

Untersuchung von Aufladungseffekten und Überschlagsfähigkeit von GridPix-Detektoren

Chris Michael Staude

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

August 2016

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt hierbei Prof. Klaus Desch dafür, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, in seiner Arbeitsgruppe die Bachelorarbeit zu verfassen. Weiterhin möchte ich Dr. Jochen Kaminski für seine ausgiebige Betreuung und der gesamten Arbeitsgruppe für die stets freundliche und kooperative Atmosphäre danken. Nicht zuletzt möchte ich mich bei Johann Tomtschak bedanken, der mir bei jedem Problem, zu jedem Zeitpunkt stets seine kompetente Hilfe angeboten hat.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn,

Datum

.....

Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch
2. Gutachter: Dr. Jochen Kaminski

*Ich widme diese Arbeit in Liebe und Dankbarkeit meinen Eltern,
die mir während meiner gesamten Studienzeit nicht nur finanziell,
sondern mit viel Geduld zur Seite gestanden haben.*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Die Zeitprojektionskammer (TPC)	2
2.2 Mikrostrukturierter Gasdetektor (MPGD)	4
2.2.1 Micromegas-Teilchendetektoren	4
2.2.2 Entladungen in Micromegas-Teilchendetektoren	5
2.3 Der Timepix-ASIC	6
2.4 Si _x N _y - Schutzschicht auf dem Timepix-ASIC	7
2.5 GridPix	8
3 Vorbereitung der Messung	9
3.1 Untersuchung der Wafer-Nummer und Berechnung der aktiven Pixelfläche	9
3.2 Kalibration des Strommonitors CUMO	11
3.3 Vorbereitung der Timepix-ASICs und Herausforderungen	12
4 Messungen	13
4.1 Reduktion von Temperaturfluktuationen, verursacht durch die Klimaanlage	13
4.2 Konfiguration der Messung	15
4.3 Timepix-ASIC D5-W0056, IZM-3	15
4.3.1 Stromverhalten im Niederspannungsbereich	15
4.3.2 Stromverhalten im Hochspannungsbereich	17
4.4 Timepix-ASIC E11-W0058, IZM-4	18
4.4.1 Stromverhalten im Niederspannungsbereich	18
4.4.2 Stromverhalten im Hochspannungsbereich	18
4.5 Timepix-ASIC K10-W0063, IZM-5	20
4.5.1 Stromverhalten im Niederspannungsbereich	20
4.5.2 Stromverhalten im Hochspannungsbereich	22
4.6 Timepix-ASIC K10-W0011, IZM-1	22
5 Zusammenfassung und Ausblick	24
Abbildungsverzeichnis	27
Tabellenverzeichnis	28

Kapitel 1

Einleitung

Bereits in der Frühzeit der Menschheitsgeschichte ist der Mensch von Himmelsbeobachtungen und der eigentlichen Frage nach seiner Existenz fasziniert. Berühmte Persönlichkeiten, wie z.B. Galileo Galilei oder Johannes Kepler, beschäftigen sich mit optischen Beobachtungsinstrumenten, um in immer tiefere Strukturen des Universums vorzudringen. Heute weiß man, dass der tiefste Einblick eine Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung erfordert. Erst nach 380 000 Jahren hat sich das Universum soweit abgekühlt, dass sich Protonen und Elektronen zu Wasserstoff-Atomen rekombinieren [1]. Dies hat eine Beobachtung der Hintergrundstrahlung möglich gemacht.

Die Beobachtung von Strahlung erfordert jedoch den Einsatz hochauflösender Röntgen-Detektoren. Im Jahr 1896 legt Antoine Henri Becquerel als erster mit der Entdeckung der Radioaktivität eine Grundlage für die Kern- und Teilchenphysik [2]. Für die Entdeckung verwendet Becquerel Kalium-Uraniylsulfat. Dieses hat er, eingewickelt in schwarzem Papier, auf photographische Platten gelegt, welche ihm zum Nachweis der korpuskularen Strahlung dienen. Über photolytische Prozesse ist ein Abbild des uranhaltigen Kristalls durch Schwärzung der Platten zu erkennen und somit die Radioaktivität gefunden.

H. Geiger entwickelt im Jahr 1908 ein Zählrohr, welches auf dem Prinzip der Gasverstärkung der Ionisationsladung in starken elektrischen Feldern basiert, mit dem Ziel, ein Messgerät zur elektrischen Registrierung einzelner Teilchen zu entwickeln [3]. Heute versucht man, primäre Elektronen auf einem einzelnen Pixel zu detektieren und somit ungeklärten Fragen, wie z.B. die nach der dunklen Materie, der dunklen Energie oder der eigentlichen Frage „Was die Welt im Innersten zusammenhält“ auf die Spur zu kommen [4].

Das CAST-Experiment am Cern in der Schweiz geht genau dieser Frage auf den Grund und benötigt nun die Entwicklung- und Weiterentwicklung neuartiger Detektoren. So kann es möglich sein, ein hypothetisches Teilchen, z.B. das in der Quantenchromodynamik zur Lösung der CP-Verletzung postulierte Axion, zu finden, um eine Antwort auf die Frage zu bekommen.

Axionen werden in der Sonne emittiert. Sie durchlaufen beim Durchdringen von CAST ein starkes Magnetfeld und werden in Röntgenphotonen konvertiert. Diese können dann mit hochauflösenden Grid-Pix als Ausleseeinheit sichtbar gemacht werden. Bei genügend großer Energie erzeugt Strahlung lokal Überschläge in der Ausleseebene des Detektors. Ähnlich dem Verhalten der Überschlagsfähigkeit von GridPix soll auch das Verhalten bei minimaler Energie im Rahmen dieser Bachelorarbeit erforscht werden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Der Nachweis geladener Teilchen basiert auf elektromagnetischer Wechselwirkung von Teilchen mit Materie. Es existieren hierbei drei unterschiedliche Arten, wie geladene Teilchen mit Materie wechselwirken können.

Durchquert ein geladenes Teilchen ein Material, so können drei Arten von Wechselwirkungen stattfinden: Ionisation von Atomen entlang einer Trajektorie, Emission von Cherenkov-Strahlung oder das Auftreten von Übergangs- bzw. Bremsstrahlung [5]. Die Übergangsstrahlung tritt genau dann auf, wenn das Teilchen zwei Materialien unterschiedlicher Dielektrizitätskonstanten passiert. Bremsstrahlung hingegen tritt auf, wenn hochenergetische, geladene Teilchen durch ein externes Feld abgelenkt werden [6]. Die durch die elektromagnetische Wechselwirkung erzeugten Signale werden dann von einem sensitiven Teilchendetektor ausgelesen und verarbeitet.

In diesem Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen erklärt, die für das Verständnis dieser Bachelorarbeit erforderlich sind.

2.1 Die Zeitprojektionskammer (TPC)

Die Evidenz neuer subatomarer Teilchen erfordert als Grundlage die Entwicklung neuartiger Detektoren. In Zukunftprojekten wie z.B. dem ILD (engl. International Linear Detector) sollen Wechselwirkungsprozesse hochenergetischer Teilchen untersucht werden, um Informationen über die Lokalisation der Teilchenspuren, die Driftgeschwindigkeit und den Energieverlust bei der Ionisation mit dem Gasgemisch geladener Teilchen zu erhalten [7]. Gasdetektoren bieten hierbei die Möglichkeit, die Ionisationsspur der einfallenden Teilchen sehr genau zu vermessen.

David R. Nygren hat im Jahr 1976 die Zeitprojektionskammer TPC (engl: Time Projection Chamber) entwickelt, welche aus einem zylindrischen Gasdetektor zur Rekonstruktion der Teilchenspuren besteht. Ihre erste Anwendung hat die TPC im PEP-4-Experiment am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) gefunden [8].

Prinzipiell besteht die TPC z.B. aus einer zentralen Kathode und zwei zueinander parallelen Anoden (siehe Abbildung 2.1). Diese sind an ihren Endkappen entlang der z-Achse orientiert [9]. Der Aufbau ist auch ohne die zweite Anode möglich, liefert jedoch aufgrund der verlängerten Driftgeschwindigkeit eine verschlechterte Ortsauflösung. Die zentrale Kathode trennt die TPC in zwei Driftbereiche. An den Endkappen der TPC wird eine segmentierte Anode mit Gasverstärkung benötigt. Neben der konventionellen Variante der Vieldraht-Proportionalitätskammern können auch GEMs (engl. Gas Electron Multiplier) oder GridPix verwendet werden.

Der Eintritt geladener Teilchen bewirkt durch eine Ionisation mit den Gasmolekülen eine Separation einiger Gasmoleküle in Elektronen und Ionen. Die freien Elektronen wandern unter Einwirkung eines homogenen elektrischen Feldes zu einer der beiden Anodenplatten. Simultan werden Ionen erzeugt und bewegen sich in Richtung der zentralen Kathode. Während das Elektron zur Anode wandert, kommt es zum Zusammenstoß mit weiteren Gasmolekülen.

