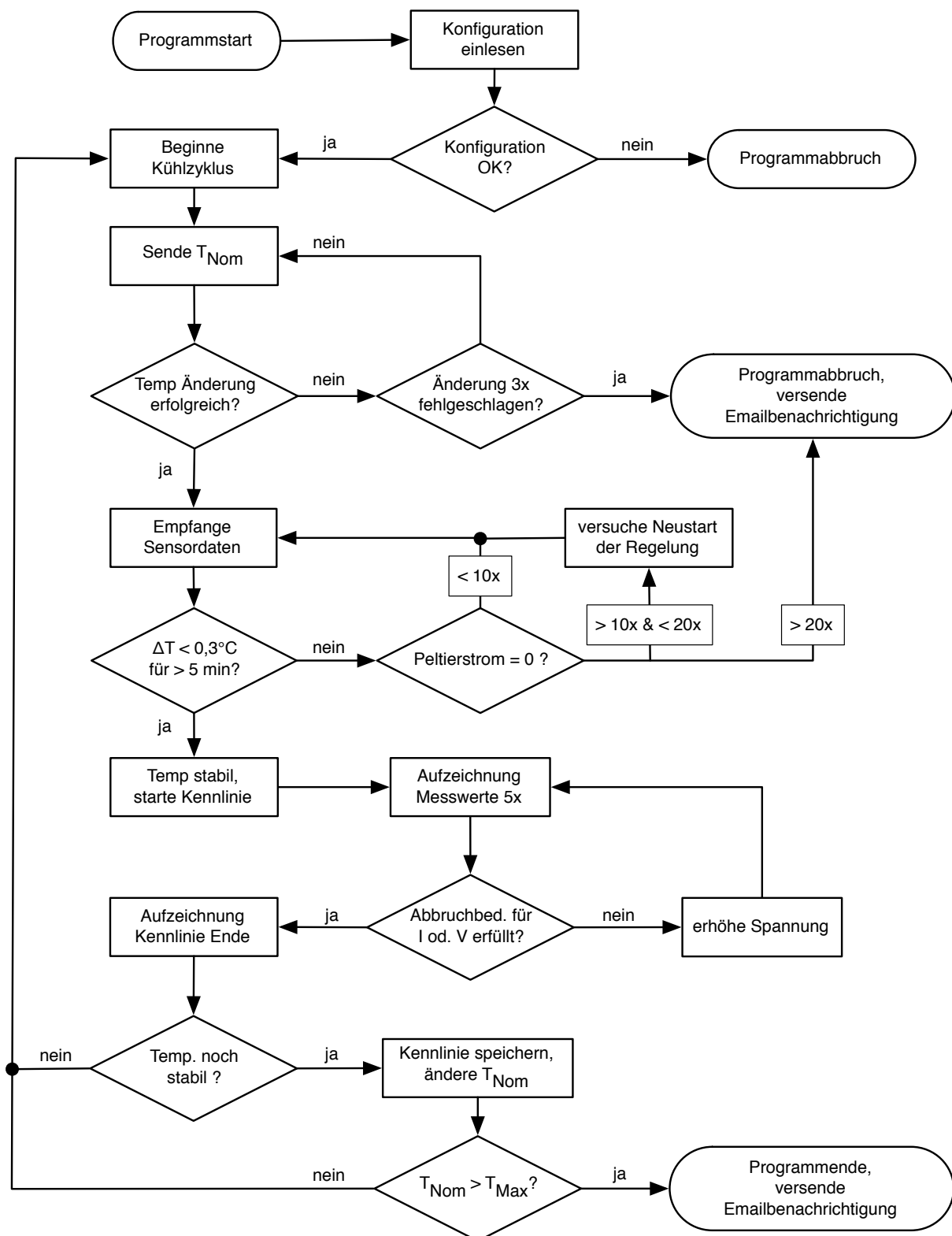


Abbildung 4.9.: Flussdiagramm für den Programmablauf des KSC.

gebene Temperaturbereich vermessen ist. Ist der gesamte Temperaturbereich vermessen, erhält der Benutzer eine Email über den erfolgreichen Durchlauf der Messreihe und die Anwendung wird beendet. Andernfalls beginnt die Anwendung einen weiteren Kühlzyklus durch das Senden der geänderten Nominaltemperatur.

Die Dauer eines kompletten Programmdurchlaufs ist abhängig von den in der Konfigurationsdatei gewählten Einstellungen. Mit der in Tabelle 7.2 gezeigten Konfiguration dauert ein Durchlauf etwa 14 Stunden.

5. Hamamatsu MPPC-Modul

Begonnen wurde diese Arbeit mit Messungen an zwei MPPC-Modulen vom Typ C10507-11-050U der Firma Hamamatsu Photonics K.K. aus Japan [28].

In Kapitel 5.1 werden die technischen Daten der Module erläutert. Der zugehörigen Software widmet sich Kapitel 5.2. Die mit den Modulen durchgeführten Messungen werden in Kapitel 5.3 vorgestellt. In Kapitel 5.4 werden offene Fragen und Probleme diskutiert. Während der Messungen auftretende Störungen im analogen Ausgang der Module werden in Kapitel 5.5 erläutert.

5.1. Beschreibung und technische Daten

Ein MPPC-Modul ermöglicht Messungen mit Silizium Photomultipliern ohne jegliche Kenntnisse über deren Eigenschaften und ohne messtechnischen Aufwand. Es besteht aus einer kompakten Platine, die neben einem Silizium Photomultiplier noch einen Verstärker, einen Spannungsregler, einen DC/DC-Konverter, einen Mikrocontroller, einen Temperatursensor und einen Komparator besitzt. Die technischen Daten des Moduls finden sich in Tabelle 5.1. Die Typenbezeichnung setzt sich wie folgt zusammen: C10507-11 bezeichnet das Modul selbst, die letzten vier Ziffern bezeichnen den eingesetzten Silizium Photomultiplier (SiPM). Hier finden sich die gleichen Bezeichnungen wie für einzelne SiPMs von Hamamatsu (vergleiche Kapitel 2.2).

Die Einstellung des *Comparator threshold level* wird in Kapitel 5.2 erläutert. Das Blockschaltbild eines MPPC-Moduls ist in Abbildung 5.1 gezeigt.

Auf der Platine befinden sich drei Anschlüsse. Dabei handelt es sich um zwei Koaxialbuchsen vom Typ *Sub-Miniature-B* (SMB) und eine Mini-B Buchse des *Universal Serial Bus* (USB). Eine Koaxialbuchse dient als Ausgang für die analogen Signale, die andere als Ausgang für die TTL kompatiblen Signale des Komparators. Eine Beschreibung der Transistor-Transistor-Logik (TTL) findet sich in [16, Kapitel 10].

Die genauen Positionen der Anschlüsse und des SiPM sind dem Foto des Moduls in Abbildung 5.2 sowie der technischen Zeichnung des Moduls in Abbildung 5.3 zu entnehmen. Die Spannungsversorgung des MPPC-Moduls erfolgt über die Busspannung (5 V) des USB.

Tabelle 5.1.: Spezifikationen des MPPC-Moduls [28]. Eine Erklärung der Bezeichnungen findet sich in Kapitel 2.2.

➤ **Specifications (Ta=25 °C, unless otherwise noted)**

Parameter	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating temperature		-10 to +40			°C
Storage temperature		-20 to +50			°C
Spectral response range		320 to 900			nm
Peak sensitivity wavelength		440			nm
Photon detection efficiency *2	*3	$\lambda=\lambda_p$	-	20	-
	*4	0.5 p.e.	-	35	-
	*5	(Threshold level)	-	45	-
Dark count	*3	0.5 p.e.	-	500	900
	*4	(Threshold level)	-	600	1200
	*5		-	900	1500
Analog output voltage		80	100	120	mV/p.e.
Temperature stability of analog output voltage	25 ± 10 °C	-	±2.5	±5	%
Comparator output		TTL compatible			-
Comparator threshold level		0.5, 1.5, 2.5, 3.5, Disable Adjustable 5 states			p.e.
Interface		USB 1.1			-

*2: Photon detection efficiency includes effects crosstalk and afterpulses.

*3: C10507-11-025U, C10507-11-025C, C10751-01

*4: C10507-11-050U, C10507-11-050C, C10751-02

*5: C10507-11-100U, C10507-11-100C, C10751-03

Durch den internen DC/DC-Konverter werden weitere benötigte Spannungen auf der Platine selbst erzeugt. Neben der Spannungsversorgung erfolgt über den USB auch die Kommunikation mit einem angeschlossenen Computer.

Um einen besseren thermischen Kontakt zwischen dem SiPM und dem Aluminiumrahmen der Kühlbox zu erreichen, ersetzen speziell gefertigte Winkel aus Aluminium (vergleiche Abbildung A.1) die werkseitig montierten Winkelbleche. Der thermische Kontakt ist wichtig. Es muss gewährleistet sein, dass sich der SiPM auf der gleichen Temperatur befindet wie der Aluminiumrahmen, denn dort wird die Temperatur gemessen.

Weiterhin gelangt auch bei geschlossenem Deckel noch Streulicht in die Kühlbox. Aus diesem Grund sind die Silizium Photomultiplier lichtdicht abgeklebt.

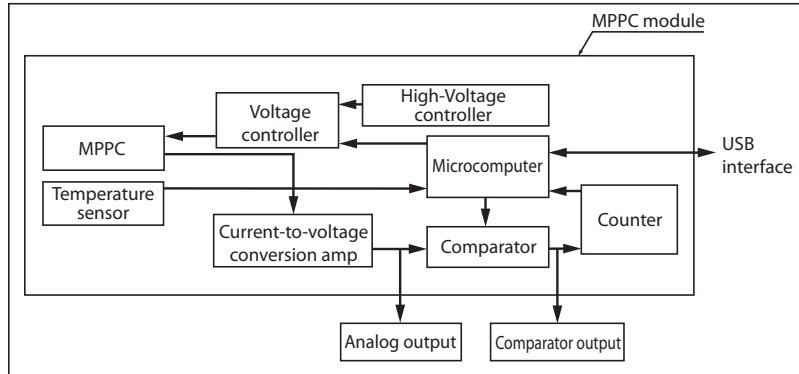


Abbildung 5.1.: Blockschaltbild eines MPPC-Moduls [28].

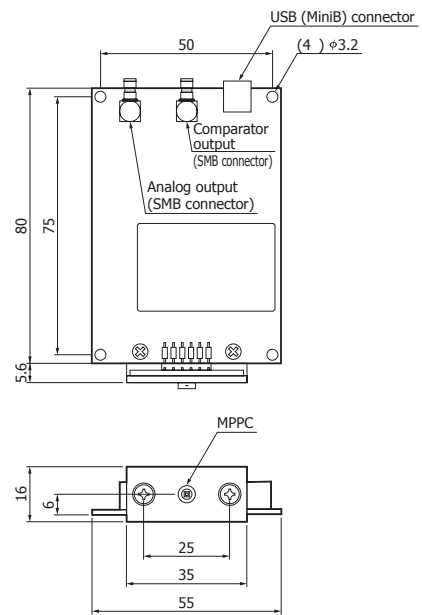
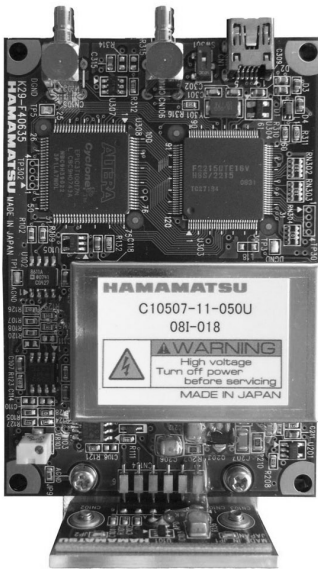


Abbildung 5.2.: Eine Draufsicht auf ein Hamamatsu MPPC-Modul. Oben befinden sich die Anschlüsse. Unten befindet sich der SiPM auf einer gewinkelten Steckplatine.

Abbildung 5.3.: Technische Zeichnung des Hamamatsu MPPC-Moduls. Alle Abmessungen in mm [28].

5.2. Software

Im Lieferumfang des MPPC-Moduls befinden sich eine Anwendung mit graphischer Oberfläche und ein Gerätetreiber für Microsoft Windows. Ein Screenshot des Programmfensters der Anwendung ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Es handelt sich bei der gelieferten Software um eine Alpha-Version die sehr instabil ist. Unterbricht man bei laufender Anwendung die USB-Verbindung, bringt man damit den gesamten Messrechner zum Absturz. Zusätzlich bietet die Software kaum Möglichkeiten mit dem Modul zu arbeiten. Es stehen lediglich zwei Einstellmöglichkeiten zur Verfügung. Dies ist zum einen die Schwelle des Komparators und zum anderen die Integrationszeit des internen Zählers.

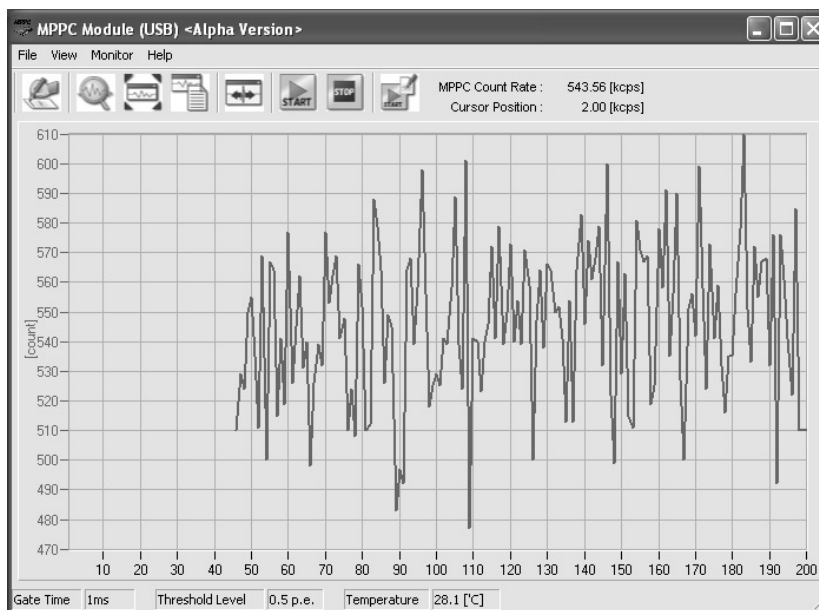


Abbildung 5.4.: Programmfenster der MPPC-Modul Software.

Der Komparator vergleicht die Höhe des Signals mit einer verstellbaren Referenzschwelle. Steigt die Signalthöhe über die Referenzschwelle, wird das Ausgangssignal des Komparators von einer logischen Null auf eine logische Eins gesetzt. Wenn das Signal wieder unter den Schwellwert fällt, wird der Pegel wieder auf eine logische Null gesetzt. Die Pegel des Komparator-Ausgangs sind TTL kompatibel. Der Komparator lässt sich in fünf Stufen einstellen: aus / 0,5 p.e. / 1,5 p.e. / 2,5 p.e. und 3,5 p.e.

Die Abkürzung p.e. steht für Photonäquivalent (vergleiche Kapitel 2.2). Die Integrationszeit legt fest über welchen Zeitraum die Zahl der Aktivierungen des Komparators hochgezählt wird. Auf diese Weise wird die Zählrate festgelegt, die das Modul über den USB an den Computer überträgt.