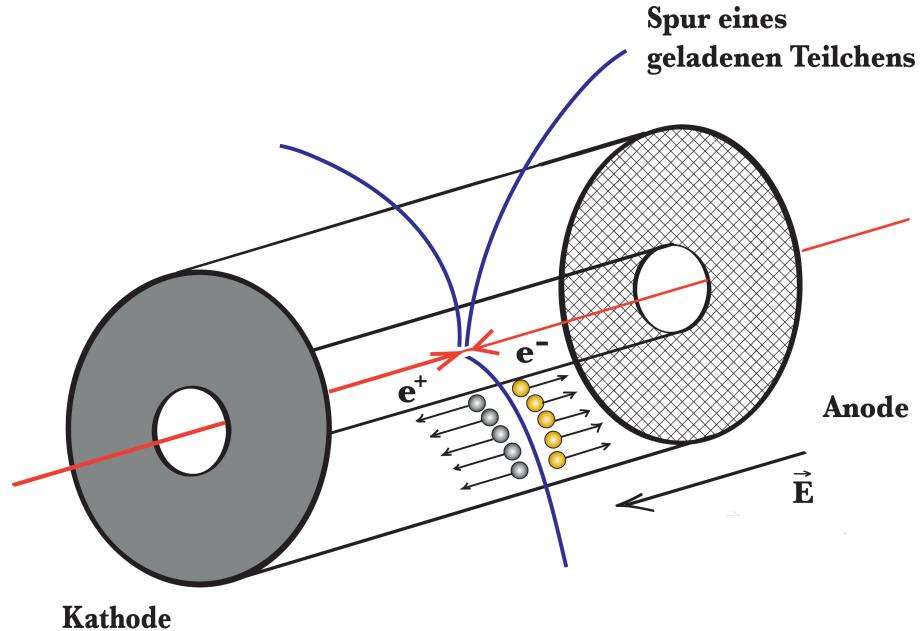


Abbildung 2.1: Aufbau und Funktionsweise einer Zeitprojektionskammer, bestehend aus einer Kathode und hier nur einer der zueinander parallelen Anoden: Gezeigt wird die Ionisation des Gases durch ein geladenes Teilchen

An der Anode kommt es zu einer Verstärkung der ankommenden Elektronen, die beim Auftreffen auf die Anode folglich die x - y -Position eindeutig zuordnen und auf der Auslesefläche ein zweidimensionales Bild erzeugen. Durch Messung der Driftgeschwindigkeit ist es möglich, die Teilchen in ihrer z -Koordinate zu lokalisieren, um eine vollständige dreidimensionale Spuren-Rekonstruktion zu erhalten. Ein zum elektrischen Feld parallel orientiertes, magnetisches Feld bewirkt eine auf die geladenen Teilchen ausgeübte Lorentzkraft. Dies hat zur Folge, dass die Teilchen auf eine Kreisbahn gezwungen werden und der vermessene Krümmungsradius den Impuls eindeutig bestimmt [5].

Bei der Ausleseeinheit der TPC befinden sich auf einer Kathode segmentierte Pads, welche die induzierte Elektronenlawine in ein Signal verarbeiten [9]. Im Vergleich zu anderen Auslesesystemen stellt der GridPix-Detektor einen geeigneten Kandidaten dar, da er aufgrund einer zusätzlich angebrachten Mikrostruktur eine verbesserte Ortsauflösung gewährleistet.

2.2 Mikrostrukturierter Gasdetektor (MPGD)

An den Endkappen einer Zeitprojektionskammer wird das Signal primärer Elektronen verstärkt. Der Einsatz von Vieldraht-Proportionalkammern bringt einige Einschränkungen. Aufgrund der Ausrichtung der Drähte in eine definierte Richtung kann es zu einer Anisotropie kommen [10]. Da die Abstände der Drähte nur einige Millimeter betragen, ist die Ortsauflösung begrenzt. Das starke elektrische Feld, welches sich in der Nähe der Drähte befindet, verläuft nicht parallel zu dem magnetischen Feld. Dies führt zu Verzerrungen der Spurbildung durch $(\mathcal{E} \times \mathcal{B})$ -Effekte (ebd.), welche durch Anwendung von mikrostrukturierten Gasdetektoren (engl: Micropattern Gaseous Detectors) verminder werden können. Die Vorteile sind hierbei die zweidimensionale Gasverstärkungsstruktur und die hohe Ortsauflösung [11]. Beispiele für MPGDs sind Micromegas- oder GEM-Teilchendetektoren. Dabei wird lediglich auf die erstgenannten eingegangen, da sie für die hier untersuchten GridPix-Detektoren von Interesse sind.

2.2.1 Micromegas-Teilchendetektoren

Bei Micromegas-Teilchendetektoren (engl. MICRO-MEsh GAseous Structure) handelt es sich um planare Gasdetektoren, deren Ionisationsbereich und der Bereich, in dem die Gasverstärkung auftritt, durch ein mikrostrukturiertes Gitter getrennt sind [12]. Der Ionisationsbereich besitzt eine variable Ausdehnung mit bis zu 2,5 m, während der Bereich der Gasverstärkung typischerweise 100 μm umfasst (ebd.). Als Detektorgas werden häufig Ar-haltige Gasmischungen mit einem Quenscher (z.B. Isobutan) verwendet [3]. Der Aufbau eines Micromegas-Teilchendetektors kann der Abbildung 2.2 entnommen werden.

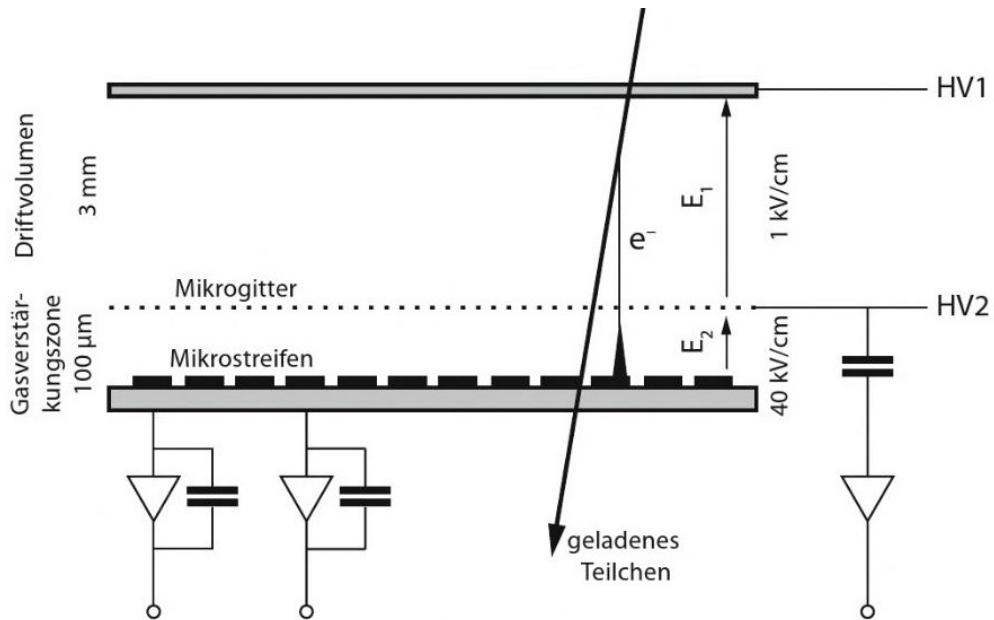


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Micromegas-Teilchendetektors: Das Microgitter (engl. micro-mesh) teilt das Detektorvolumen in den Drift- und in den Verstärkungsbereich. Im Verstärkungsbereich werden die Elektronen vervielfacht und an den Anodenstreifen detektiert [3]

Die in dem Ionisationsbereich erzeugten Elektronen driften aufgrund eines angelegten elektrischen Feldes durch das Gitter in den Gasverstärkungsbereich. Dort wird ein zusätzliches elektrisches Feld von über 100 kV cm^{-1} angelegt (ebd.). Hier erhalten die Elektronen durch das erhöhte elektrische Feld zusätzliche kinetische Energie. Dabei stoßen die Elektronen auf Atome und Moleküle im Detektorgas und ionisieren diese. Dadurch wird die Elektronenzahl exponentiell erhöht. Die daraus resultierende Elektronenlawine erreicht die Anode und wird von der Elektronik ausgelesen [13]. Die Anode besteht aus photolithographisch erzeugten Streifen, deren Struktur eine Ortskodierung der Teilchen definiert (ebd.).

2.2.2 Entladungen in Micromegas-Teilchendetektoren

Bei Anlegen höherer Spannungen an Micromegas-Teilchendetektoren wird der multiplikative, durch Ionisation von Gasmolekülen induzierte Prozess der Elektronenvervielfachung bedeutungsvoller. Da die Geschwindigkeit der Elektronen zwei Größenordnungen größer ist als die der Ionen, verbleiben die Ionen in ihrer ursprünglichen Position im Lawinenbildungsprozess zurück und können als stationär angesehen werden [14]. Die Diffusion der Elektronen bildet eine tropfenförmige Gestalt.

Elektronen in der kugelförmigen Frontseite folgen träge Ionen im hinteren Teil auf dem Weg zur Anode (ebd.). Zwischen den gegensätzlichen Ladungen bildet sich ein elektrisches Feld, welches dem äußeren elektrischen Feld entgegengerichtet ist. Im dazwischen liegenden neutralen Bereich führt die Rekombination von Elektronen und Ionen zur Emission von Photonen (ebd.). Diese Photonen bewirken, bedingt durch die Photoionisation, die Bildung weiterer einzelner Lawinen, welche mit der Hauptlawine verschmelzen und zur Erzeugung einer filamentartigen Struktur beitragen [15]. Diese wird auch als Streamer bezeichnet.

Sobald der Streamer die Anode erreicht, wird ein Kurzschluss induziert und die Entladung eingeleitet. Der Zusammenhang ist in Abbildung 2.3 noch einmal verdeutlicht.

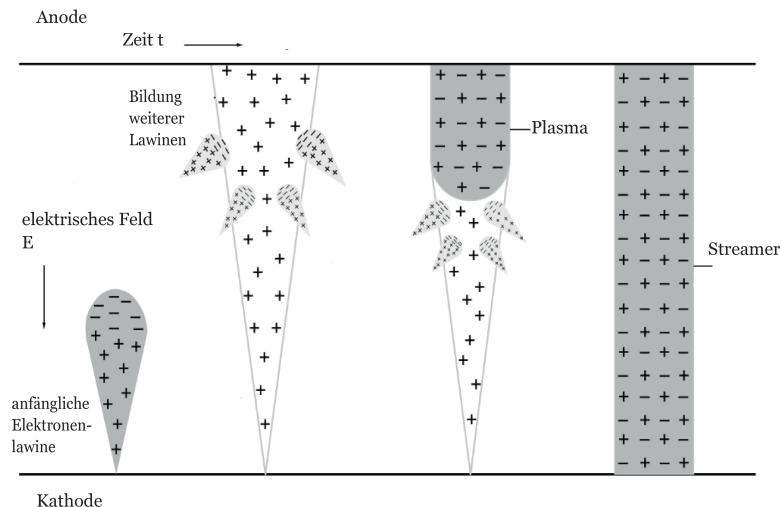


Abbildung 2.3: Bildung eines Streamers, hervorgerufen durch den multiplikativen Prozess der Elektronenvervielfachung [14]

Die Ausbildung eines Streamers und die Entladung als Folgeerscheinung tritt auf, wenn die induzierte

Anzahl der Elektronen eine sogenannte Raether-Grenze überschreitet [16]. Diese Grenze liegt bei

$$Q_{krit.} = A_{max} \cdot n_0 \propto 10^8 \text{ Elektronen.}$$

Hierbei bezeichnet A_{max} die maximal zu erreichende Gasverstärkung und n_0 die Anzahl der primären Elektronen [16]. Die Entladung hat destruktive Auswirkungen auf die Ausleseelektronik und kann durch die entstehenden hohen Ströme lokal die Materialien, z.B. des im Abschnitt 2.3 beschriebenen Timepix-ASIC, zerstören [14]. Um die Funkenbildung zu reduzieren, wird deshalb eine Seite der Elektrode mit einer resistiven Schutzschicht überzogen.

2.3 Der Timepix-ASIC

Bei dem Timepix-ASIC handelt es sich um einen aus der MediPix-Kollaboration stammenden Pixelchip [17]. Auf Initiative der EUDET-Kollaboration wird das Design des zuvor entwickelten Medipix2 aufgegriffen und zum Timepix-ASIC weiter entwickelt (ebd.). Der Timepix-ASIC hat eine Auflösung von 256×256 Pixel mit einem Pixelabstand von $55 \mu\text{m}$.

Der Medipix2 besitzt einen 14-Bit-Zähler je Pixel, welcher ursprünglich der Photonenzählung in Röntgenaufnahmen dienen soll [18]. Der Timepix-ASIC nutzt die 14-Bit-Zähler nicht nur, um die Ereignisse zu zählen, sondern auch, um die Taktimpulse, die den Chip erreichen, zu messen (ebd.). Die Weiterentwicklung inkludiert also im Vergleich zum Medipix2 zwei zusätzliche Modi zur Messung von Ladung und Zeit [9].

Der erste Modus, der sogenannte **Medipix-Modus** (engl. Medipix mode), zählt lediglich einzelne Röntgenquanten, welche auf den Pixel treffen. Dieser Modus stellt jedoch für den Timepix-ASIC keine Neuerung im Vergleich zum Medipix2 dar.

Des Weiteren kann der Timepix-ASIC im **TOT-Modus** (engl. Time-over-Threshold-Mode) betrieben werden. Hierbei wird solange die Anzahl der Taktsignale gezählt, wie der Spannungspuls oberhalb der Schwellspannung liegt (ebd.). Dieser Vorgang wird abrupt unterbrochen, wenn der Spannungspuls unter diese Schwelle fällt. Es kann somit die Energie, die jeden einzelnen Pixel erreicht, ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 2.4 verdeutlicht.

Ein weiterer Modus ist der **ToA-Modus** (engl. Time of Arrival Modus). Sobald das Signal die Spannungsschwelle passiert, werden Taktsignale solange ausgegeben, bis ein Shutterende dieses Ereignis beendet. Dieser Modus bestimmt also über ein Zeitsignal die Ankunftszeit. Das Prinzip ist noch einmal in der Abbildung 2.5 gezeigt. Zusätzlich besitzt der Timepix-ASIC die Möglichkeit, Ladungen beliebiger Polarität zu vermessen.

Es wird nun kurz auf die im Timepix-ASIC zur Detektion verbaute Elektronik eingegangen. Die verteilte Ladung auf der Pixelmatrix wird zunächst mit einem Vorverstärker verstärkt und erzeugt einen zur eingegangenen Ladungsmenge proportionalen Spannungsimpuls [19]. Dieses Spannungssignal gelangt zu einem Diskriminator und gibt, sofern die Eingangsspannung einen gewissen Spannungsschwellenwert überschritten hat, ein digitales Signal aus. Die Länge der digitalen Rechtecksignale ist durch die Länge des Intervalls gegeben, bei dem sich das Signal oberhalb der Schwelle befindet.

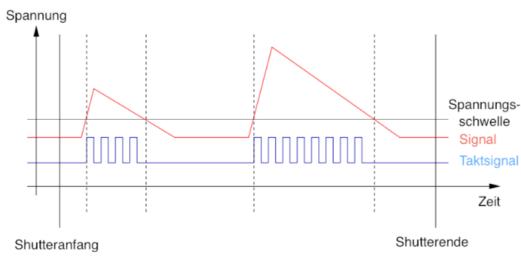


Abbildung 2.4: Prinzip des TOT-Modus [18]:
Taktsignale werden gezählt, sobald ein Signal
oberhalb der Spannungsschwelle liegt

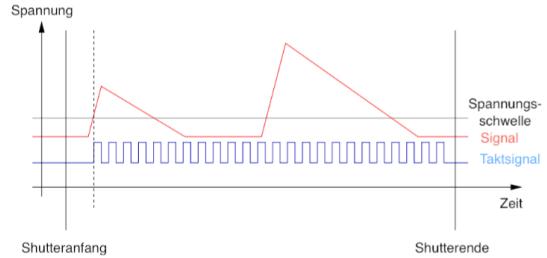


Abbildung 2.5: Prinzip des ToA-Modus [18]:
Taktsignale werden von Shutteranfang
bis Shutterende gezählt

2.4 Si_xN_y - Schutzschicht auf dem Timepix-ASIC

Um die auf dem Timepix-ASIC befindlichen Pixel vor Entladungen zu schützen, wird eine Siliziumnitridschicht aufgetragen, welche eine Dicke von $4 \mu\text{m} - 8 \mu\text{m}$ aufweist und den Pixelchip vor Überschlägen schützt [20]. Die Bezeichnung der Schutzschicht als Siliziumnitridschicht ist im Grunde ungünstig formuliert, da es sich hierbei um keine Si_3N_4 -Schicht handelt, sondern um Si_xN_y , eine siliziumhaltige Verbindung. Sie dient als Isolatormaterial, um die Oberfläche der Timepix-ASIC zu schützen [21].