Die graphische Oberfläche zeigt nach dem Start einer Messung den Verlauf der Zählrate mit der Zeit an. Dieser lässt sich nach dem Ende der Messung in einer Textdatei zur weiteren Auswertung abspeichern. Zusätzlich zeigt eine Leiste am unteren Fensterrand neben den gewählten Einstellungen noch die aktuelle Temperatur des Moduls an. Die angezeigte Temperatur schwankt sehr stark und lässt sich nicht speichern. Daher wird auf die Auswertung des Temperaturwertes verzichtet und stattdessen die Temperatursensoren der Kühlbox eingesetzt. Das größte Manko der Software liegt jedoch darin, dass alle Zählraten, unabhängig von der gewählten Integrationszeit, auf ganze Kilohertz gerundet werden. Dadurch ist eine sinnvolle Auswertung von Messungen mit kurzer Integrationszeit und hoher Komparatorschwelle kaum möglich, da hier die niedrigsten Raten auftreten.

5.3. Messungen

Beide zur Verfügung stehenden MPPC-Module werden im Kühlteststand im Temperaturbereich von $+20^\circ\text{C}$ bis -15°C in Schritten von 5°C vermessen. Für jeden Temperaturwert wird der Verlauf der Dunkelzählraten der beiden Module über zehn Sekunden aufgezeichnet. Diese Messung wird mit jeder Einstellmöglichkeit der Hamamatsu Software durchgeführt. Die verschiedenen Messreihen unterscheiden sich jeweils nach Integrationszeit (1 ms, 10 ms und 100 ms) und Komparatorschwelle. Zusätzlich werden die analogen Pulse der Module auf dem Oszilloskop beobachtet und auf Änderungen der Pulshöhen mit der Temperatur überprüft. Abbildung 5.5 zeigt einen Screenshot des Oszilloskops. Gezeigt sind dort Pulse des analogen Ausgangs einer MPPC-Platine. Eine quantitative Untersuchung der Pulshöhenverteilungen der Module kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden. Von allen Messreihen werden aufgrund der Beschränkung der

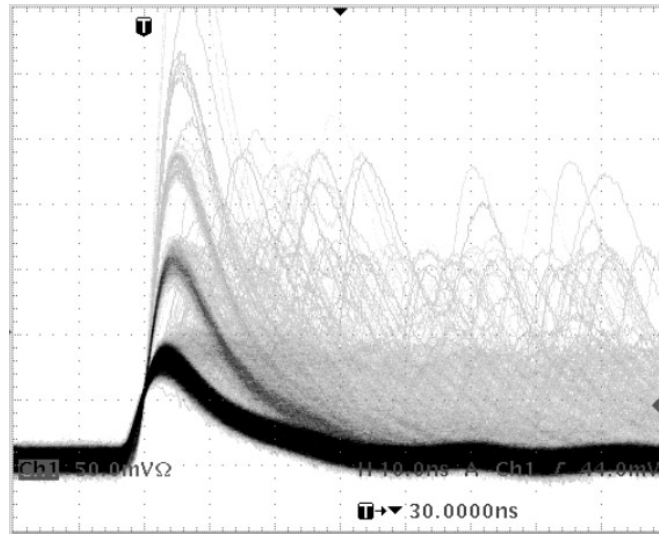


Abbildung 5.5.: Pulse am analogen Ausgang des MPPC-Moduls nach einer Integrationszeit von 5,5 s. Screenshot des digitalen Speicheroszilloskops.

Hamamatsu Software nur zwei exemplarisch ausgewertet. Zunächst wird für jede Messung aus N einzelnen Messwerten x_i der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung σ_x gemäß

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \text{ und } \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

berechnet und beim entsprechenden Temperaturwert in einen Graphen eingetragen. Die Auftragung der Zählraten auf der Ordinate erfolgt logarithmisch. Anschließend wird an alle Messpunkte eine Exponentialfunktion angepasst. Abbildung 5.6 zeigt zwei Messreihen

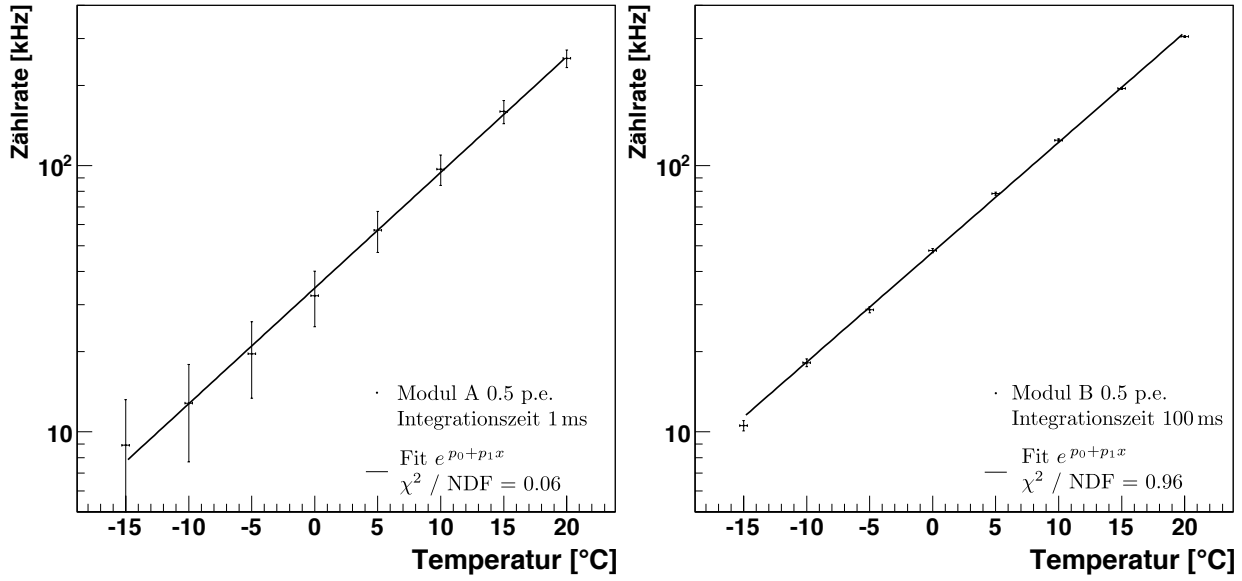


Abbildung 5.6.: Vergleich von zwei Messreihen der beiden MPPC-Module.

der beiden MPPC-Module. Der Vergleich der beiden Graphen zeigt sehr gut, wie sich das Verhalten der Software, die Messwerte auf ganze Kilohertz zu runden, auf den Fehler auswirkt. Die Zählrate liegt im Bereich von 10 kHz bis 200 kHz, bei einer Integrationszeit von 1 ms erhält man Zählraten, die auf eine signifikante Stelle gerundet sind. Bei einer Integrationszeit von 100 ms hat man hingegen vier signifikante Stellen und folglich kleinere Unsicherheiten auf die Zählrate.

Die Messdaten passen sehr gut zu einer exponentiellen Abnahme der Zählrate mit sinkender Temperatur. Dies wird aufgrund der internen Regelung der Module auch erwartet. Die MPPC-Module werten im Betrieb permanent die Messdaten des integrierten Temperatursensors aus und passen die Sperrspannung des SiPMs so an, dass die Pulshöhen konstant bleiben. Geht man davon aus, dass vor allem thermisch generierte Ladungsträger gemäß

$$N_{carrier} \propto T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-E_{gap}}{2k_b T}} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} N_{carrier} \text{ Ladungsträger} \\ E_{gap} \text{ Bandlücke} \\ T \text{ Temperatur} \\ k_b \text{ Boltzmann Konstante} \end{array} \quad (5.2)$$

zur Dunkelrate beitragen, erklärt dies die beobachtete exponentielle Abnahme der Dunkelrate mit der Temperatur [17, Seite 154].

5.4. Offene Fragen und Probleme

Mit den MPPC-Modulen zeigt die Firma Hamamatsu, dass es technisch möglich ist für Silizium Photomultiplier eine optimale Betriebsumgebung zu schaffen. Die Module sind zudem kompakt und funktionieren problemlos. Leider verhindert die sehr restriktive Informationspolitik von Hamamatsu in der Praxis das volle Potential der Module auszuschöpfen. Bis auf die wenigen Einstellungsmöglichkeiten in der gelieferten Software gibt es für den Benutzer keine Möglichkeit auf den Betrieb der Module Einfluss zu nehmen. Hamamatsu veröffentlicht keine detaillierten Informationen über die Module. So gibt es keine Informationen über die Softwareschnittstellen des Moduls, die es ermöglichen würden durch eigene Programme die Schwächen der gelieferten Software auszugleichen oder deren Funktionsumfang zu erweitern. Hinzu kommt, dass es nicht möglich ist andere als die werksseitig montierten Silizium Photomultiplier zu verwenden. Obwohl der Austausch technisch möglich ist, verhindert die individuell an die einzelnen Sensoren angepasste Programmierung, insbesondere im Bereich der Spannungsversorgung, den Betrieb anderer SiPMs. Auch die Temperaturkompensation findet ohne die Möglichkeit eines Benutzereingriffs im Mikrocontroller des Moduls statt. Es wird vermutet, dass Hamamatsu die eingesetzten Silizium Photomultiplier nach der Produktion vermisst und eine zum Sensor passende Korrektortabelle (lookup table) im Mikrocontroller speichert. Nach mehreren Anfragen hat Hamamatsu eine Sammlung von virtuellen Instrumenten für LabVIEW [29] sowie eine Anleitung zum Anschluss des SiPMs an eine externe Spannungsversorgung zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise kann jedoch das Potential der Module nicht genutzt werden. Mit Blick auf die im nächsten Kapitel vorgestellte, in der Elektronikabteilung des III. Physikalischen Instituts B entwickelte, Schaltung kann die folgende Bilanz aus den Messungen mit den Hamamatsu MPPC-Modulen gezogen werden:

- Die Verstärkerschaltung der MPPC-Module ist optimal auf die Signale der Silizium Photomultiplier abgestimmt.
- Eine Temperaturkompensation der SiPM Signale ist möglich, sogar direkt auf der Verstärkerplatine.
- Ebenso ist eine Digitalisierung der Signale, zumindest der Signalhöhe, direkt auf der Verstärkerplatine möglich. Im folgenden Abschnitt wird jedoch gezeigt, dass es durch gegenseitige Störungen von analogen und digitalen Komponenten der Schaltung zu Problemen kommen kann.

5.5. Störungen im analogen Ausgangssignal der MPPC-Module

Aktiviert man in den Einstellungen der Hamamatsu Software den Komparator des Moduls, treten Störungen im Signal des analogen Ausgangs auf. Abbildung 5.7 auf der nächsten Seite zeigt die Signale des analogen Ausgangs für verschiedene Komparatorschwellen. Die eingezeichneten horizontalen Linien deuten die gesetzte Referenzschwelle an. Sie sind anhand der Abstände der Pulse konstruiert. Der genaue Wert der Referenzschwelle ist nicht bekannt, da sie im Mikrocontroller des MPPC-Moduls gesetzt wird. Man stellt fest, dass die Störungen genau dann auftreten, wenn gleichzeitig der Komparator aktiv ist. Bei einer Schwelle von 0,5 p.e. (1) sind alle Signale verzerrt. Ändert man die Referenzschwelle auf 1,5 p.e. (2) und weiter auf 2,5 p.e. (3) sind nur die Signale oberhalb der Schwelle verzerrt. Ist der Komparator ganz ausgeschaltet (4), treten keine Störungen auf. Dieses Verhalten sollte beim Entwurf von Schaltungen beachtet und nach Möglichkeit vermieden werden.

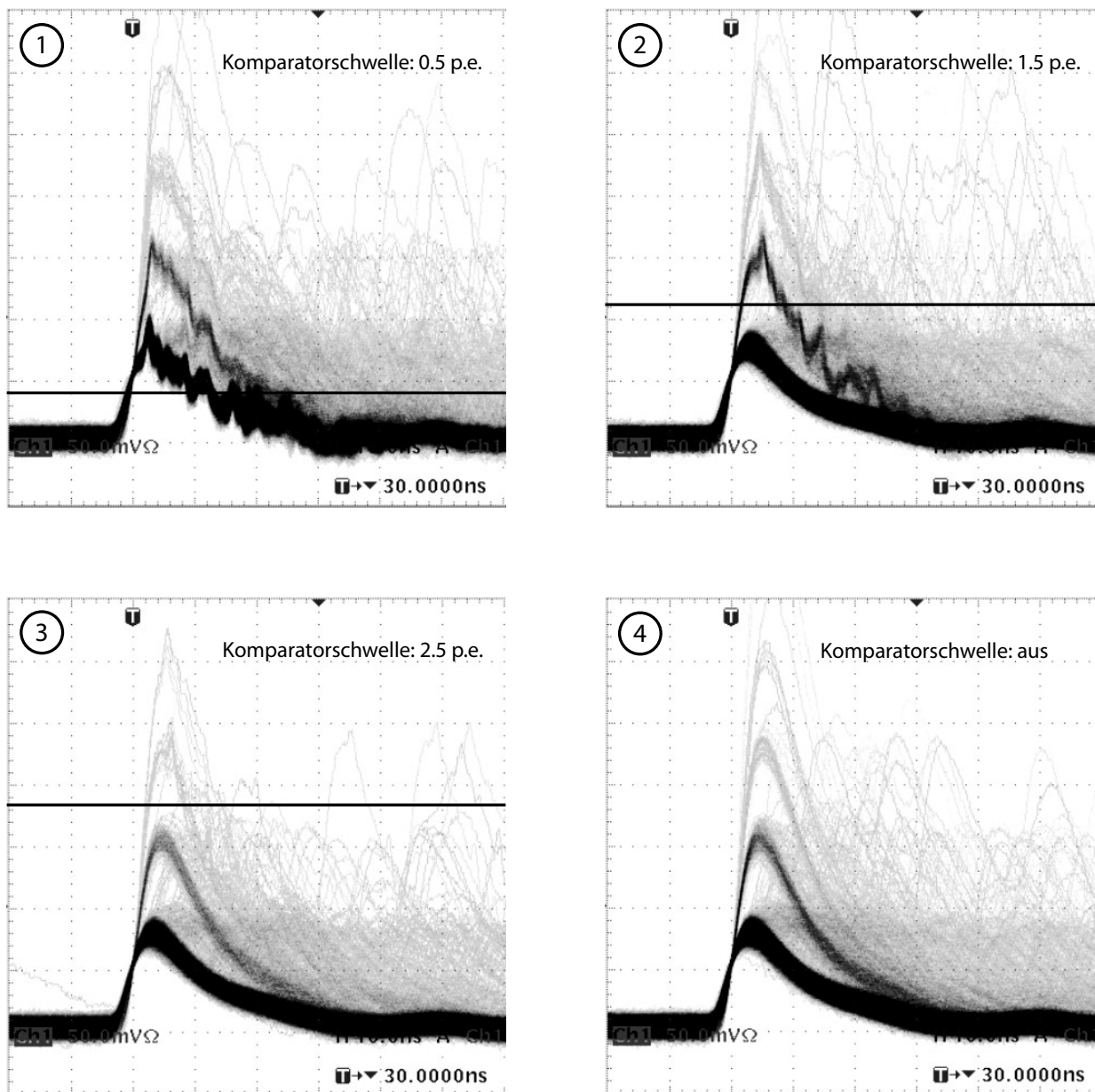


Abbildung 5.7.: Störungen im analogen Ausgangssignal der MPPC-Module. Gesetzte Komparatorschwellen: 0,5 p.e. in (1), 1,5 p.e. in (2), 2,5 p.e. in (3) und ausgeschaltet in (4). Die eingezeichneten horizontalen Linien deuten die gesetzte Referenzschwelle an. Sie sind anhand der Abstände der Pulse konstruiert. Der genaue Wert der Referenzschwelle ist nicht bekannt.