Das Material wird mit dem Verfahren der Plasma-unterstützten Gasphasenabscheidung bei einer Temperatur von 300°C auf die Oberfläche des Timepix-ASIC gedampft (ebd.). Die Hinzugabe von Stickstoff verändert das stöchiometrische Verhältnis und wandelt das Material in extrem widerstandsfähiges Nitrid um (ebd.). Es wird also eine Siliziumnitridschicht mit einem spezifischen Widerstand von $10^{10} \Omega \text{ cm}$ bis $10^{11} \Omega \text{ cm}$ gebildet.

Ein Querschnitt einer auf dem Timepix-ASIC aufgebrachten Si_xN_y -Schicht ist auf Abbildung 2.6 zu sehen.

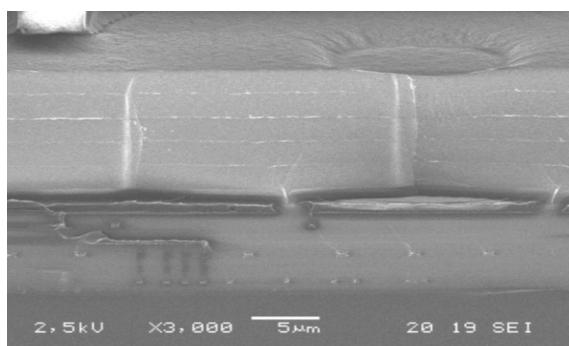


Abbildung 2.6: Querschnitt der Si_xN_y -Schutzschicht
auf der Oberfläche des Timepix-ASIC [21]

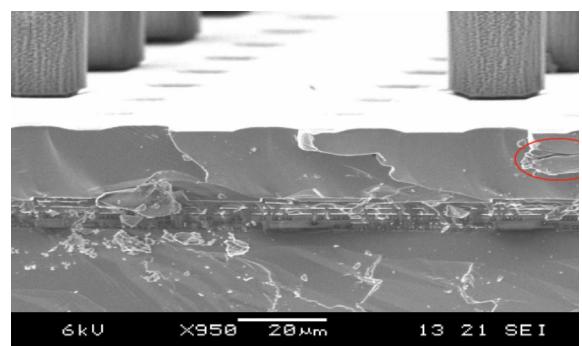


Abbildung 2.7: Risse in der Si_xN_y -Schutzschicht auf
der Oberfläche des Timepix-ASIC, entstanden durch
Hochspannungen [22]

Bei der Herstellung einer $4 \mu\text{m}$ dicken Schutzschicht verbleibt zwischen dem Auftragen neuer Schichten eine gewisse Zeitspanne Δt . In ihr bildet sich aufgrund der Oxidation eine Si_xO_y -Schicht. Eine weitere

2 μm -Schicht wird nun auf dieser entstandenen Si_xO_y -Schicht aufgetragen. Bei Betrachtung der einzelnen Schichten im Querschnitt (vgl. Abbildung 2.7) sind Risse erkennbar. Die entstandenen Risse auf der Schutzschicht können auf die Ausbildung der Oxidationsschicht zurückgeführt werden. In der Abbildung 2.8 sind die einzelnen Schichten verdeutlicht. Die Siliziumoxidschicht liegt hierbei zwischen den Siliziumnitridschichten.

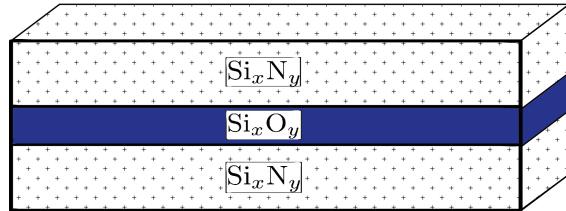


Abbildung 2.8: Auftragung der Schutzschicht mit dazwischenliegender Si_xO_y -Schicht

2.5 GridPix

Bei GridPix handelt es sich um Timepix-ASICs mit integrierter Gasverstärkungsstruktur InGrid (engl. Integrated Grid). Die Gasverstärkungsstruktur wird über einen photolithographischen Nachbearbeitungsprozess direkt auf den Chip aufgebracht [23] und wird so angepasst, dass die Löcher des Gitters über jedem einzelnen Pixel lokalisiert sind. Dies bewirkt eine Gasverstärkung über jedem einzelnen Pixel. Die Ausrichtung des Gitters lässt zu, dass jedes primäre Elektron auf einem Pixel detektiert wird. Wie alle Gasdetektoren ist auch der GridPix von unvermeidbaren Entladungen betroffen, welche durch Potentialdifferenzen verursacht werden [20]. Der Einsatz von GridPix ist nicht nur wegen der hohen Energieauflösung von besonderem Interesse, sondern bietet Vorteile, wie z.B. die hohen Nachweiswahrscheinlichkeit oder die präzise Orts- und Winkelauflösung.

Kapitel 3

Vorbereitung der Messung

Im dritten Kapitel sollen nun die Vorbereitungen für die eigentlichen Messungen der Schutzschicht beschrieben werden. Zur Bestimmung des Flächenwiderstandes der Schutzschicht, wird die Messung an Gridpix mit entferntem Grid, sogenannten Timepix-ASICs, durchgeführt. Auf der Schutzschicht wird eine elektrisch leitende Goldbeschichtung aufgedampft, um den Flächenwiderstand der Schutzschicht bei Anwendung verschiedener Spannungen und letztendlich das Verhalten der Schutzschicht zu untersuchen. Des Weiteren sind alle Ein- und Ausgangspads der Timepix-ASICs an die Masse (engl. GND) angeschlossen. Dies erlaubt, den Chip als reinen Widerstand zu vermessen und Eigenschaften über die Schutzschicht zu untersuchen.

Zu Beginn werden die verwendeten Timepix-ASICs namentlich erwähnt, ihren Produktionsserien zugeordnet und die Goldoberfläche für jeden Chip individuell bestimmt. Anschließend wird ein hochempfindlicher Strommonitor kalibriert.

Die Untersuchung des Widerstandes geschieht über das Anlegen einer Spannung auf der Goldfläche. Dies wird durch Anbringen eines leitenden Drahtes mit Hilfe von Silberleitkleber auf der Goldoberfläche realisiert. Die bei der Befestigung entstehenden Probleme und deren Optimierung werden in diesem Abschnitt kurz diskutiert. Zur Reduktion von äußeren Umwelteinflüssen werden die Timepix-ASICs in einer mit Stickstoff gefüllten Box geschützt. Damit ist die finale Experimentieranordnung für die eigentliche Messung abgeschlossen.

3.1 Untersuchung der Wafer-Nummer und Berechnung der aktiven Pixelfläche

Die Produktion der ersten integrierten Gasverstärkungsstruktur ist an der Universität Twente im Jahr 2007 realisiert worden [24]. Da die Herstellung lediglich auf 4"-Timepix-Wafern möglich gewesen ist und erhöhtes Interesse an einem 8"-Timepix-Wafer bestanden hat, wird die Produktion 2011 zum Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) in Berlin verlagert (ebd.). Am IZM sind die Produktionsserien IZM-N entstanden, die mit der IZM-1 Serie begonnen haben (ebd.).

Die hier verwendeten Timepix-ASICs entstammen unterschiedlichen Produktionsserien und werden folglich ihrem Typ und ihrer Wafer-Identifikations-Nummer zugeordnet. Letztere lässt sich durch Auswertung des 24-Bit-Registers unter einem Mikroskop zuordnen. Einige sind aufgrund von Verschmutzungen auf dem Register zuerst nicht auslesbar. Das ist dann dann mit einem Ultraschallreiniger behebbar. Die hier erhaltenen Resultate sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Nº	Typ	Wafer	A in [cm^2]	ΔA in [cm^2]
1	D5	W0056 (IZM-3)	0.5053	0.0144
2	E11	W0058 (IZM-4)	0.5976	0.0170
3	K10	W0063 (IZM-5)	0.5093	0.0145
4	K10	W0011 (IZM1)	0.5044	0.0143

Tabelle 3.1: Auflistung der verwendeten Timepix-ASICs, gekennzeichnet mit Typ, Wafer-Nummer und aktiver Pixelfläche A

Für die Analyse der Messungen ist es notwendig, die Goldfläche für jeden Timepix-ASIC individuell zu ermitteln. Dabei wird die Fläche an eine Ellipse mit den Halbachsen a und b angenähert und anhand des $(55 \pm 1) \mu\text{m}$ -Abstandes eines Pixels die Gesamtfläche aller aktiven Pixel berechnet. In Abbildung 3.1 ist ein Kreissegment der aktiven Fläche veranschaulicht. Um die Berechnung zu optimieren, werden Pixel unberücksichtigt gelassen, welche am Rand der Ellipse liegen und sich nur zur Hälfte in der aktiven Fläche befinden. Denn solche Pixel liefern keinen Beitrag für die Messungen.

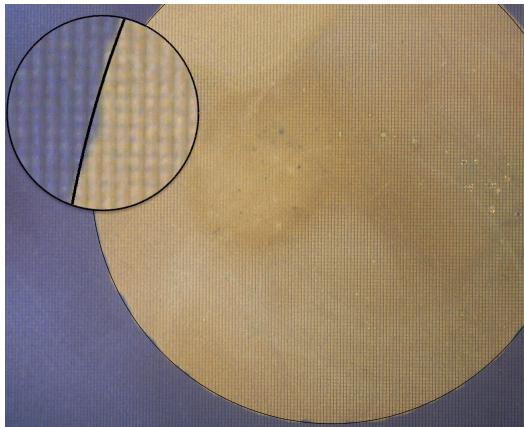


Abbildung 3.1: Aktive Pixelfläche eines Timepix-ASIC: Zu erkennen ist die mit Gold bedampfte Pixelfläche. Zudem ist eine Vergrößerung eines Kreissegmentes verdeutlicht, welches die Genauigkeit der Ellipsenanpassung zeigt



Abbildung 3.2: Kalibrationsaufbau:
Gezeigt ist der Strommonitor mit USB-Anschluss und Präzisions- μA -Meter (SMU)

Die Resultate mit entsprechendem Fehler, welcher mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung errechnet worden ist, sind ebenfalls in Tabelle 3.1 zu finden. Die Berechnung der aktiven Pixelfläche wird später benötigt. Sie ist die Grundlage für die Flächenwiderstandsberechnung der Schutzschicht für die einzelnen Timepix-ASICs.

3.2 Kalibration des Strommonitors CUMO

Um eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, sind die Messgeräte zur Strom- und Spannungsmessung zu kalibrieren. In dieser Arbeit wird als Messgerät ein hochempfindlicher Strommonitor CUMO (engl. Current Monitor) aus der vierten Version verwendet, welcher über eine USB-Schnittstelle mit einem Rechner verbunden werden kann und vorerst eine Kalibration für die anschließende Strommessung der Chips erfordert.

Im Inneren verfügt der CUMO über einen ADC (Analog-to-Digital-Converter). Jedem ADC-Wert wird ein Stromwert in dem voreingestellten Messbereich zugeordnet [25]. Der Vorverstärker, bestehend aus zwei Operationsverstärkern, sorgt im Inneren dafür, dass der Strom in eine Spannung umgewandelt und entsprechend verstärkt wird (ebd.).

Zur Kalibration wird ein präzises, von der Firma Keithley produziertes SMU-Gerät (engl. Source Measure Unit) angeschlossen, welches sowohl als Spannungs- als auch als Strommessgerät dient und aufgrund des Messbereiches im μA -Bereich den Einsatz validiert. Die Kalibration erfolgt dadurch, dass aus einer hohen Anzahl von Messwerten ein gemittelter ADC-Wert gebildet und mit den zugehörigen Stromwerten in μA -Bereich in eine zu erstellende Kalibrationsdatei eingetragen wird (ebd.). Der Vorteil des hier verwendeten Strommonitors liegt in der Einstellmöglichkeit verschiedener Messbereiche (engl. Ranges). Dabei werden die folgenden sechs Stromintervalle realisiert:

Range	Stromintervalle
0	-2 nA bis 2 nA
1	-20 nA bis 20 nA
2	-200 nA bis 200 nA
3	-2 μA bis 2 μA
4	-20 μA bis 20 μA
5	-200 μA bis 200 μA

Tabelle 3.2: Messbereiche des CUMO-Strommonitors

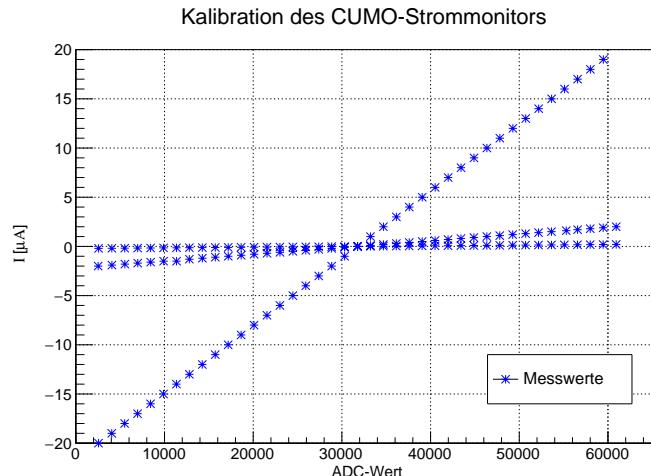


Abbildung 3.3: Kalibration des aus der vierten Produktionsserie stammenden Strommonitors. Aufgetragen sind die Stromwerte gegen die ADC-Werte für die Range 2, 3 und 4

Als Steuerprogramm dient ein C++ Quelltext, mit dessen Hilfe einzelne Ranges und die Anzahl der Messwerte verändert werden können. Eine Range wird dabei jeweils in ein Stromintervall untergliedert und dann vermessen. In der Abbildung 3.3 sind die Resultate der Kalibration zu betrachten. Dabei sind aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich drei der sechs Ranges dargestellt worden. Die so angelegte Kalibrationsdatei kommuniziert folglich mit dem CUMO und dient deshalb als Grundlage für alle weiterführenden Präzisionsmessungen. Der geschilderte Kalibrationsaufbau ist in der Abbildung 3.2 dargestellt.

3.3 Vorbereitung der Timepix-ASICs und Herausforderungen

Um die Aufladungseffekte und Überschlagsfestigkeit der Schutzschicht von Timepix-ASICs zu untersuchen, müssen die Timepix-ASICs entsprechend für die Messung vorbereitet werden. Dazu gilt es, mittels eines Silberdrahtes eine Spannung auf die mit Gold bedampfte Oberfläche anzulegen. Da Löten zur Zerstörung der Pixel führen würde, ist ein Zwei-Komponenten-Silberleitkleber des Typs E-Solder 3025 A+B zum Auftragen verwendet worden. Es werden kleine Mengen angerührt, welche mit Isopropanol verdünnt und anschließend auf die Oberfläche aufgetragen werden.

Folglich wird der Silberdraht an dem Silberleitkleber befestigt und das andere Ende des Drahtes mit dem SHV-Stecker verlötet. Aus Stabilitätsgründen wird zusätzlich der Standfuß des SHV-Steckers auf das Carrierboard des Chips gelötet. Mit dieser Installation sind vier Timepix-ASICs (siehe Tabelle 3.1) für die Messungen vorbereitet worden. Ein solcher präparierter Chip ist in der Abbildung 3.4 zu sehen.



Abbildung 3.4: Befestigung des Drahtes mit der Oberfläche des Timepix-ASIC und Verlöten des Drahtes mit dem SHV-Stecker

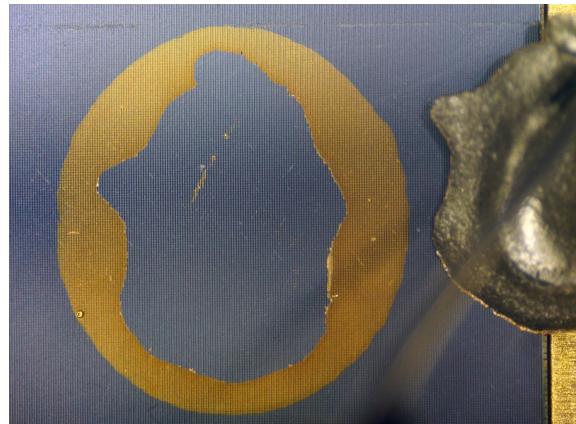


Abbildung 3.5: Ablösen der Goldoberfläche beim Lötvorgang, verursacht durch Scherspannungseffekte

Beim Löten an dem mit Silberleitkleber befestigten Draht sind Schwierigkeiten aufgetreten. Minimale Bewegungen am Draht führen zu Scherspannungseffekten, welche den Silberdraht mit dem auf der Goldoberfläche befindlichen Silberleitkleber lösen. Dieser Effekt ist mit einem dünneren Silberdraht behoben worden, welcher diese Effekte reduziert und somit einen erfolgreichen Lötvorgang möglich macht. Die erfolgreich verlötenen Chips werden mit ihrer Unterseite in der mit Stickstoff gefüllten Kupferbox mittels eines Befestigungsklebers fixiert. Beim Befestigen ist es zu einem Kontakt zwischen Silberdraht und der Wand der Kupferbox gekommen, welcher ebenfalls die Verbindung zwischen Silberdraht und Goldoberfläche gelöst hat. Auch dieser Chip kann für eine Messung nicht mehr verwendet werden.

Beim Lötvorgang eines Timepix-ASIC hat sich sogar die Pixelfläche komplett vom Carrierboard gelöst. Diese ist dann lediglich noch an den Wirebonds befestigt gewesen. Auch dieser Chip ist für eine weitere Messung nicht zu verwenden. Das Ablösen der Goldschicht ist für einen Chip in der Abbildung 3.5 verdeutlicht.