6. Aachen MPPC-Controller

In der Elektronikabteilung des III. Physikalischen Instituts B wird eine Schaltung zum Betrieb von Silizium Photomultipliern (SiPMs) entwickelt. Sie wird *Multi Pixel Photon Counter Controller* (MPPCC) genannt. Alle Ausführungen zum MPPCC in der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf die Platinenrevision 902, den zur Zeit aktuellen Prototypen.

Zu Testzwecken wurde eine zweistellige Zahl dieser Prototypen hergestellt und von Hand bestückt. Abbildung 6.1 zeigt ein Foto und Abbildung 6.2 das Blockschaltbild des Prototypen der Platine. Die Platine enthält einen ladungssensitiven Verstärker, der die Signale von SiPMs verstärkt und über zwei Ausgänge zur Verfügung stellt. Die beiden Ausgänge sind als Buchsen gemäß dem NIM-CAMAC CD/N 549 Standard, auch bekannt als LEMO 00 Serie, ausgeführt. Informationen und technische Daten der LEMO 00 Serie finden sich in [23].

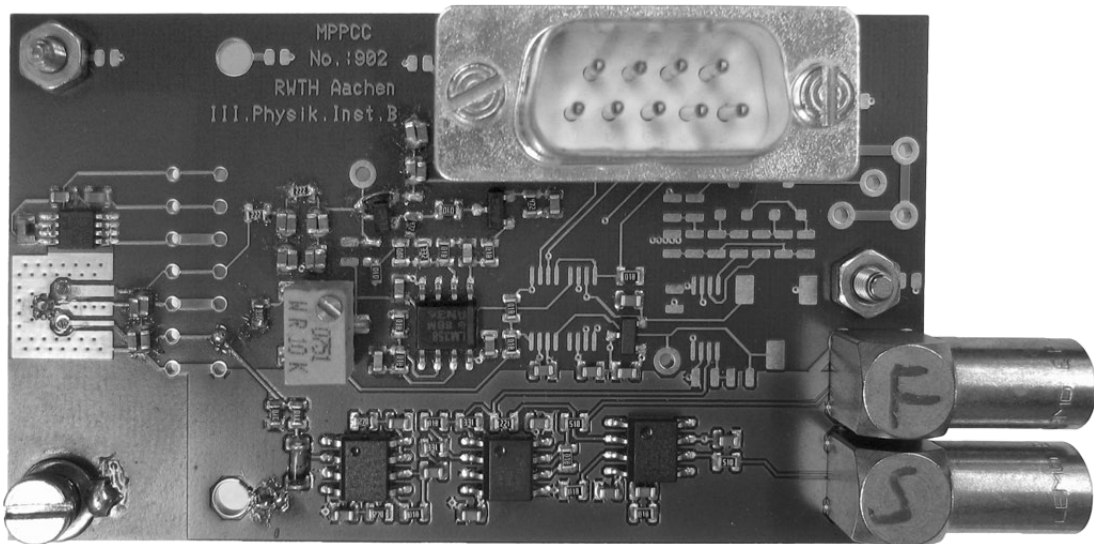


Abbildung 6.1.: Prototyp der MPPC-Controller-Platine.

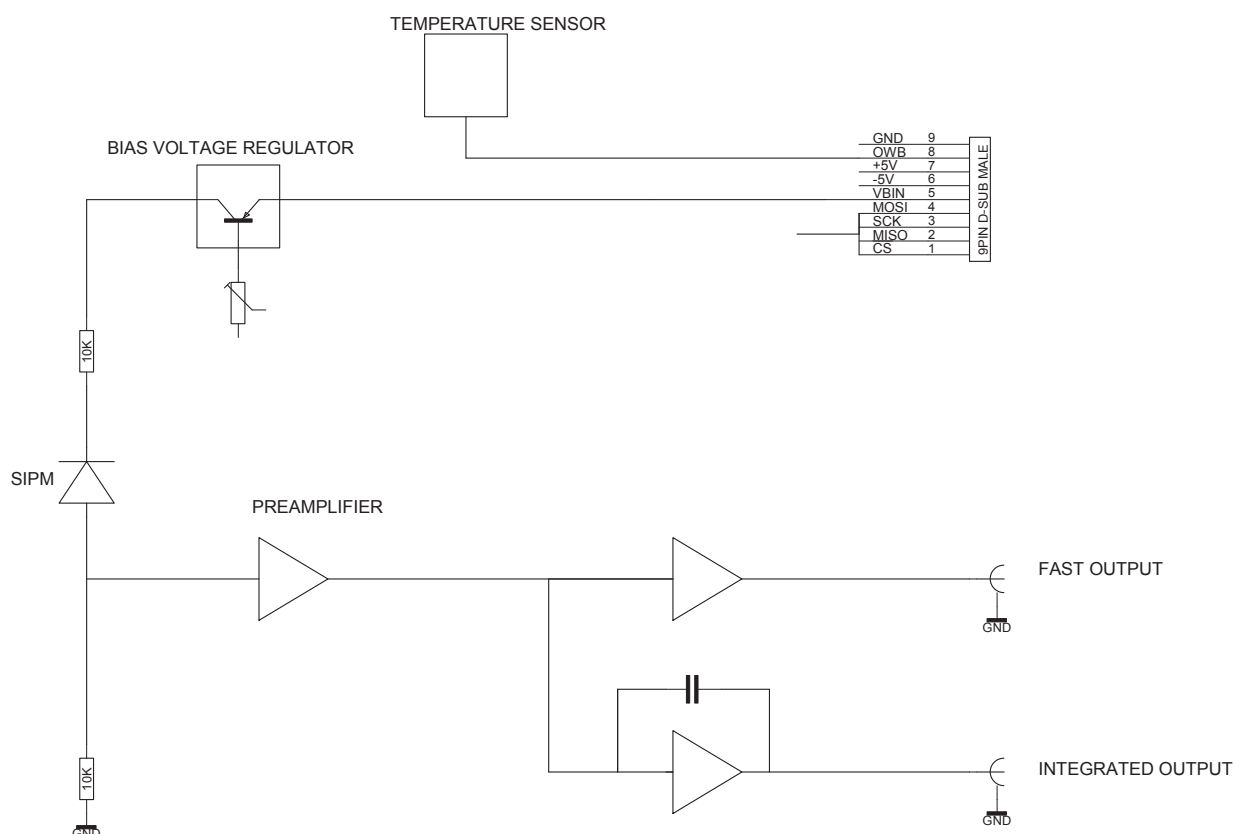


Abbildung 6.2.: Blockschaltbild der MPPC-Controller-Platine.

Der eine Ausgang der Platine stellt ein schnelles Signal zur Verfügung, um eine gute Zeitauflösung zu ermöglichen. Der andere ist als integrierender Ausgang ausgeführt und eignet sich gut zur Ladungsmessung.

Neben dem Verstärker kann die Platine einen Temperatursensor, einen Spannungsregler, einen Digital/Analog Konverter (DAC) und einen Komparator aufnehmen. Der Komparator liefert Signale gemäß dem NIM (ursprünglich Nuclear Instrument Modules) Standard [35]. Der Ausgang ist ebenfalls gemäß CD/N 549 ausgeführt.

Wie man durch einen Blick auf die freien Kontaktflächen der Platine in Abbildung 6.1 erkennen kann, werden jedoch nicht alle Komponenten bestückt. Der DAC mit einer Auflösung von 12 Bit wird nur bestückt, wenn die geplante Steuerung via Mikrocontroller zum Einsatz kommt. Der Komparator wird aufgrund von Problemen mit der aktuellen Platinenrevision 902 zur Zeit ebenfalls nicht bestückt. Weiterhin besitzt der MPPCC-Prototyp einen D-Sub Stecker, der unter anderem der Spannungsversorgung dient. Alternativ zum D-Sub Stecker ist eine Pfostenleiste vorgesehen, über die eine Zusatzplatine mit Mikrocon-

Tabelle 6.1.: Pinbelegung des D-Sub Steckers und der Pfostenleiste.

Pin	Abkürzung	Beschreibung
9	GND	Masse
8	OWB	1-Wire Bus [26]
7	+5V	Spannung +5 Volt
6	−5V	Spannung −5 Volt
5	VBIN	Sperrspannung SiPM
4	MOSI	Master Out Slave In
3	SCK	Serial Clock
2	MISO	Master In Slave Out
1	CS	Chip Select

troller aufgesteckt werden kann. Die Pinbelegung des D-Sub Steckers bzw. der Pfostenleiste ist in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Die Pins eins bis vier kommen nur in Verbindung mit dem Mikrocontroller zum Einsatz. Sie dienen der Kommunikation von Mikrocontroller und DAC. Über die Pins fünf und neun wird die Sperrspannung für den SiPM zugeführt. Der 1-Wire Bus liegt auf Pin acht [26]. Über ihn findet die Kommunikation mit dem Temperatursensor auf der Platine statt. Als Temperatursensor kommt ein Maxim DS18B20 [14] zum Einsatz. Sensoren des gleichen Typs werden auch im Kühltteststand verwendet, der in Kapitel 4.1 vorgestellt wird. Die Pins sechs und sieben dienen der Spannungsversorgung der Operationsverstärker auf der Platine.

Der Spannungsregler wird über ein Potentiometer auf der Platine eingestellt. Alternativ kann der Spannungsregler über einen DAC von einem Mikrocontroller per Software gesteuert werden. Für die in Kapitel 7 vorgestellten Strom-Spannungs-Kennlinien wird eine MPPCC-Platine speziell modifiziert. Auf ihr wird der Spannungsregler überbrückt, so dass es möglich ist, die Spannung direkt vom Keithley 2400 Sourcemeter vorgeben zu lassen (vergleiche Kapitel 4.2). Dies ist notwendig um Kühlzyklen automatisiert aufzeichnen zu können. Ohne die Überbrückung müsste die Kühlbox ständig geöffnet, und die Spannung von Hand verstellt werden.

Normalerweise werden die Silizium Photomultiplier von der Unterseite der Platine durchgesteckt und mit ihr fest verlötet. Da für die Messungen in Kapitel 7 der SiPM ständig gewechselt werden muss, und ein Sensor nur wenige Lötvorgänge ohne Zerstörung übersteht, wird ein Stecksockel auf die Unterseite der Platine gelötet. Der Stecksockel ist in Abbildung 6.3 gezeigt. Die Sensoren sollten so nah wie möglich an der Platine angebracht werden, um das Einstreuen von Rauschen zu minimieren. Der Stecksockel verursacht nach den in dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen kein zusätzliches Rauschen.

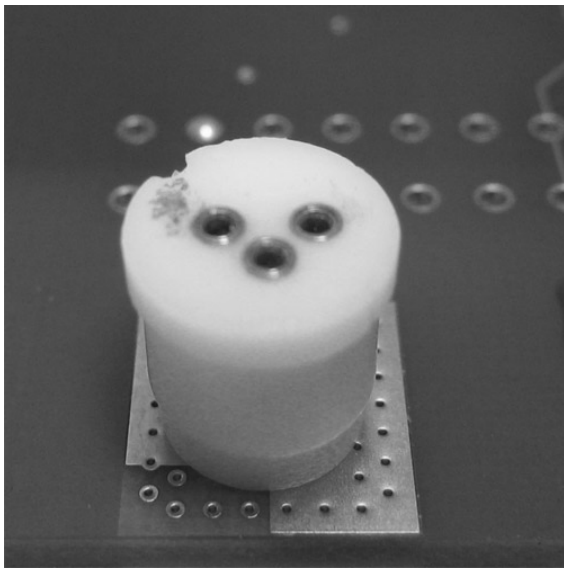


Abbildung 6.3.: Ansicht eines Stecksockels zur Aufnahme von Silizium Photomultipliern.

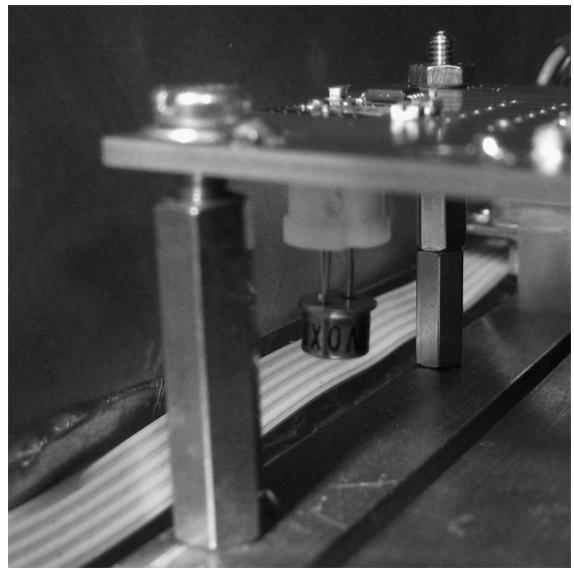


Abbildung 6.4.: Verschraubung der MPPCC-Platine mit der Bodenplatte des Kühltteststands.

Eine mögliche weitere Quelle für Rauscheffekte sind unterschiedliche Potentiale auf den einzelnen Erdungsschienen. Um hier Probleme zu vermeiden, wird die Masse (Pin 1) der Platine mit einer der Befestigungsbohrungen der Platine verbunden. Dies ist in Abbildung 6.1 in der linken unteren Ecke zu erkennen. Die Bohrung wird dann durch Abstandsbolzen direkt mit der Aluminium-Bodenplatte des Kühltteststands (vergleiche Kapitel 4.1) verschraubt. Die Verschraubung der MPPCC-Platine mit der Bodenplatte des Kühltteststands ist in Abbildung 6.4 gezeigt. Zusätzlich werden alle Geräte mitsamt der Computer an die gleiche Netzsteckdose angeschlossen. Dies soll das Fließen von Ausgleichsströmen aufgrund von Potentialdifferenzen verhindern.

7. Strom-Spannungskennlinien von Silizium Photomultipliern

Dieses Kapitel stellt die Messungen der Strom-Spannungskennlinien (IU-Kennlinien) von insgesamt 14 Silizium Photomultipliern (SiPMs) vor. Die verwendeten SiPMs haben verschiedene Geometrien und unterschiedliche Gehäuse (vergleiche Kapitel 2.2). Abbildung 7.1 zeigt die beiden verwendeten Gehäusevarianten. Auf dem Foto sieht man links einen SiPM mit Metallgehäuse und rechts einen SiPM mit Keramikgehäuse. Neben den Gehäusen unterscheiden sich die SiPMs noch in der Zahl der Pixel und der Größe der aktiven Fläche. Die Sensoren der Firma sensL [32] haben eine runde Fläche mit 1 mm Durchmesser. Alle anderen haben eine quadratische Fläche mit 1 mm Kantenlänge. Tabelle 7.1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Silizium Photomultiplier.

In Kapitel 7.1 wird das Verfahren der Aufzeichnung von Kennlinien erläutert. Die Kennlinien von Hamamatsu Sensoren werden in Kapitel 7.2 vorgestellt. Das Kapitel 7.3 befasst sich mit einer Methode zur temperaturabhängigen Anpassung der Betriebsspannung von SiPMs. Ein Vergleich mit Silizium Photomultipliern anderer Hersteller wird in Kapitel 7.4 gezogen.