Die verbleibenden vier Timepix-ASICs sind für die Spannungsmessung einzeln in der mit Stickstoff gefüllten und mit Styropor verkleideten Kupferbox befestigt worden. Die Kupferbox dient ausschließlich der Reduktion äußerer Umwelteinflüsse. Der Stickstoff dient dem Trockenhalten der Silbernitridschicht.

Kapitel 4

Messungen

Nachdem die Timepix-ASICs mit dem Strommonitor und der Spannungsquelle verbunden worden sind, werden diese in der mit Stickstoff gefüllten Box befestigt und sind nun bereit für die Messung.

Für eine genaue Analyse ist es unerlässlich, den Einfluss verschiedener, sich auf die Messung auswirkender Faktoren zu berücksichtigen. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels soll auf die Temperaturabhängigkeit der Messung eingegangen werden. Hierbei gilt es, den Verlauf der Stromwerte in Abhängigkeit von der Labortemperatur zu untersuchen und eine entsprechende Anpassung der Messwerte vorzunehmen. Im Anschluss daran werden die Messungen durchgeführt.

Die Untersuchung des Verhaltens der Schutzschicht erfordert Messungen mit verschiedenen Konfigurationen. Dabei wird zuerst der Niederspannungsbereich und anschließend der Hochspannungsbereich jedes Timepix-ASICs vermessen. Aus den Messwerten des Niederspannungsbereichs werden die Flächenwiderstände berechnet. Deren Größe gibt Aufschluss über die elektrische Durchbruchfestigkeit der Schutzschicht. Mit Hilfe einer angelegten Hochspannung kann dann der Spannungswert errechnet werden, bei dem ein irreversibler Durchbruch der Schutzschicht entstanden ist.

Nach der Zusammenfassung der Messergebnisse wird das Ergebnis kurz diskutiert.

4.1 Reduktion von Temperaturfluktuationen, verursacht durch die Klimaanlage

Für Präzisionsmessungen ist es wichtig, eine von der Temperatur unabhängige Messung durchzuführen. Die Raumtemperatur im Labor wird über eine Klimaanlage auf einen konstanten Wert von $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ gehalten. Bei der Ansteuerung des Temperaturwertes führt die Klimaanlage oszillierende Feinabstimmungen durch, deren Auswirkung sich in den Messwerten deutlich wiederspiegelt. Zur Verdeutlichung ist eine Messsequenz des ersten Timepix-ASIC in der Abbildung 4.1 dargestellt. Dabei ist eine Spannung von 60 V angewendet und der Strom mit dem CUMO vermessen worden. Die Oszillation der Messwerte ist deutlich zu erkennen und besitzt eine Periodendauer von etwa 15 min.

Um einen Zusammenhang zwischen der Spannung U und dem Stromwert I zu erhalten, ist ein gemittelter Stromwert das Ziel. Dieser kann gewährleistet werden, wenn der gemittelte Wert von dem Minimal- und Maximalwert (vgl. Abbildung 4.1) innerhalb einer Periode bestimmt wird. Diese Anpassung ist für jeden Bereich veränderter Spannung für die nachfolgenden Messungen berücksichtigt worden.

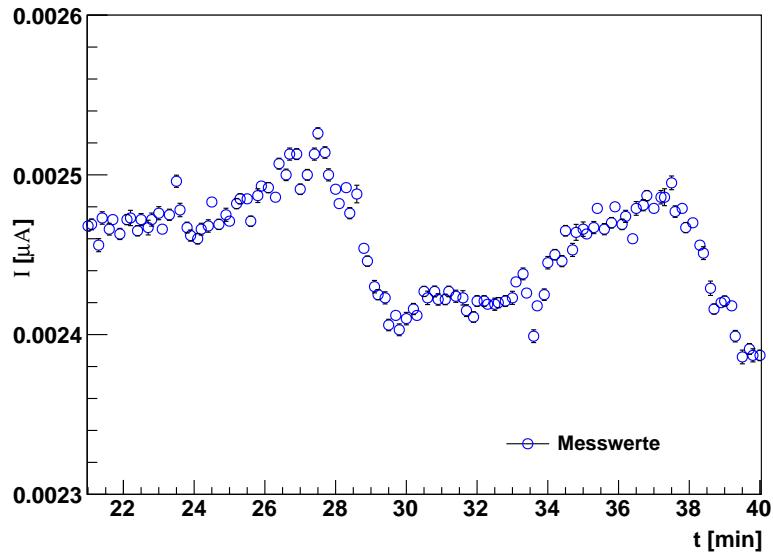


Abbildung 4.1: Oszillierende Temperaturschwankungen, verursacht durch die Klimaanlage bei einem konstanten Spannungswert von 60 V am Timepix-ASIC D5-W56

Zudem wird der Timepix-ASIC mit einem herkömmlichen Widerstand von $2,5 \text{ G}\Omega$ ausgetauscht und ebenfalls die Abhängigkeit der Temperatur untersucht. Das Resultat hierfür ist in der Abbildung 4.2 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die am Chip beobachtete Oszillation der Stromwerte nicht mehr zu erkennen ist. Dies verdeutlicht ein unterschiedliches Verhalten der Timepix-ASICS im Gegensatz zu einem herkömmlichen Widerstand.

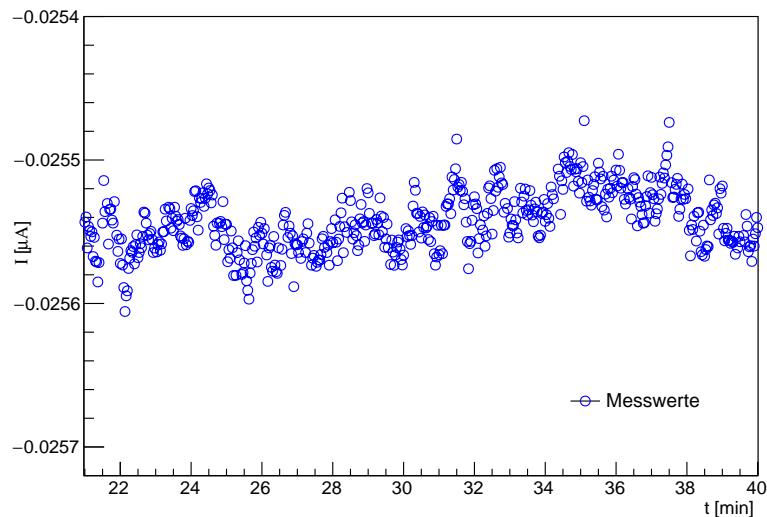


Abbildung 4.2: Beobachtung der Temperaturschwankung an einem $2,5 \text{ G}\Omega$ Widerstand bei einer Spannung von 60 V

4.2 Konfiguration der Messung

Um das Verhalten der Schutzschicht zu untersuchen, werden die Chips einzeln an eine externe Spannungsquelle angeschlossen (vgl. Kapitel 3). Hierbei werden aus Gründen der Messgenauigkeit zwei verschiedene Spannungsgeräte verwendet. Für die Messungen im Niederspannungsbereich eignet sich hierbei ein TTi QL-355T-Labornetzteil. Mit einer maximalen Ausgangsspannung von 35 V liefert es für eine eingestellte Spannung U_0 einen Fehler von

$$\Delta U = 0,1\% \cdot U_0 + 10 \text{ mV}.$$

Das Labornetzteil ist für die Untersuchung der Schutzschicht im Hochspannungsbereich aufgrund der oberen Spannungsgrenze ungeeignet.

Für den Hochspannungsbetrieb steht ein ISEG-CO40-Hochspannungsnetzgerät zur Verfügung, dessen Leistung im Bereich oberhalb von 40 V sehr präzise ist, jedoch unterhalb dieses Bereiches starke Spannungsfluktuationen aufweist. Der Fehler der Ausgangsspannung liegt bei

$$\Delta U = 0,01\% \cdot U_0 + 0,2 \text{ mV}.$$

Zusätzlich zum Spannungswert werden auch Stromwerte am ISEG ausgegeben. Diese besitzen einen Messfehler von

$$\Delta I = 0,02\% \cdot I_0 + 0,02\% \cdot I_{max}.$$

Hierbei meint I_0 den abgelesenen und I_{max} den maximal erreichbaren Stromwert von 2 mA.

Die Messung wird so eingerichtet, dass zu Beginn der Niederspannungsbereich vermessen wird. Dabei werden bei jeden Chip die Stromwerte bei variabler Spannung vermessen. Die Spannung wird in Zeitintervallen von 20 min verändert, um sicher zu gehen, dass eine vollständige Oszillation der Klimaanlage durchlaufen ist.