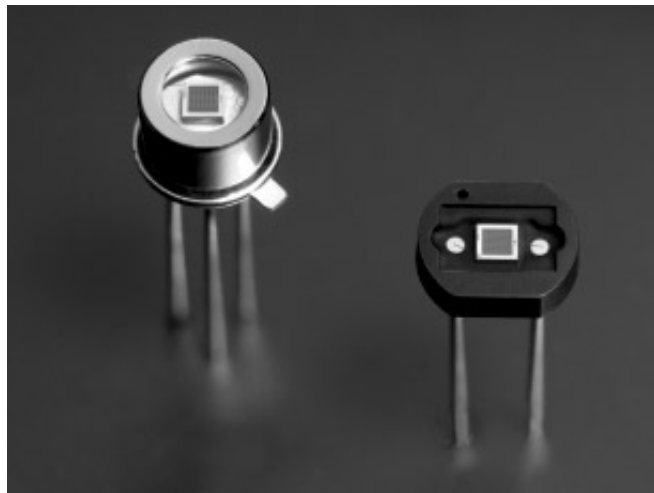


Abbildung 7.1.: Ansicht von zwei Gehäusevarianten der Hamamatsu SiPMs [21].

Tabelle 7.1.: Übersicht der verwendeten Silizium Photomultiplier. Die Spaltenüberschriften Pixel bzw. Größe bezeichnen die Pixelzahl bzw. die Pixelgröße der Sensoren. HPK steht für Hamamatsu Photonics K.K. und FBK für Fondazione Bruno Kessler.

Abkürzung	Hersteller	Modellbezeichnung	Gehäuse	Pixel	Größe	Abmessungen
25U1	HPK	S10362-11-025U	Metall	1600	25 μm	1 mm x 1 mm
25U2	HPK	S10362-11-025U	Metall	1600	25 μm	1 mm x 1 mm
50C1	HPK	S10362-11-050C	Keramik	400	50 μm	1 mm x 1 mm
50C2	HPK	S10362-11-050C	Keramik	400	50 μm	1 mm x 1 mm
50C3	HPK	S10362-11-050C	Keramik	400	50 μm	1 mm x 1 mm
50C4	HPK	S10362-11-050C	Keramik	400	50 μm	1 mm x 1 mm
100U1	HPK	S10362-11-100U	Metall	100	100 μm	1 mm x 1 mm
100U2	HPK	S10362-11-100U	Metall	100	100 μm	1 mm x 1 mm
FBK50F1	FBK	-	-	400	50 μm	1 mm x 1 mm
FBK50F4	FBK	-	-	400	50 μm	1 mm x 1 mm
1020X18a	sensL	SPMMicro1020X18	Metall	848	20 μm	$\varnothing$ 1 mm
1020X18b	sensL	SPMMicro1020X18	Metall	848	20 μm	$\varnothing$ 1 mm
1020X35a	sensL	SPMMicro1035X18	Metall	400	35 μm	$\varnothing$ 1 mm
1020X35b	sensL	SPMMicro1035X18	Metall	400	35 μm	$\varnothing$ 1 mm

7.1. Aufzeichnung von Kennlinien

Die einzelnen SiPMs werden nacheinander auf eine MPPCC-Platine gesteckt und im Kühlteststand montiert. Dann wird mit Hilfe des in Kapitel 4.2 vorgestellten Keithley 2400 Sourcemeter und der in Kapitel 4.3 vorgestellten Software ein vollständiger Kühlzyklus von 30 °C bis −15 °C aufgezeichnet. Abbildung 7.2 zeigt eine IU-Kennlinie des 100U1-Sensors bei einer Temperatur von 20 °C. Da sich die Darstellung mit linearer Achseneinteilung nicht gut zur Beurteilung der Kennlinie eignet, wird für die Kennlinien eine logarithmische Einteilung der Y-Achse gewählt. Der Fehler auf der X-Achse entspricht der Genauigkeit, mit der das Keithley 2400 eine vorgegebene Spannung einstellen kann. Diese entspricht nach dem Datenblatt

$$\pm(0,02\% \cdot U_i + 24 \text{ mV}) \quad \text{für} \quad 20 \text{ V} < U_i < 200 \text{ V}$$

bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C $\pm$ 5 °C [27, Anhang A]. U_i ist der jeweilige Sollwert der Spannung. Für jeden Spannungswert wird n-mal der Dunkelstrom gemessen und der Mittelwert $\bar{x}$ gemäß Gleichung 5.1 berechnet. Die Anzahl der Messungen wird in der

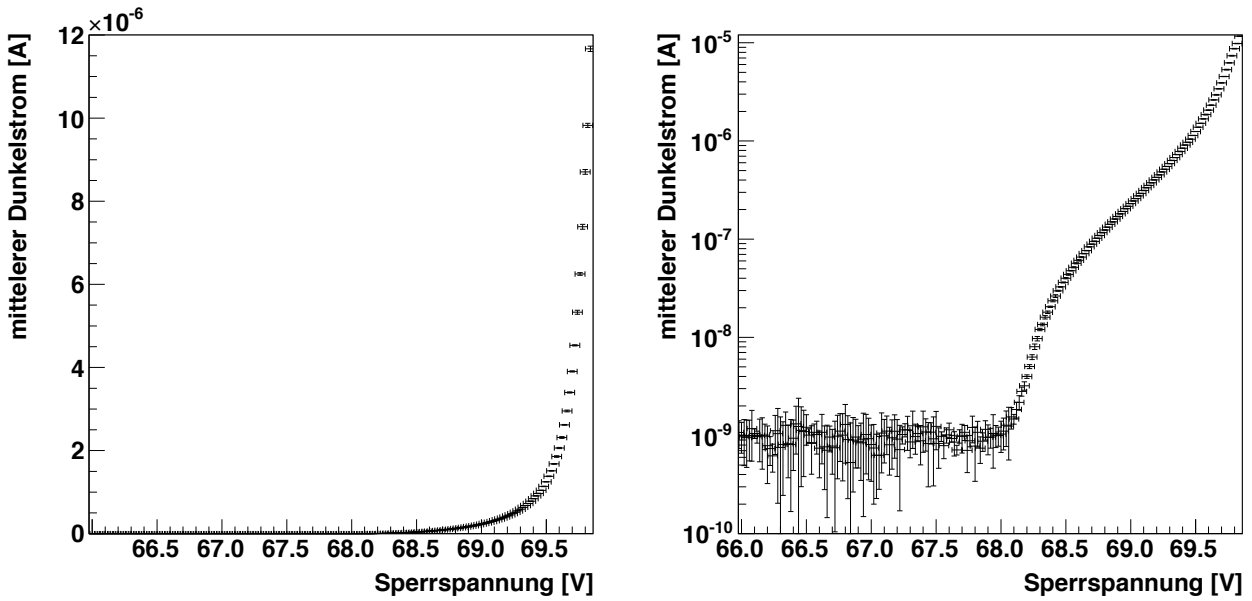


Abbildung 7.2.: IU-Kennlinie des 100U1-SiPM bei $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Auf der linken Seite mit linearer und auf der rechten Seite mit logarithmischer Einteilung der Ordinate.

Konfigurationsdatei für die Software *Keithley Sourcemeter Control* (KSC) festgelegt (siehe Kapitel 4.3.2). Auf der Y-Achse ist der statistische Fehler σ_x des Mittelwerts der Einzelmessungen eingezeichnet. Hinzu kommt der, nicht eingezeichnete, systematische Fehler auf den Einzelwert I_i von

$$\begin{aligned} \pm(0,029\% \cdot I_i + 300\text{ pA}) & \quad \text{für} \quad I_i < 1\text{ }\mu\text{A} \\ \pm(0,027\% \cdot I_i + 700\text{ pA}) & \quad \text{für} \quad \mu\text{A} < I_i < 10\text{ }\mu\text{A} \end{aligned}$$

im entsprechenden Messbereich. Dieser ist im Rahmen der Punkte nicht sichtbar.

Es werden alle Messreihen auch einmal ohne die MPPCC-Platine durchgeführt, um zu überprüfen, ob es in den Kennlinien zu Effekten durch den verwendeten MPPCC-Prototypen kommt. Eingesetzt wird hierbei eine kleine Schaltung zur Glättung des Dunkelstroms. Diese ist, zusammen mit einem Stecksockel für die Aufnahme der Sensoren, auf einem Stück Lochrasterplatine aufgebaut. Abbildung 7.3 zeigt ein Foto der Lochrasterplatine. Das Schaltbild der Lochrasterplatine ist in Abbildung 7.4 gezeigt. Im Schaltbild deuten die gestrichelte Linie und die geklammerte Angabe der Kondensatorkapazität eine nachträgliche Modifikation der Schaltung an. Diese Modifikation wird durchgeführt, nachdem in mehreren Messreihen teilweise negative Messwerte auftreten. Da die negativen Messwerte trotz der Modifikation und vereinzelt auch in Messungen mit dem MPPCC-Prototypen auftreten, steht das Keithley 2400 im Verdacht bei minimaler Last Schwingungen im Strom zu verursachen. Das Keithley 2400 wird als Spannungsquelle verwendet und versucht dem-

nach die Ausgangsspannung konstant zu halten. Dies geschieht vermutlich durch einen Regelkreis. Damit schwingt der Ist-Wert der Spannung ständig um seinen Soll-Wert. Da sich Silizium Photomultiplier in einem Stromkreis nicht wie rein ohmsche Widerstände verhalten, sondern auch kapazitive Anteile besitzen, kann es bei einem Unterschwinger der Spannung zur Entladung dieser Kapazität kommen. Ist der momentan fließende Strom sehr klein, kommt es durch das Entladen dieser Kapazität kurzzeitig zu einer Umkehrung der Stromrichtung. Auf diese Weise lassen sich die negativen Messwerte für extrem kleine Ströme erklären. Ein Modell für das Erstatzschaltbild von SiPMs wird in [13] vorgestellt.

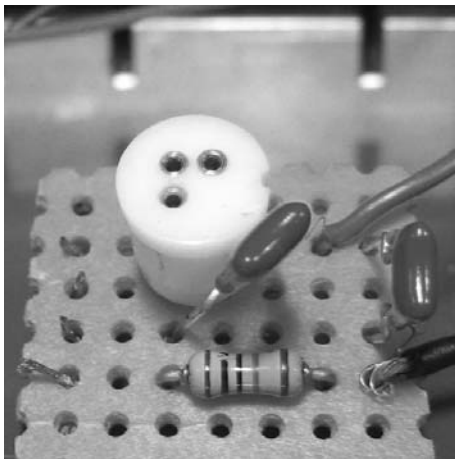


Abbildung 7.3.: Ansicht der Lochrasterplatine mit Stecksockel, Widerstand und Kondensatoren.

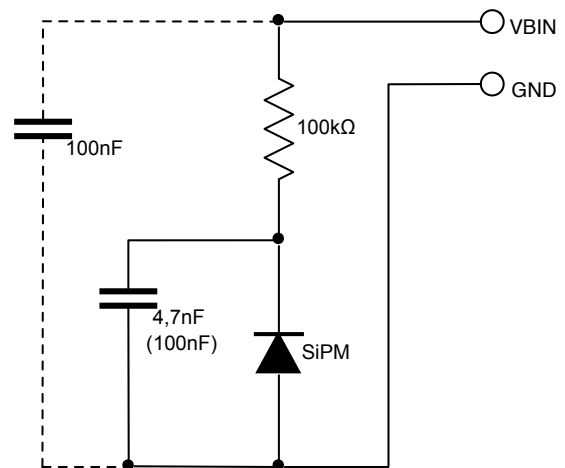


Abbildung 7.4.: Schaltbild der Glättungsschaltung. Die gestrichelte Linie und die geklammerte Angabe der Kondensatorkapazität deuten eine nachträgliche Modifikation der Schaltung an.

Zeichnet man je eine IU-Kennlinie mit und ohne die MPPCC-Platine in einen gemeinsamen Graphen, kann man folgendes Verhalten feststellen:

- Die Messwerte für den Strom liegen ohne die MPPCC-Platine immer unterhalb der Messwerte für den Strom mit der MPPCC-Platine.
- Am rechten Ende der Kennlinie nimmt die Steigung der Kurve ohne die MPPCC-Platine stark ab. Mit der Platine nimmt die Steigung jedoch weiter zu.
- Die Schwankungen des extrem kleinen Stroms sind ohne die MPPCC-Platine viel ausgeprägter.
- Im Bereich der Durchbruchspannung zeigen die Kennlinien ein sehr ähnliches Verhalten.

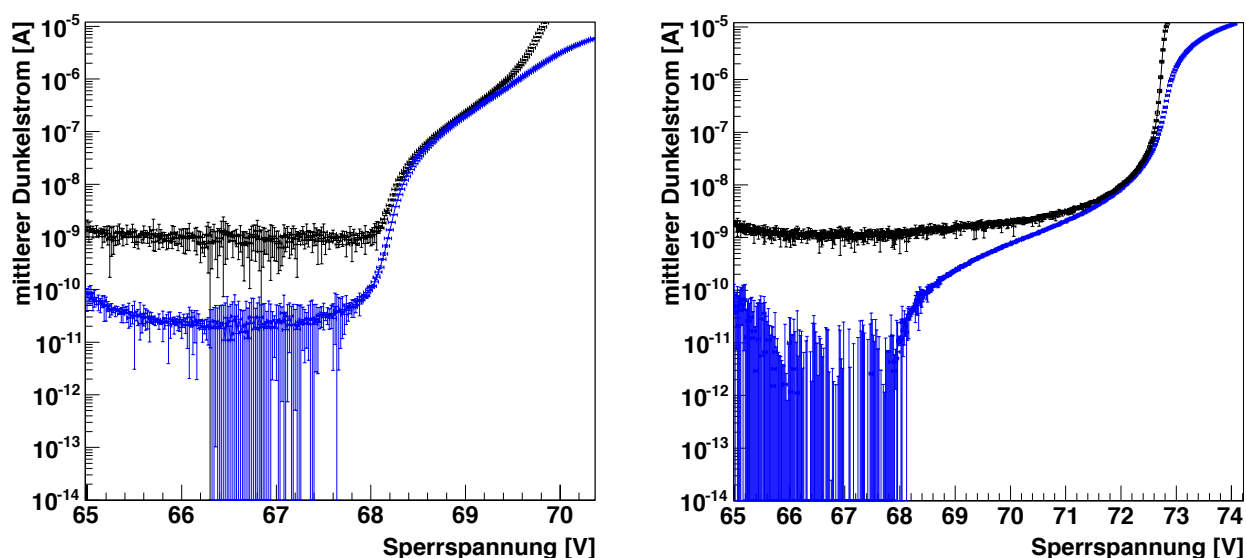


Abbildung 7.5.: Vergleich von Kennlinien mit (schwarz) und ohne (blau) die MPPCC-Platine. Links 100U1-SiPM bei 20 °C, rechts 25U2-SiPM bei -5 °C.

Abbildung 7.5 zeigt exemplarisch für die SiPM-Typen 100U1 (links) und 25U2 (rechts) den Vergleich von Kennlinien mit (schwarz) und ohne (blau) die MPPCC-Platine. Die Kurven des 100U1-Sensors sind bei 20 °C aufgenommen, die des 25U2-Sensors bei -5 °C.

Die zu beobachtenden Abweichungen lassen sich durch die unterschiedlichen Widerstandswerte auf der MPPCC-Platine und der Lochrasterplatine erklären. Der 100 k Ω Widerstand auf der Lochrasterplatine begrenzt den Stromfluss stärker als die 10 k Ω auf der MPPCC-Platine. Dies verursacht die durchgehend niedrigeren Messwerte für den Strom und auch das Abfallen gegen Ende der Messkurve.

Die stärkeren Schwankungen sind eine indirekte Folge des höheren Widerstandswertes auf der Lochrasterplatine; es fließt ein noch geringerer Strom, dadurch kommt es schon bei kleineren Unterschwingern der Spannung zur Umkehrung der Stromrichtung. Der Unterschied in den beiden Widerstandswerten wurde erst nach der Aufzeichnung einiger Kennlinien bemerkt. Für die vorliegende Arbeit konnten die Messungen aus zeitlichen Gründen nicht mehr mit identischen Widerstandswerten durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass die MPPCC-Platine noch eine Filterstufe mehr besitzt als die Schaltung auf der Lochrasterplatine. Diese Filterstufe besteht aus einem weiteren Widerstand und einem weiteren Kondensator.

7.2. Kennlinien für Silizium Photomultiplier von Hamamatsu

Die Konfiguration von KSC für die Aufzeichnung der Kennlinien von Hamamatsu Sensoren ist in Tabelle 7.2 gezeigt. Als Abbruchkriterien für eine Messreihe sind die Parameter Maximalspannung und Maximalstrom gleichberechtigt. Bei allen gezeigten Kennlinien wurde die Messung aber durch das Erreichen des Maximalstroms von $12\text{ }\mu\text{A}$ beendet. Die Abbruchparameter werden so gewählt, dass die interessanten Parameterbereiche vermessen werden und der Sensor bei der Messung nicht zerstört wird.

Tabelle 7.2.: Eine Übersicht der Konfigurationsparameter von KSC für Hamamatsu SiPMs.

Parameter	Wert
Startspannung	65 V
Maximalspannung	75 V
Schrittweite Spannung	0.02 V
Maximalstrom	$12\text{ }\mu\text{A}$
N Einzelmessungen	5
Starttemperatur	$30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Endtemperatur	$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Schrittweite Temperatur	$5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Zur Beurteilung der Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms der Silizium Photomultiplier werden die einzelnen Messreihen eines Kühlzyklus in einen gemeinsamen Graphen gezeichnet. Dies ist in den Abbildungen 7.6 und 7.7 gezeigt. Der Farbverlauf von Rot nach Blau entspricht dem Verlauf von hohen zu niedrigen Temperaturen. Die eingezeichneten horizontalen Linien kennzeichnen einen bestimmten Wert für den Dunkelstrom. Sie werden im Verlauf dieses Kapitels noch genauer erläutert.

Abbildung 7.6 zeigt für den 100U1-Sensor einen Vergleich mit (links) und ohne (rechts) die MPPCC-Platine. Die Kennlinienscharen für die Sensoren Typ-50C1 und Typ-25U1 sind in Abbildung 7.7 gezeigt. Für die weiteren SiPMs finden sich die gemessenen Kennlinienscharen in Anhang B. Die Kennlinienscharen mit und ohne die MPPCC-Platine besitzen verschiedene Skalierungen der Y-Achse. Auf diese Weise wird deutlich, dass die Kennlinienscharen mit und ohne die MPPCC-Platine die gleiche Struktur zeigen. Zwei kleine Unterschiede in den Scharen wurden bereits erwähnt. Diese sind das Abflachen der Steigung bei hohen Spannungen und der geringere Dunkelstrom unterhalb der Durchbruchspannung.

In allen Scharen sieht man, dass sich die Kurven mit sinkender Temperatur zu niedrigeren Spannungen hin verschieben. Das bedeutet, bei geringeren Temperaturen erreichen

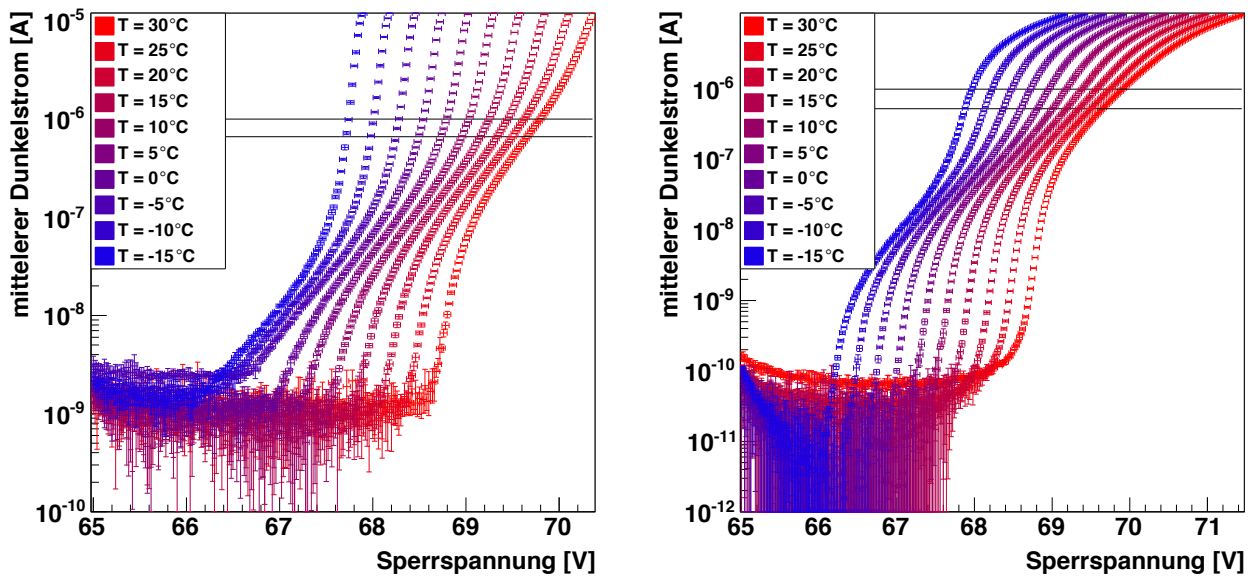


Abbildung 7.6.: Kennlinienscharen für den 100U1-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller. Die beiden Ordinaten haben unterschiedliche Skalierungen.

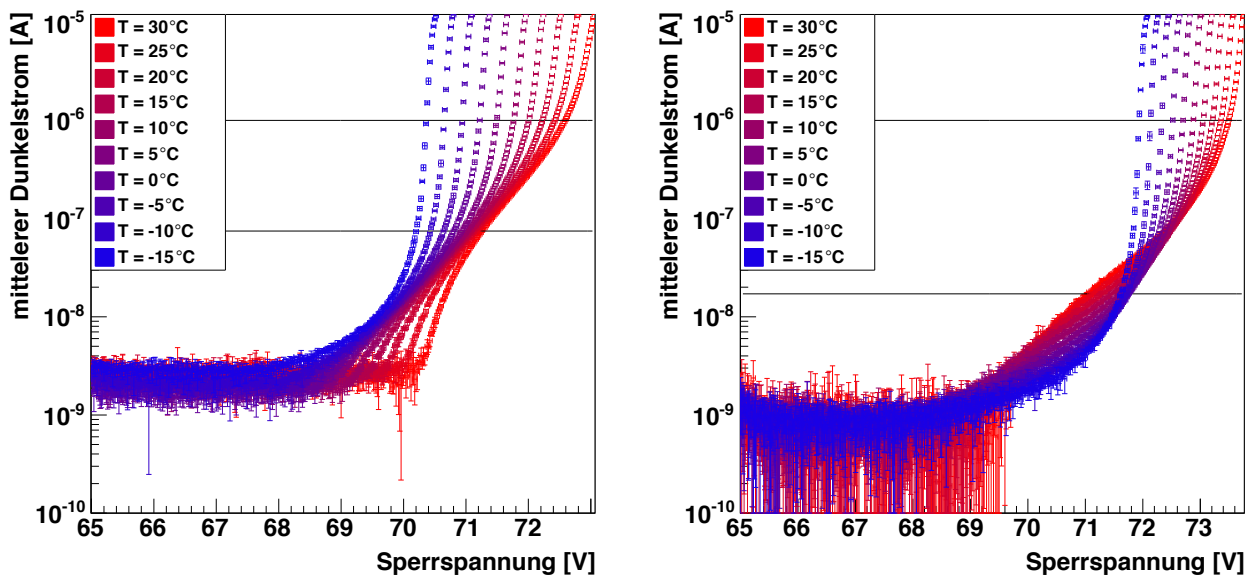


Abbildung 7.7.: Kennlinienscharen für die Sensoren Typ-50C1 (links) und Typ-25U1 (rechts) mit dem MPPC-Controller.

die Silizium Photomultiplier ihre Durchbruchspannung schon bei niedrigeren Spannungen. Das frühere Erreichen der Durchbruchspannung bei niedrigeren Temperaturen lässt sich dadurch erklären, dass bei sinkender Temperatur die Schwingungen im Kristallgitter des Siliziums abnehmen. Dadurch erhöht sich die mittlere freie Weglänge von Elektronen und Löchern, so dass diese zwischen zwei Stößen länger vom elektrischen Feld beschleunigt werden können. Auf diese Weise erreichen die Elektronen und Löcher schon bei einer geringeren elektrischen Feldstärke die für das Einsetzen der Stoßionisation benötigte Energie.

Beim Vergleich der Kurvenscharen der verschiedenen Sensoren stellt man fest, dass die einzelnen Kurven immer näher zusammenrücken je mehr Pixel ein Sensor hat. Bei den Sensoren mit 100 Pixeln sind die Messpunkte der verschiedenen Kurven voneinander getrennt. Hat der Sensor 400 liegen die Messpunkte von Kurven verschiedener Temperatur in einigen Bereichen sehr nah beieinander. Bei den Sensoren mit 1600 Pixeln liegen die Messpunkte von verschiedenen Kurven übereinander.

Diese Beobachtung lässt sich so deuten, dass der Effekt der Abnahme der Durchbruchspannung mit sinkender Temperatur bei Sensoren mit mehr Pixeln weniger ausgeprägt ist. Allerdings ist das nicht mit der Annahme vereinbar, dass bei allen Sensoren das gleiche Siliziumsubstrat mit dem gleichen Schichtaufbau zum Einsatz kommt und sich nur die Fläche der einzelnen Pixel ändert. Den Beobachtungen nach haben die Sensoren mit unterschiedlichen Pixelzahlen verschiedene Temperaturkoeffizienten, was aber im Widerspruch zur Angabe im Datenblatt von Hamamatsu steht. Dort wird für alle Sensoren ein Temperaturkoeffizient der Sperrspannung von $50 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ angegeben. Die Ursache dieses Effekts lässt sich im Rahmen der durchgeführten Messungen nicht klären.

Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Kurven sich insgesamt zu höheren Spannungen verschieben je kleiner die Pixel des entsprechenden Sensors sind. Hier liegt die Vermutung nahe, dass bei Sensoren mit kleineren Pixeln Randeffekte auftreten. Da das Verhältnis von aktiver Pixelfläche zum Rand mit der Pixelgröße kleiner wird, hat dies vermutlich einen Einfluss auf das elektrische Feld im Innern. Es wäre also möglich, dass bei einer kleineren Pixelfläche eine etwas höhere Spannung nötig ist, um die gleiche elektrische Feldstärke im Innern zu erreichen wie bei größeren Pixelflächen.

Ein weiterer Effekt tritt nur bei den Sensoren mit 1600 Pixeln auf. Hier gibt es Bereiche in denen, entgegen jeder Erwartung, die Kurven mit höherer Temperatur schon bei kleineren Spannungen höhere Ströme erreichen als die Kurven mit niedrigerer Temperatur. Diese Bereiche finden sich in Abbildung 7.7 auf der rechten Seite und in Abbildung B.2 auf der linken Seite jeweils im Intervall von etwa 70 V bis etwa 72 V. Die Ursache dieses Effekts lässt sich im Rahmen der durchgeführten Messungen ebenfalls nicht klären.

7.3. Temperaturabhängige Anpassung der Betriebsspannung

Um Silizium Photomultiplier produktiv einsetzen zu können, müssen die Signale, die von der Ausleseelektronik geliefert werden, reproduzierbar sein. Aufgrund der beobachteten Temperaturabhängigkeit der Signale gibt es drei Möglichkeiten reproduzierbare Messergebnisse mit SiPMs zu erhalten. Man kann für eine konstante Temperatur der Messumgebung sorgen, oder man korrigiert die Signale in Abhängigkeit der Temperatur. Bei einer Korrektur kann man entweder die Ausgangspulse selbst anpassen, oder man verändert die Betriebsparameter und verändert auf diese Weise die Ausgangspulse.

Um die Signale der Silizium Photomultiplier bei Temperaturänderungen korrigieren zu können, muss zunächst das Verhalten bei Temperaturänderung genau bekannt und ebenfalls reproduzierbar sein. Schließlich ist zu ermitteln, wie die Korrektur effektiv realisiert werden kann. In diesem Kapitel wird der Ansatz einer temperaturabhängigen Anpassung der Betriebsspannung zur Stabilisierung der Ausgangssignale verfolgt.

Eine vergleichsweise einfach zu messende Größe ist der Strom, der durch den Silizium Photomultiplier fließt. Allerdings liegt dieser in der Größenordnung von μA und teilweise auch darunter. Deshalb ist der Einsatz eines präzisen Strommessgerätes erforderlich. Dieses steht mit dem Keithley 2400 Sourcemeter zur Verfügung.

Der Dunkelstrom eines Silizium Photomultipliers ist das Produkt aus dem Verstärkungsfaktor und der Anzahl der pro Zeiteinheit durchgebrochenen Pixel. Die Temperaturabhängigkeiten der beiden Faktoren haben unterschiedliche Vorzeichen. Mit sinkender Temperatur sinkt auch die Rate der durchbrechenden Pixel aufgrund der abnehmenden Anregungswahrscheinlichkeit (siehe Gleichung 5.2). Der Verstärkungsfaktor nimmt mit sinkender Temperatur aufgrund der sinkenden Durchbruchspannung zu. Prinzipiell ist der Verstärkungsfaktor die Größe, die man konstant halten möchte. Ihn zu messen ist jedoch wesentlich aufwändiger.