Begonnen wird mit einer Anfangsspannung von -35 V. Im 20 min-Zeitintervall wird in 3 V-Abständen dann die Spannung von -35 V bis -17 V und anschließend in 2 V-Abständen von -17 V bis -3 V verändert und das Stromverhalten untersucht. Folglich wird dann der Bereich -1 V, 0 V und 1 V vermessen und die Messung zum negativen Bereich äquivalent in positiver Richtung fortgesetzt. Um beim Null-durchgang einen Vorzeichenwechsel in der Spannung zu erreichen, wird das Verbindungskabel lediglich umgepolt.

4.3 Timepix-ASIC D5-W0056, IZM-3

4.3.1 Stromverhalten im Niederspannungsbereich

Die erste Messung findet an einem aus der dritten Produktionsserie (IZM-3) stammenden Timepix-ASIC statt. Diese Chips zeichnen sich durch eine gute InGrid-Qualität aus, besitzen jedoch weiterhin Probleme beim Schutz vor Entladungen. Zur Visualisierung und Datenanalyse wird das am CERN entwickelte Programm ROOT verwendet. Die Resultate der Messung sind für den negativen Niederspannungsbereich in der Abbildung 4.3 und für den positiven Bereich in der Abbildung 4.4 dargestellt.

Kapitel 4 Messungen

Bei Betrachtung der Resultate ist sowohl im negativen Bereich von -11 V bis -3 V als auch im positiven Bereich von 1 V bis 3 V ein lineares Verhalten zu erkennen. Das symmetrische Verhalten beim Wechsel von negativer zu positiver Spannung kann mit dem im Abschnitt ?? beschriebenen Prozess verstanden werden.

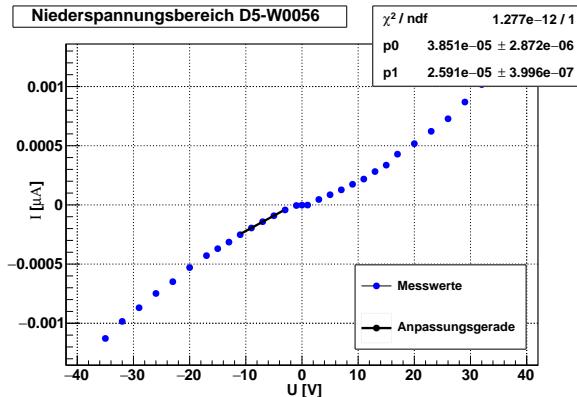


Abbildung 4.3: Resultate der Strommessung im Niederspannungsbereich mit entsprechender linearer Regressionsgeraden im Spannungsintervall von -11 V bis -3 V

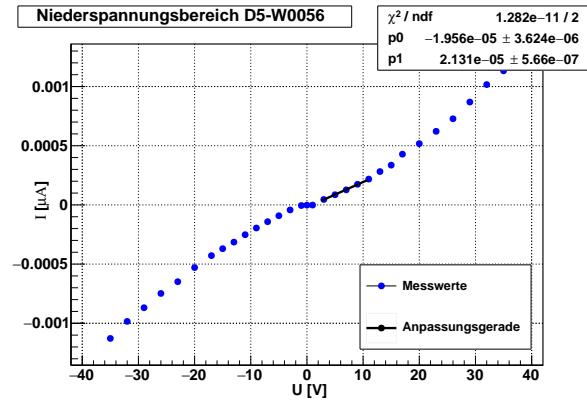


Abbildung 4.4: Resultate der Strommessung im Niederspannungsbereich mit entsprechender linearer Regressionsgeraden im Spannungsintervall von 1 V bis 3 V

Aus Gründen der Linearität kann an die Messwerte eine Geradenanpassung gemäß linearer Regression vorgenommen werden. Hierbei bezeichnet $y(x)$ die Funktionsgerade mit zugehörigem Fehler $\Delta y(x)$, welche durch die Geradengleichung

$$y(x) = p_1 \cdot x + p_0$$

beschrieben wird. Die Fehler der Anpassung mit zusätzlicher χ^2 -Güte können ebenfalls den Abbildungen entnommen werden.

Aus dem Anstieg der Anpassungskurven kann der spezifische Widerstand R_{neg} für den negativen Bereich und R_{pos} für den positiven Bereich wie folgt errechnet werden

$$R = \frac{I}{\frac{\Delta I}{\Delta U}} = \frac{1}{p_1}, \quad \text{mit dem Fehler} \quad \Delta R = \frac{1}{p_1^2} \cdot \Delta p_1. \quad (4.1)$$

Nach Anwendung obiger Formeln können folgende Widerstandswerte errechnet werden

$$R_{neg} = (38,60 \pm 0,59) \text{ G}\Omega \quad \text{und} \quad R_{pos} = (46,93 \pm 1,25) \text{ G}\Omega.$$

Um eine Aussage über den Flächenwiderstand $R_F [\text{G}\Omega/\text{cm}^2]$ zu erhalten gilt es, einen Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Goldfläche herzustellen. Die Goldfläche ist für jeden Chip zuvor individuell ermittelt worden und kann der Tabelle 3.1 entnommen werden. Der Flächenwiderstand beträgt

$$R_{F,neg} = (76,39 \pm 2,47) \text{ G}\Omega/\text{cm}^2 \quad \text{und} \quad R_{F,pos} = (92,87 \pm 3,62) \text{ G}\Omega/\text{cm}^2.$$

4.3.2 Stromverhalten im Hochspannungsbereich

Die Messung des Hochspannungsbereichs wird, wie zuvor beschrieben, mit dem ISEG-Hochspannungs-Netzgerät durchgeführt. In der Abbildung 4.5 ist das Verhalten des Chips im Bereich von 40 V bis 100 V gezeigt. Deutlich zu erkennen sind die von der Klimaanlage hervorgerufenen Schwankungen. Im Bereich von 40 V bis 80 V ähnelt das Stromverhalten dem im Niederspannungsbereich.

Nach Anwendung einer 100 V-Spannung beginnen die Messwerte unkoordiniert zu fluktuieren. Dieses Verhalten setzt sich bis zu einer Spannung von 180 V fort und erreicht einen maximalen Stromwert bei einer Spannung von 280 V (siehe Abbildung 4.6). Nach anschließendem Einstellen von 380 V kommt es zur vollständigen Entladung. In den Messwerten ist dies anhand eines konstanten Stromwertes von 0 μ A zu erkennen. Ein erneutes Anlegen einer Niedrigspannung führt dann bereits zu diesem Effekt. Die Hochspannung auf der Schutzschicht hat somit einen leitenden, niederohmigen Kanal und damit einen irreversiblen Durchbruch erzeugt.

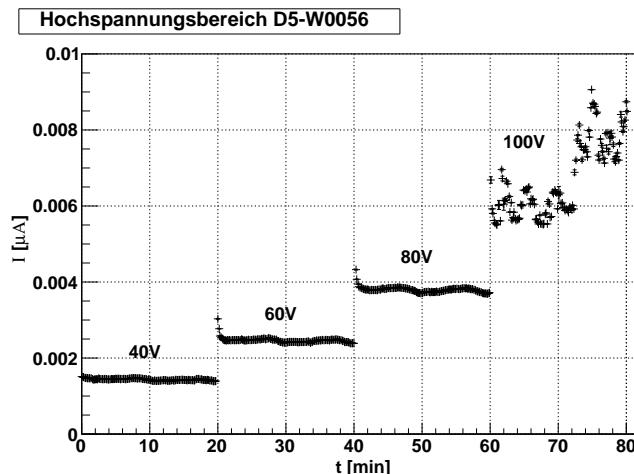


Abbildung 4.5: Verhalten im Hochspannungsbereich im Spannungsintervall von 40 V bis 100 V

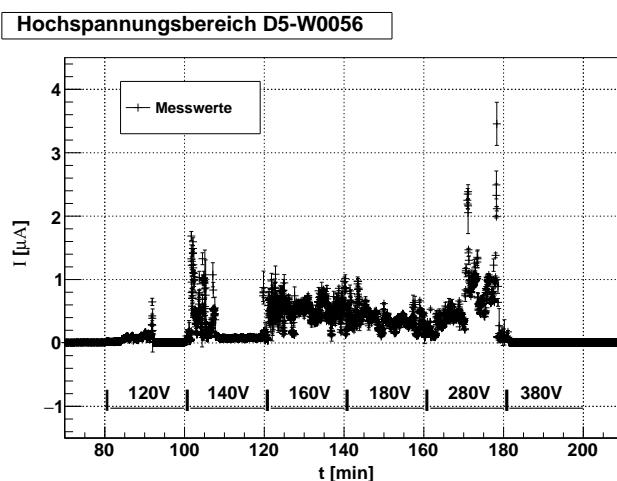


Abbildung 4.6: Verhalten im Hochspannungsbereich im Spannungsintervall von 120 V bis 380 V

4.4 Timepix-ASIC E11-W0058, IZM-4

4.4.1 Stromverhalten im Niederspannungsbereich

Bei dem zweiten untersuchten Chip handelt es sich um einen aus der vierten Produktionsserie stammenden IZM-4-Chip. Die Messung wird äquivalent zum Timepix-ASIC D5-W56 durchgeführt. Während der Messung ist zu erkennen, dass die gemessenen Stromwerte im Bereich unterhalb von -10 V und oberhalb von 10 V starken Schwankungen unterliegen. Es ist daher nicht möglich, Maxima oder Minima zu finden, um einer Messsequenz einen spezifischen Stromwert zuzuordnen. Im Bereich von -10 V bis 10 V kann jedoch die Anpassung ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden. Die Resultate sind in den Abbildungen 4.7 und 4.8 zu betrachten.