Im Folgenden wird untersucht, ob die Regelung auf einen konstanten Dunkelstrom das Potential hat, die Änderung der Signale mit der Temperatur zu kompensieren. Offen ist jedoch nach welchen Kriterien man den Wert des Dunkelstroms für die Regelung auswählt. Ein erster Ansatz macht sich die Angabe der empfohlenen Betriebsspannung von Hamamatsu zu Nutze. Hamamatsu gibt für jeden ausgelieferten Silizium Photomultiplier eine empfohlene Betriebsspannung an (siehe Abbildung A.3). Wie Hamamatsu zu dieser Empfehlung kommt, ist nicht bekannt und wird von Hamamatsu nicht veröffentlicht. Es wird vermutet, dass die Sensoren von Hamamatsu nach der Produktion vermessen werden und die empfohlene Betriebsspannung aus dieser Messung abgeleitet wird. Um einen Wert für den Dunkelstrom festzulegen, bedient man sich der IU-Kennlinie des Sensors bei 25°C . Die Vorgehensweise ist in Abbildung 7.8 skizziert. Zunächst zeich-

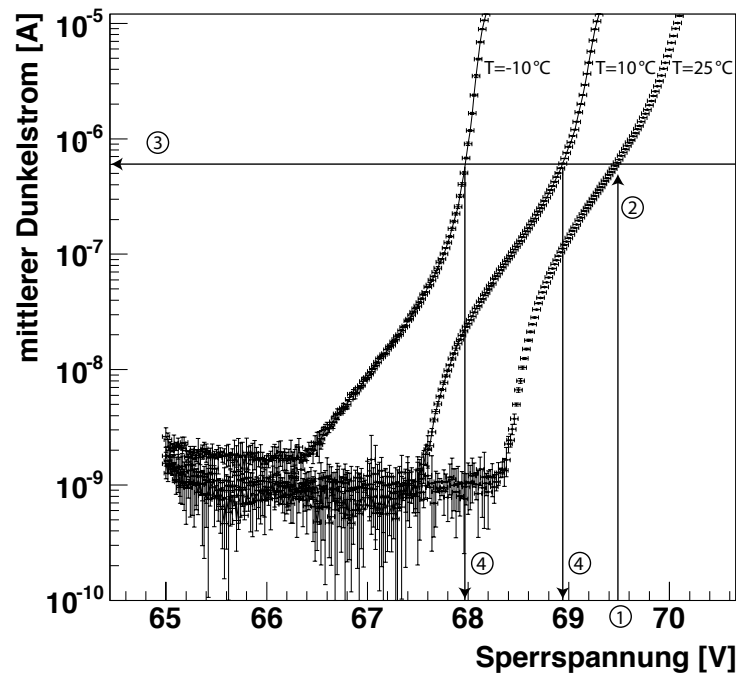


Abbildung 7.8.: Ermitteln des Dunkelstroms anhand der von Hamamatsu empfohlenen Betriebsspannung.

net man eine Parallele zur Y-Achse bei der von Hamamatsu angegebenen Betriebsspannung (Punkt 1). Dann konstruiert man durch den Schnittpunkt der Geraden mit der IU-Kennlinie bei 25 °C eine Parallele zur X-Achse (Punkt 2). Nun lässt sich der Wert des Dunkelstroms an der Y-Achse ablesen (Punkt 3). Bei einer von 25 °C verschiedenen Temperatur lässt sich nun durch eine Parallele zur Y-Achse im Schnittpunkt der entsprechenden IU-Kennlinie mit der Horizontalen die Betriebsspannung des SiPM auf der X-Achse ablesen (Punkt 4).

Dies erklärt die jeweils untere horizontale Linie in den Kennlinienscharen. Durch das Ermitteln der Schnittpunkte der Kennlinien mit der Horizontalen lässt sich für den entsprechenden Sensor eine Kalibrationskurve der Betriebsspannung zur Temperatur ermitteln. Abbildung 7.9 zeigt die Kalibrationskurven für die Sensoren Typ-100U1 (links) und Typ-25U1 (rechts). Die Punkte stehen für die Messung mit der MPPCC-Platine, die Kreuze für die Messung mit der Lochrasterplatine.

Die Kalibrationskurve für den 100U1-Sensor zeigt den erwarteten Verlauf, wohingegen beim 25U1-Sensor über einen weiten Bereich die Betriebsspannung mit steigender Temperatur sinkt. Dies lässt sich mit einem Blick auf die Kennlinienscharen der Sensoren erklären. Diese sind in Abbildung 7.6 sowie auf der rechten Seite in Abbildung 7.7 gezeigt.

Beim 100U1-Sensor liegt die untere der beiden horizontalen Linien in einem Bereich in dem die Kurven das erwartete Verhalten zeigen. Wie bereits erläutert, gibt es bei den Sensoren mit 1600 Pixeln Bereiche in denen die Kurven mit höherer Temperatur schon bei kleineren Spannungen höhere Ströme erreichen als die Kurven mit niedrigerer Temperatur (siehe Seite 50). Auf der rechten Seite von Abbildung 7.7 erstreckt sich dieses Intervall von etwa 70 V bis etwa 72 V. Für den 25U1-Sensor fällt die untere horizontale Linie genau in diesen Bereich. Somit funktioniert die Bestimmung des Dunkelstroms anhand der von Hamamatsu vorgegebenen Betriebsspannung nicht für alle Sensoren.

Man stellt jedoch fest, dass es für alle Sensoren in den Kennlinienscharen einen Bereich gibt, in dem die Kurven den erwarteten Verlauf zeigen. Daher ist ein weiterer Ansatz, den Dunkelstrom so festzulegen, dass die Kurven im Bereich der Schnittpunkte mit der Horizontalen den erwarteten Verlauf zeigen. Dies erklärt die jeweils obere horizontale Linie in den Kennlinienscharen. Dort wurde jeweils der Wert von $1\text{ }\mu\text{A}$ für den Dunkelstrom festgelegt. Mit diesem Wert für den Dunkelstrom sind die Kalibrationskurven für den 100U1-Sensor (links) und den 25U1-Sensor (rechts) in Abbildung 7.10 erstellt. Diese zeigen, wie erwartet, einen linearen Anstieg der Betriebsspannung mit steigender Temperatur.

Der nächste Schritt ist nun die Silizium Photomultiplier mit der in den Kalibrationskurven festgelegten Spannung zu betreiben und durch systematische Auswertung der Ausgangspulse bei verschiedenen Temperaturen zu verifizieren, dass tatsächlich keine temperaturbedingten Schwankungen mehr auftreten. Dazu ist es nötig, eine Vielzahl von Pulsen aufzuzeichnen und durch eine nachgeschaltete Analyse auszuwerten. Aufgrund der großen dabei anfallenden Datenmenge und der Anzahl der notwendigen Analyseschritte ist nur ein automatisiertes Verfahren vorstellbar. Dies ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Prinzipiell ist der Aufbau für eine derartige Analyse geeignet.

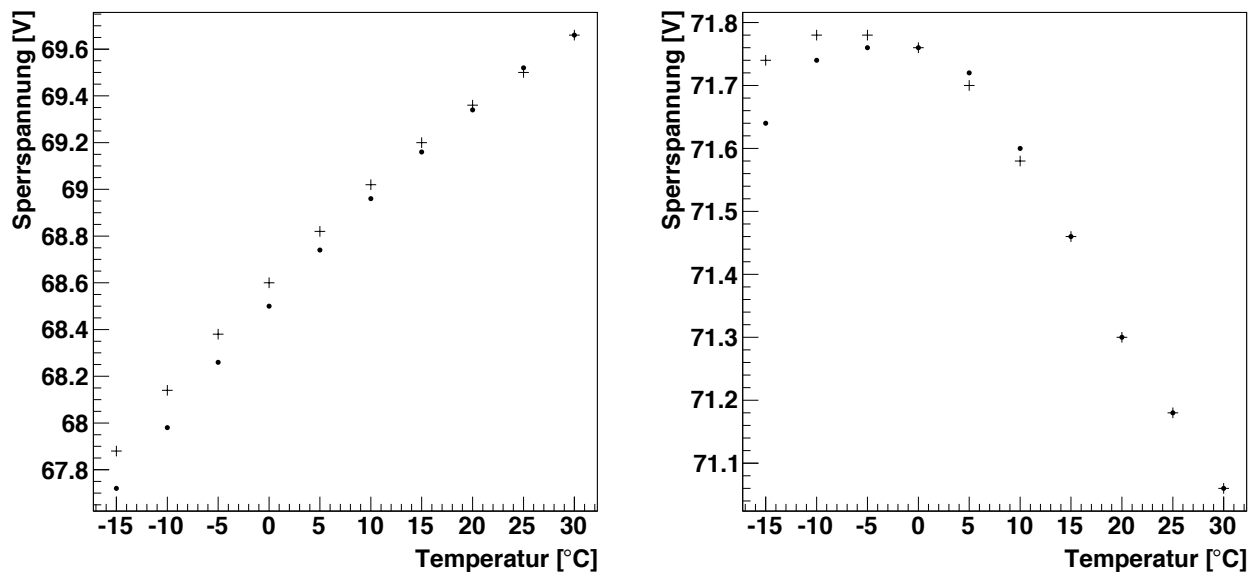


Abbildung 7.9.: Kalibrationskurven für den 100U1-Sensor (links) und den 25U1-Sensor (rechts). Die Punkte stehen für die Messung mit der MPPCC-Platine, die Kreuze für die Messung mit der Lochrasterplatine. Der Dunkelstrom ist anhand der empfohlenen Betriebsspannung gewählt.

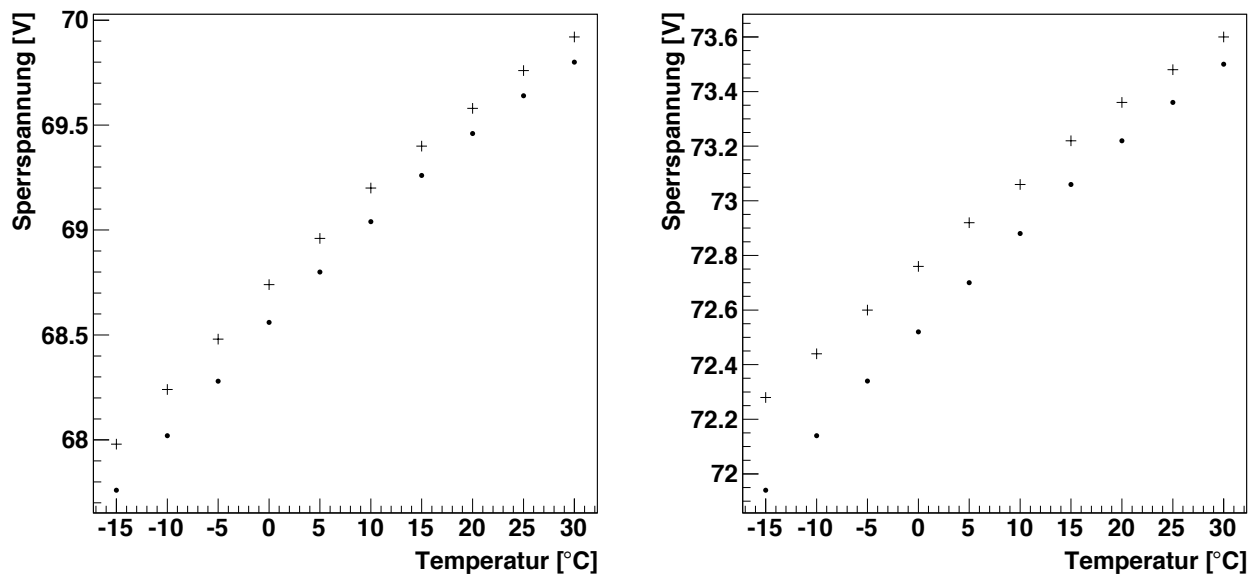


Abbildung 7.10.: Kalibrationskurven für den 100U1-Sensor (links) und den 25U1-Sensor (rechts). Die Punkte stehen für die Messung mit der MPPCC-Platine, die Kreuze für die Messung mit der Lochrasterplatine. Der Dunkelstrom ist zu 1 μ A festgelegt.

7.4. Vergleich mit Silizium Photomultipliern anderer Hersteller

Neben den Silizium Photomultipliern von Hamamatsu werden auch Sensoren der Hersteller sensL und FBK vermessen. Hamamatsu ist jedoch der einzige Hersteller, der genauere Informationen zum Betrieb jedes einzelnen Sensors bereitstellt. sensL gibt jeweils nur die Durchbruchspannung der ganzen Produktionscharge bei 20 °C an. Diese liegt für die beiden SPMMicro1020X18 bei 28,37 V und für die beiden SPMMicro1035X18 bei 28,2 V. Da FBK kein kommerzieller Anbieter von SiPMs ist, wurden die beiden verwendeten Sensoren vom Nationalen Institut für Kernforschung (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – INFN) in Bologna zur Verfügung gestellt und nicht vom Hersteller direkt bezogen. Über ihre genaue Durchbruchspannung gibt es keine Informationen.

Die Gemeinsamkeit aller Sensoren ist, dass mit etwa 30 V ihre Durchbruchspannung weniger als halb so groß ist wie die der Hamamatsu Sensoren. Das ist zunächst kein prinzipbedingter Vor- oder Nachteil, sondern liegt lediglich an einem unterschiedlichen internen Aufbau der Silizium Photomultiplier.

Anhand von Kennlinienscharen der einzelnen Sensoren soll nun ein Vergleich mit den Sensoren von Hamamatsu durchgeführt werden. Ihr Temperaturverhalten wird ebenfalls beurteilt. Bei allen Sensoren fällt auf, dass sie besonders bei niedrigen Temperaturen in der Nähe und unterhalb der Durchbruchspannung kein stabiles Verhalten zeigen. Der Dunkelstrom schwankt sehr stark und stabilisiert sich erst bei Spannungen, die über der Durchbruchspannung liegen.

Aufgrund dieser starken Schwankungen sind die einzelnen Kennlinienscharen besonders im Bereich niedriger Spannungen sehr unübersichtlich. Um die Übersicht in den Abbildungen zu erhöhen, werden in diesem Kapitel die einzelnen Kurven nicht mit der vollen Anzahl an Messpunkten gezeichnet. Bis zu einem Wert des Dunkelstroms von 60 nA wird nur jeder fünfte Messwert gezeichnet, darüber nur jeder dritte. Abbildung 7.11 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen einer Kennlinienschar mit allen aufgenommenen Messwerten (links) und der reduzierten Anzahl an Messwerten (rechts).

Das instabile Verhalten tritt bei allen Sensoren auf, die nicht von Hamamatsu stammen. Es ist vorstellbar, dass sich hier eine Erfahrung wiederholt, welche von der CMS-Kollaboration beim Bezug von Sensoren für Siliziumstreifenmodule gemacht wurde. Dort lieferte die Firma Hamamatsu Sensoren von einer konstant hochwertigen Qualität, die von anderen Zulieferern nicht erreicht werden konnte (siehe [5, Kapitel 1.3] oder [9]). Im Bezug auf die Silizium Photomultiplier ist dies jedoch ein erster Eindruck. Er muss in weiteren Analysen widerlegt oder bestätigt werden.

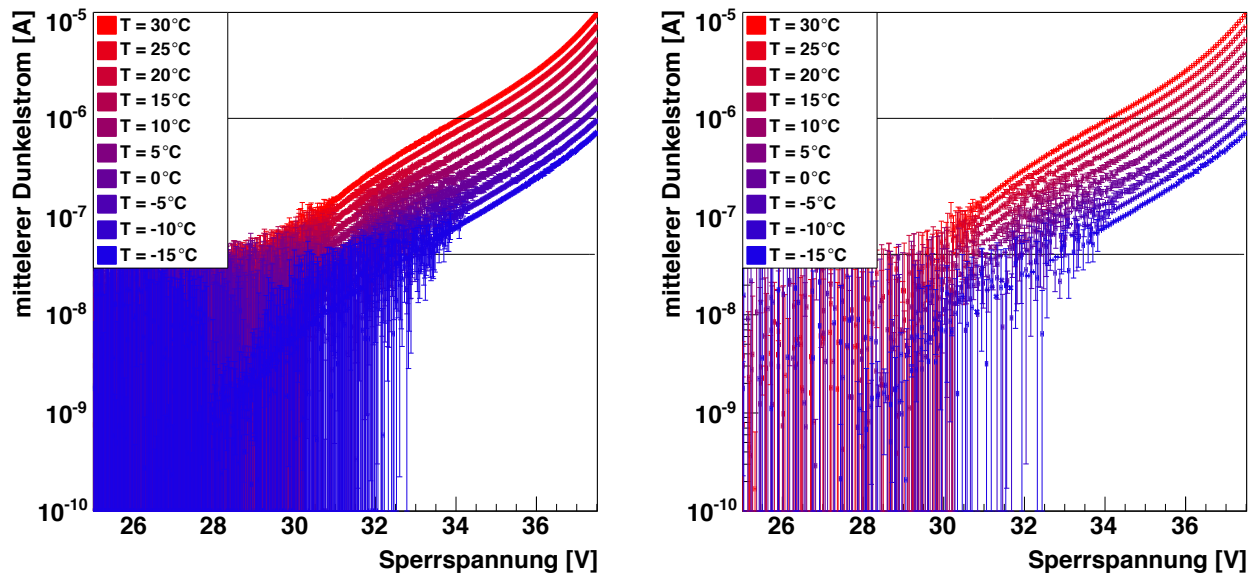


Abbildung 7.11.: Kennlinienschar für den 1020X18a-Sensor mit der MPPCC-Platine. Links mit allen Messwerten, sowie rechts mit reduzierter Anzahl.

Abbildung 7.12 zeigt die Kennlinienscharen der beiden Sensoren von FBK. Auf der linken Seite für den FBK50F1-Sensor und auf der rechten Seite für den FBK50F4-Sensor. Der mit F4 bezeichnete Sensor stammt aus einer neueren Fertigung als der mit F1 bezeichnete Sensor. In ihren Kennlinienscharen unterscheiden sie sich nur unwesentlich. Die Scharen der FBK-Sensoren ändern sich im Gegensatz zu den Sensoren der anderen Hersteller kaum mit der Temperatur.

Für zwei Sensoren der Firma sensL sind die Kennlinienscharen in Abbildung 7.13 gezeigt. Auf der linken Seite sieht man den 1020X18b-Sensor und auf der rechten Seite den 1035X18b-Sensor. Diese beiden Sensoren besitzen eine unterschiedliche Pixelzahl (848 bzw. 400). Allerdings stellt man hier keinen Einfluss der Pixelzahl auf den Temperaturkoeffizienten fest. Dies spricht dafür, dass der bei den Hamamatsu Sensoren auftretende Effekt mit dem Hamamatsu Design der Silizium Photomultiplier zusammenhängt.

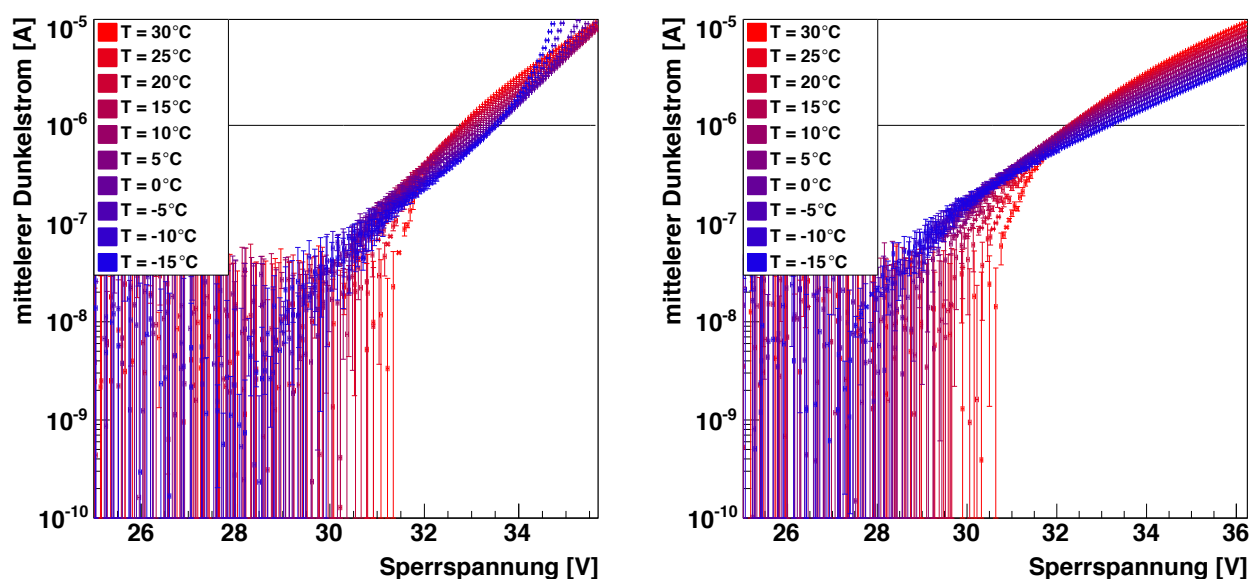


Abbildung 7.12.: Kennlinienscharen für den FBK50F1-Sensor (links) und den FBK50F4-Sensor (rechts) mit der MPPCC-Platine.

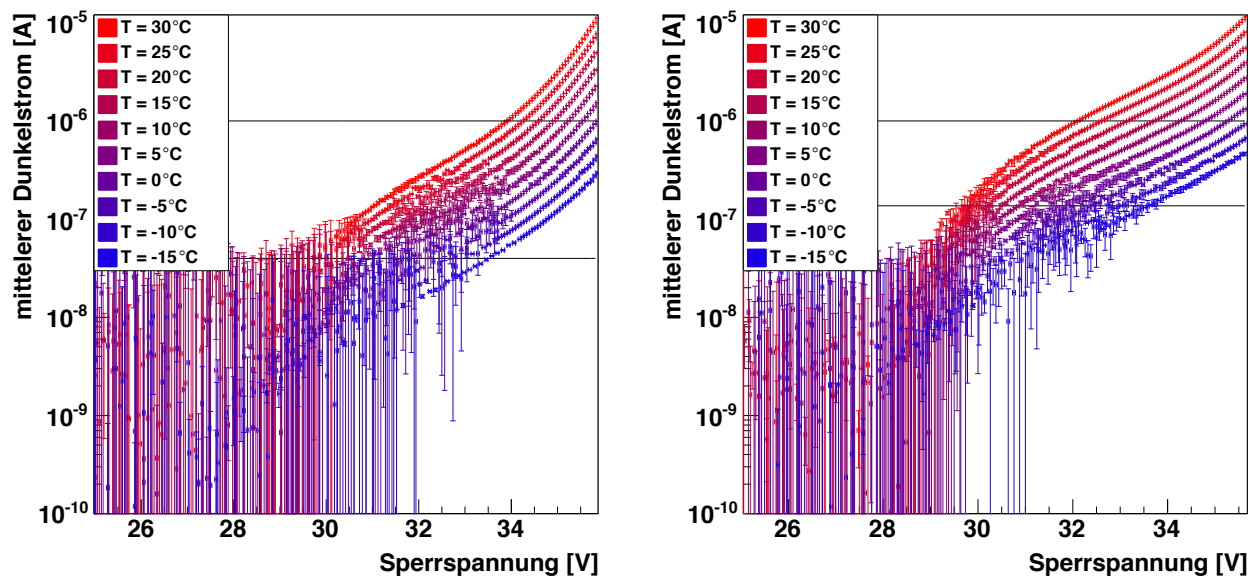


Abbildung 7.13.: Kennlinienscharen für den 1020X18b-Sensor (links) und den 1035X18b-Sensor (rechts) mit der MPPCC-Platine.

8. Fazit und Ausblick

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Messungen von Strom-Spannungs-Kennlinien von Silizium Photomultipliern tragen zum Verständnis ihres Temperaturverhaltens und der von ihnen erzeugten Signale bei. Es wird gezeigt, dass eine stetige Anpassung der Betriebsparameter oder eine Kompensation der Ausgangssignale notwendig ist, um reproduzierbare Messungen durchführen zu können. Dass dies technisch möglich ist, zeigt sich anhand der vorgestellten Untersuchungen von Hamamatsu MPPC-Modulen. Ob die vorgeschlagene Methode, der temperaturabhängigen Regelung auf einen konstanten Dunkelstrom, zu reproduzierbaren Messungen führt, muss sich in weiterführenden Untersuchungen zeigen.

Die Entwicklung des Multi Pixel Photon Counter Controllers der Elektronikabteilung des III. Physikalischen Instituts B ist auf einem guten Weg. Die bisher gesammelten Erfahrungen sind durchweg positiv. Ein weiterer Prototyp des MPPCCs wird den Anwendern weitere Funktionen zur Verfügung stellen. Dies sind Messungen von Temperatur, Spannung und Strom sowie deren Regelung über einen Mikrocontroller. Einer weiteren Miniaturisierung der Schaltung sind natürliche Grenzen gesetzt, falls weiterhin SMD-Bauteile zum Einsatz kommen.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit sind eine Reihe an weiterführenden Untersuchungen vorstellbar. Über die Löschwiderstände der einzelnen Pixel weiß man bisher wenig. Ihr exakter Wert ist bisher ebensowenig bekannt wie die Antwort auf die Frage, ob er sich mit der Pixelzahl ändert. Durch Untersuchungen von Diodenkennlinien in Vorwärtsrichtung könnte man diesen Fragen nachgehen. Weiterhin sind systematische Untersuchungen der Verstärkung der MPPCC-Prototypen, sowie der Silizium Photomultiplier selbst vorstellbar. Dies erfordert die Aufzeichnung und Auswertung einer Vielzahl an Pulsen. Um die Verstärkung des MPPCC-Prototypen unabhängig von einem montierten Sensor bestimmen zu können, ist das Einkoppeln von bekannten und definierten Signalen am Eingang der Schaltung notwendig.

Bei einzelnen Beobachtungen, die anhand der vorgestellten Messungen gemacht werden können, sind die Ursachen der auftretenden Effekte nicht abschließend geklärt. Die restriktive Informationspolitik der Hersteller trägt nicht dazu bei, mehr Erkenntnisse über den genauen internen Aufbau von SiPMs und die Werte einzelner Parameter zu gewinnen.

Hier könnte eine Simulation von Silizium Photomultipliern, anhand verschiedener Modelle helfen, ungeklärte Fragen zu beantworten.

Den CMS-Detektor für den Betrieb am SLHC auszurüsten, wird die CMS-Kollaboration noch vor eine Vielzahl von spannenden Aufgaben stellen. Die ersten Schritte, den Vorschlag des MTT als zusätzliche Detektorkomponente, zu realisieren sind getan. Der Autor hofft, mit dieser Arbeit dazu einen Betrag zu leisten.

A. Weitere Abbildungen

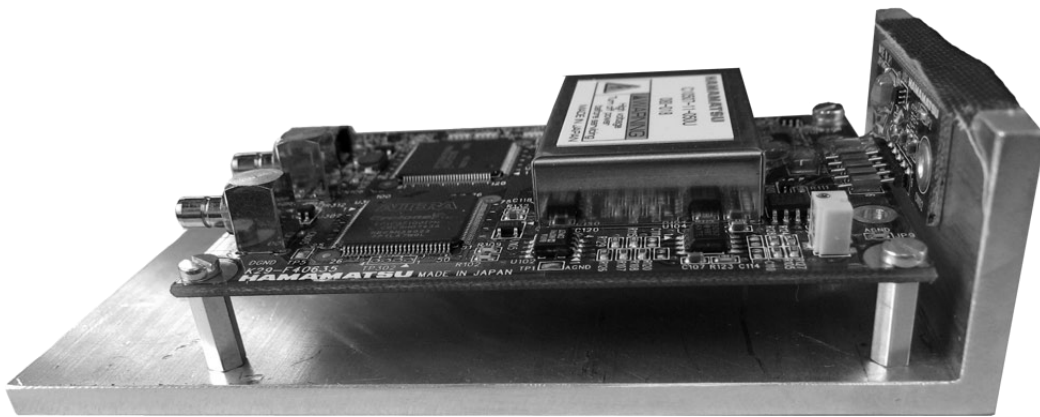


Abbildung A.1.: Ansicht eines MPPC-Moduls mit angepasstem Aluminiumwinkel.

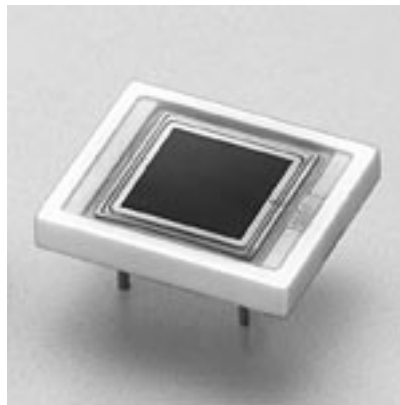


Abbildung A.2.: Eine Silizium APD von Hamamatsu [22]. Es handelt sich um das Modell S8644-55.

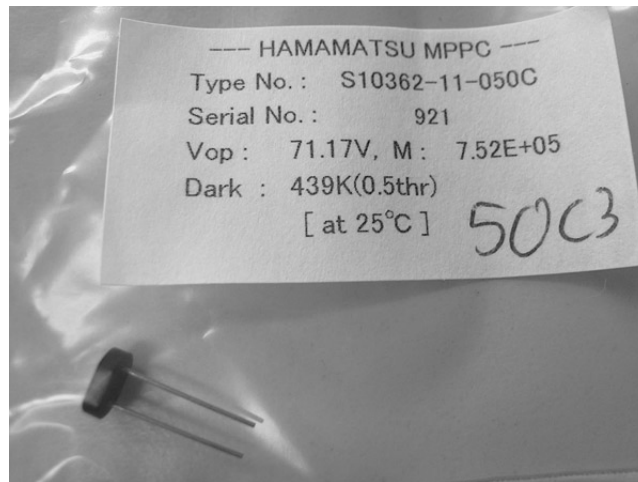


Abbildung A.3.: Aufnahme eines Antistatikbeutels mit den Kenndaten des Hamamatsu SiPM.

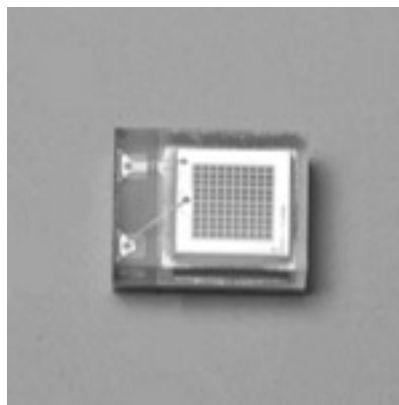


Abbildung A.4.: Aufnahme eines SiPMs der S10362-11 Serie. Gehäuse in SMD-Ausführung [21, Seite 3].

B. Kennlinienscharen weiterer Hamamatsu Sensoren

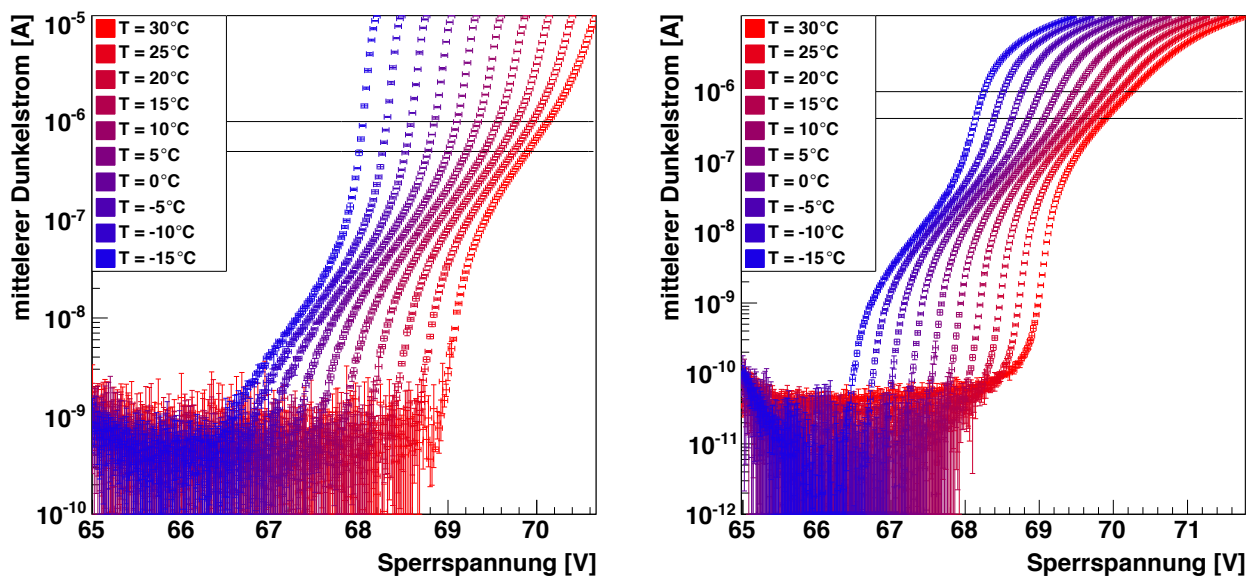


Abbildung B.1.: Kennlinienscharen für den 100U2-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller. Die beiden Ordinaten haben unterschiedliche Skalierungen.

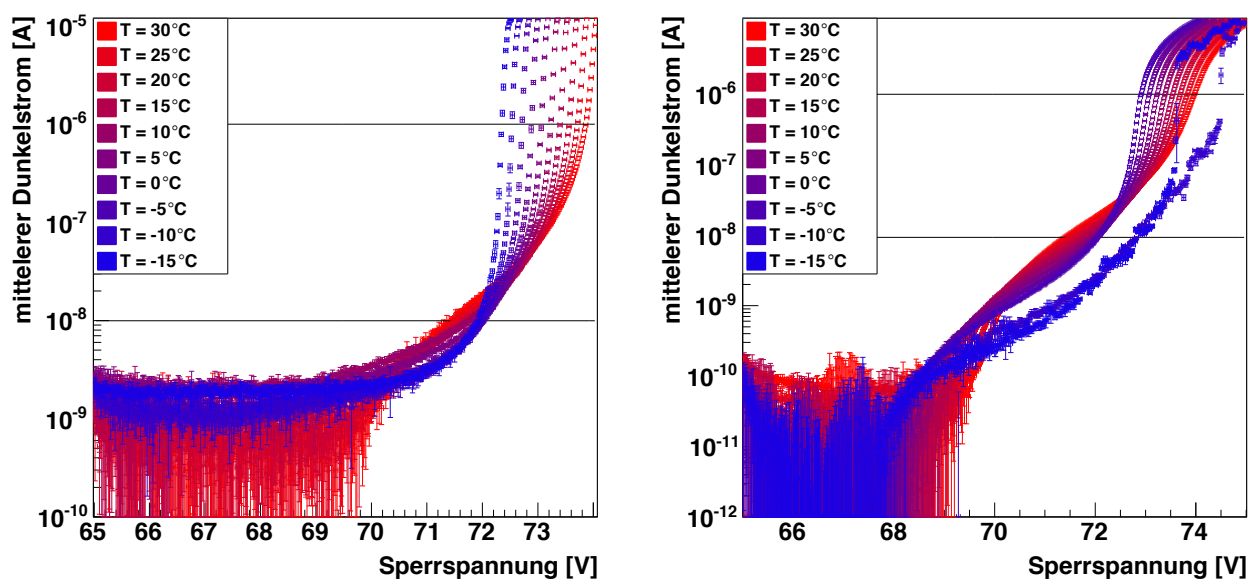


Abbildung B.2.: Kennlinienscharen für den 25U2-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller. Die beiden Ordinaten haben unterschiedliche Skalierungen. Auf der rechten Seite zeigen sich bei den beiden Kurven mit -10°C und -15°C Abweichungen. Dort gab es während der Messung Probleme mit der Stabilisierung der Temperatur in der Kühlbox.

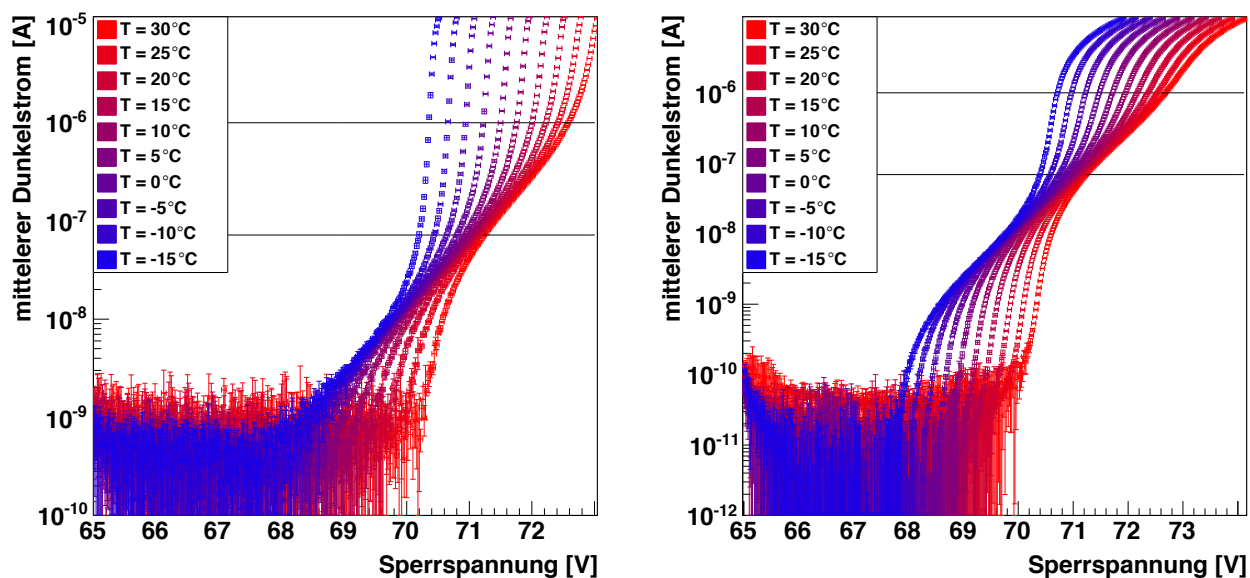


Abbildung B.3.: Kennlinienscharen für den 50C2-Sensor mit (links) und ohne (rechts) den MPPC-Controller. Die beiden Ordinaten haben unterschiedliche Skalierungen.

Literaturverzeichnis

- [1] *6634A DC Power Supply*. Hewlett-Packard Company.
URL: http://www.artisan-scientific.com/info/HP_663xA_Datasheet.pdf (besucht am 18.02.2010).
- [2] *8842A Digital Multimeter*. Fluke Corporation.
URL: http://assets.fluke.com/manuals/8842a_-_imeng0300.pdf (besucht am 12.01.2010).
- [3] C. Battilana A. Benvenuti G.M. Dallavalle A. Perrotta A. Montanari G. Abbiendi.
„Muon Trigger Upgrade at SLHC: Muon Track fast Tag“. In: *CMS Internal Note* (2007). CMS IN-2007/058.
URL: http://cms.cern.ch/iCMS/jsp/openfile.jsp?type=IN&year=2007&files=IN2007_058.pdf
- [4] D Acosta u. a. *CMS physics: Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva: CERN, 2006.
- [5] A. Affolder. „The CMS Silicon Strip Tracker: Design and Production Status“. In: *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 150 (2006). Proceedings of the 9th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors, S. 118 –123.
DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2004.08.037
- [6] *ALICE - A Large Ion Collider Experiment*.
URL: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/> (besucht am 01.02.2010).
- [7] *ATLAS - A Toroidal LHC ApparatuS*.
URL: <http://atlas.ch/> (besucht am 01.02.2010).
- [8] M Bajko u. a. *Report of the Task Force on the Incident of 19th September 2008 at the LHC*. oai:[cds.cern.ch:1168025](http://cds.cern.ch/record/1168025). Techn. Ber. LHC-PROJECT-Report-1168. CERN, 2009.
URL: <http://cdsweb.cern.ch/record/1168025>
- [9] Thomas Bergauer. „Process Quality Control of Silicon Strip Detectors for the CMS Tracker“. Diplomarb. Institut für Hochenergiephysik der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2004.

- [10] *CMS Detector Drawings*.
URL: <http://cms.web.cern.ch/cms/Media/Images/Detector/Detector%20Drawings/index.html> (besucht am 03.02.2010).
- [11] *CMS TriDAS project: Technical Design Report; 1, The Trigger Systems*. Technical Design Report CMS. Geneva: CERN, 2000.
URL: <http://cdsweb.cern.ch/record/706847>
- [12] The CMS Collaboration und S Chatrchyan u. a. „The CMS experiment at the CERN LHC“. In: *Journal of Instrumentation* 3.08 (2008), S08004.
DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004
- [13] F. Corsi u. a. „Modelling a silicon photomultiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 572.1 (2007). Frontier Detectors for Frontier Physics - Proceedings of the 10th Pisa Meeting on Advanced Detectors, S. 416 –418. ISSN: 0168-9002.
DOI: 10.1016/j.nima.2006.10.219
- [14] *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Maxim Integrated Products, Inc.
URL: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf> (besucht am 18.02.2010).
- [15] *European Organization for Nuclear Research*.
URL: <http://cern.ch> (besucht am 03.02.2010).
- [16] Holger Göbel. *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik*. 3rd Edition. ISBN-13: 978-3-540-69288-1. Springer-Lehrbuch, 2008.
- [17] Junji Haba. „Status and perspectives of Pixelated Photon Detector (PPD)“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 595.1 (2008). RICH 2007 - Proceedings of the Sixth International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, S. 154 –160. ISSN: 0168-9002.
DOI: 10.1016/j.nima.2008.07.061
- [18] Thomas Hermanns. „Aufbau eines Systems für Kühlttests zur Qualitätsüberwachung von CMS Silizium-Modulen“. Diplomarb. RWTH Aachen, 2004.
- [19] *IceCube neutrino telescope Homepage*.
URL: <http://icecube.wisc.edu/> (besucht am 21.01.2010).
- [20] Hamamatsu Photonics K.K. *MPPC Katalog 01/07*.
- [21] Hamamatsu Photonics K.K. *MPPC Katalog 12/09*.
URL: <http://sales.hamamatsu.com/de/produkte/solid-state-division/si-photodiode-series/mppc/catalog.php?&view=catalog> (besucht am 26.01.2010).

- [22] Hamamatsu Photonics K.K. *Silizium APD S8664-55*.
URL: http://jp.hamamatsu.com/products/_virtual/sel_ssd_apd_s2/S8664-55/index_en.html (besucht am 22.01.2010).
- [23] LEMO. *Katalog und Technische Daten LEMO 00 Serie*.
URL: http://www.lemo.de/downloads/kataloge/00and01Coaxial_en.pdf (besucht am 18.02.2010).
- [24] *LHC Design Report*.
URL: <http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html> (besucht am 03.02.2010).
- [25] *Maxim Integrated Products, Inc.* 120 San Gabriel Drive Sunnyvale, CA 94086 USA.
URL: <http://www.maxim-ic.com/> (besucht am 19.02.2010).
- [26] *Maxim Integrated Products, Inc. 1-Wire Devices*.
URL: <http://www.maxim-ic.com/products/1-wire/> (besucht am 25.01.2010).
- [27] *Model 2400 Source Meter*. Keithley Instruments Inc.
URL: <http://www.keithley.co.uk/products/currentvoltage/?mn=2400> (besucht am 18.02.2010).
- [28] *MPPC module C10507-11-050U*. Hamamatsu Photonics K.K.
URL: http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/4010/4026/C10507-11-050U/index_en.html (besucht am 12.01.2010).
- [29] *National Instruments Corporation LabVIEW Homepage*.
URL: <http://www.ni.com/labview/whatis/> (besucht am 24.01.2010).
- [30] Anders Ryd. *CMS L1 Track Trigger for SLHC*. Vertex 09 - Yearly workshop on vertex detectors and related techniques. 2009.
URL: https://wiki.lepp.cornell.edu/lepp/pub/People/AndersRyd/090913_VERTEX09.pdf (besucht am 20.02.2010).
- [31] *Sensirion AG*. Laubisruetistrasse 50, Postfach 235, CH-8712 Staefa ZH, Switzerland.
URL: <http://www.sensirion.com> (besucht am 19.02.2010).
- [32] *sensL Ireland*. Lee House, Riverview Business Park, Bessboro Road, Blackrock, Cork.
URL: <http://sensl.com/> (besucht am 19.02.2010).
- [33] Jamie Shiers. „The Worldwide LHC Computing Grid (worldwide LCG)“. In: *Computer Physics Communications* 177.1-2 (2007). Proceedings of the Conference on Computational Physics 2006 - CCP 2006, Conference on Computational Physics 2006, S. 219 –223. ISSN: 0010-4655.
DOI: 10.1016/j.cpc.2007.02.021
- [34] *SHT1x Humidity and Temperature Sensor*. Sensirion, The Detector Company.
URL: http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf (besucht am 18.02.2010).

- [35] *Standard NIM instrumentation system*. U.S. NIM Committee.
DOI: 10.2172/7120327
- [36] *Super-Kamiokande official Homepage*.
URL: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/idpmt-e.html> (besucht am 21.01.2010).
- [37] S.M. Sze und Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd Edition.
ISBN-13: 978-0-471-14323-9. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [38] *TDS3054 Digital Phosphor Oscilloscope*. Tektronix, Inc.
URL: <http://www2.tek.com/cmswpt/psdetails.lottr?ct=PS&cs=Data+Sheets&ci=14531&lc=EN> (besucht am 18.02.2010).
- [39] *The Compact Muon Solenoid Experiment*.
URL: <http://cms.web.cern.ch/cms/> (besucht am 01.02.2010).
- [40] *The Large Hadron Collider beauty experiment*.
URL: <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/> (besucht am 01.02.2010).
- [41] *The ultimate guide to the LHC*.
URL: <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/Facts-en.html> (besucht am 01.02.2010).
- [42] *The Worldwide LHC Computing Grid*.
URL: <http://lcg.web.cern.ch/LCG/public/overview.htm> (besucht am 04.02.2010).
- [43] K Yamamoto. „Newly developed semiconductor detectors by Hamamatsu“. In: *PoS PD07.004* (2007).
URL: http://pos.sissa.it/archive/conferences/051/004/PD07_004.pdf
- [44] M. Yokoyama u. a. „Mass production test of Hamamatsu MPPC for T2K neutrino oscillation experiment“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 610.1 (2009). New Developments In Photodetection NDIP08, Proceedings of the Fifth International Conference on New Developments in Photodetection, S. 362–365. ISSN: 0168-9002.
DOI: 10.1016/j.nima.2009.05.107
- [45] *Zero Up Programmable Power Supply ZUP10-20*. TDK-Lambda.
URL: <http://www.lamdapower.com/ftp/Specs/zup.pdf> (besucht am 18.02.2010).

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Aachen, den 20. Februar 2010

(Jörg Rennefeld)