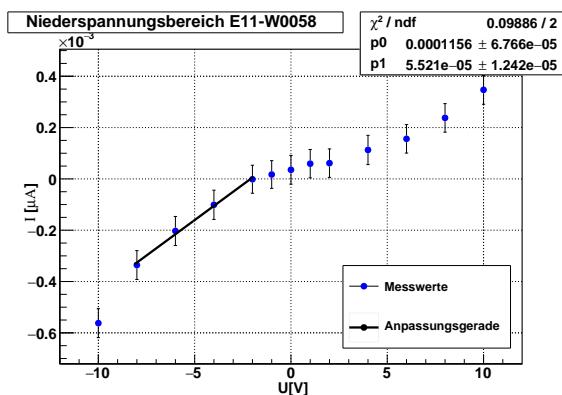


Abbildung 4.7: Anpassung der Messwerte an eine lineare Regressionsgerade im negativen Bereich

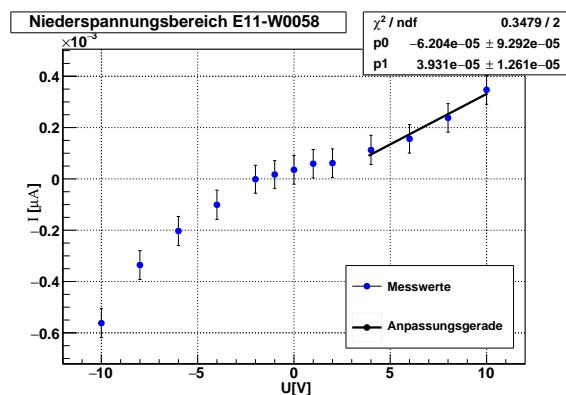


Abbildung 4.8: Anpassung der Messwerte an eine lineare Regressionsgerade im positiven Bereich

Auch für diese Messung wird eine lineare Regressionsgerade durch die Messwerte gelegt und der Flächenwiderstand berechnet. Die Messung liefert folgende Resultate

$$R_{neg} = (18,11 \pm 4,07) \text{ G}\Omega \quad \text{und} \quad R_{pos} = (25,44 \pm 8,16) \text{ G}\Omega.$$

Für den Flächenwiderstand R_F wird folgender Wert berechnet

$$R_{F,neg} = (30,30 \pm 6,81) \text{ G}\Omega/\text{cm}^2 \quad \text{und} \quad R_{F,pos} = (42,57 \pm 13,65) \text{ G}\Omega/\text{cm}^2.$$

4.4.2 Stromverhalten im Hochspannungsbereich

Für den Hochspannungsbereich wird der Bereich von 40 V bis 540 V vermessen. In der Abbildung 4.9 ist das Spannungsintervall von 40 V bis 180 V in Spannungsabständen von 20 V bzw. Zeitabständen von 20 min gezeigt.

Die im Niederspannungsbereich beobachteten Stromfluktuationen, die im Niederspannungsbereich eine Anpassung nicht möglich machen, sind im Bereich von 40 V bis 60 V nun wieder deutlich zu erkennen. Ab einem Spannungswert von 180 V steigt der Stromwert bei konstanter Spannung und geht in einen reversiblen Durchbruch über. Um das Verhalten bei dieser Spannung zu erforschen, wird die Messsequenz auf etwa 40 min erweitert.

Aus Sicherheitsgründen schaltet das ISEG automatisch die Spannung aus, wenn der für das Gerät zulässige Maximalstrom erreicht worden ist. In der Abbildung ist dies am konstanten Stromwert von $0 \mu\text{A}$ zu erkennen.

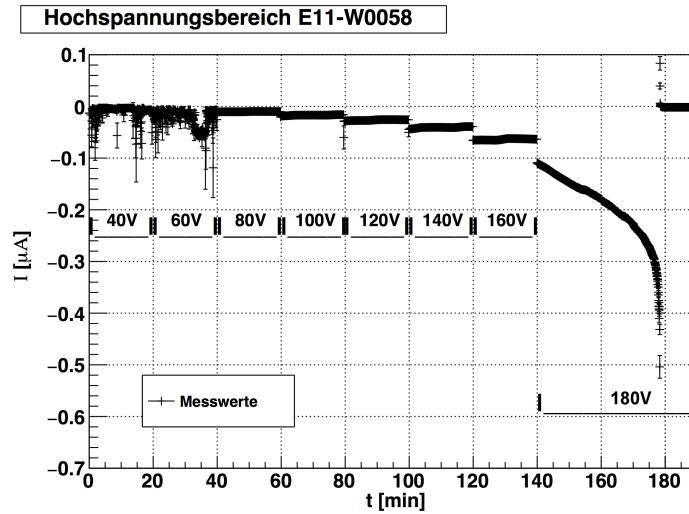


Abbildung 4.9: Vermessung der Stromwerte des Timepix-ASIC E11-W0058
für den Hochspannungsbereich von 40 V bis 180 V

Nach selbstständigem Abschalten des ISEG wird erneut der Spannungswert von 180 V eingestellt. Der reversible Durchbruch ist bei diesem Spannungswert nicht mehr beobachtbar. Die Messung kann fortgeführt und in den Abbildungen 4.10 und 4.11 im Spannungsbereich von 180 V bis 380 V betrachtet werden. Lediglich bei einem Spannungswert von 240 V und 380 V sind erneut o.g. Durchbrüche erkennbar.

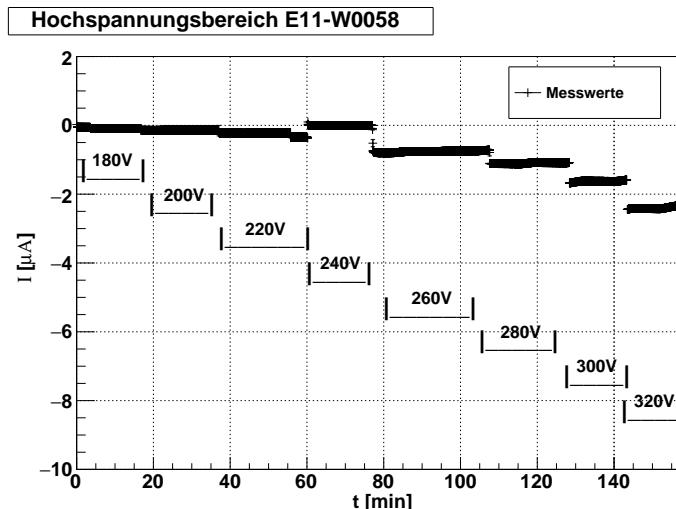


Abbildung 4.10: Vermessung der Stromwerte des Timepix-ASIC E11-W0058
für den Hochspannungsbereich von 180 V bis 320 V

Um aufgrund der anwachsenden Stromwerte einen Gerätedefekt am CUMO zu vermeiden, wird dieser folglich von dem Messaufbau abgetrennt. Das Resultat ist in der Abbildung 4.12 gezeigt. Der Strom steigt mit Erhöhung der Spannung exponentiell an. Dies zeigt, dass die Strom-Spannungskennlinie nicht der eines Widerstandes gleicht, sondern eher der einer Diode. Zudem ist ein zum Widerstand unterschiedliches Verhalten bei der Temperaturabhängigkeit nachgewiesen worden.

Es ist möglich, die Messwerte der Abbildung 4.12 an folgende Exponentialfunktion im Intervall von 435 V bis 535 V anzunähern

$$y(x) = \exp(p_0 + p_1 \cdot x).$$

Hierbei können folgende Parameter der Anpassung gefunden werden

$$p_0 = -7,42 \pm 0,31 \quad p_1 = (2,342 \pm 0,061) \cdot 10^{-2}$$

Nach Einstellung eines Spannungswertes von 540 V ist ein weiteres, anschließendes Vermessen im Niederspannungsbereich nicht möglich, da unmittelbar maximale Ströme erreicht werden und das ISEG automatisch abschaltet. Auch hier wird ein irreversibler Durchbruch der Schutzschicht bei einer Spannung von 540 V erzielt.

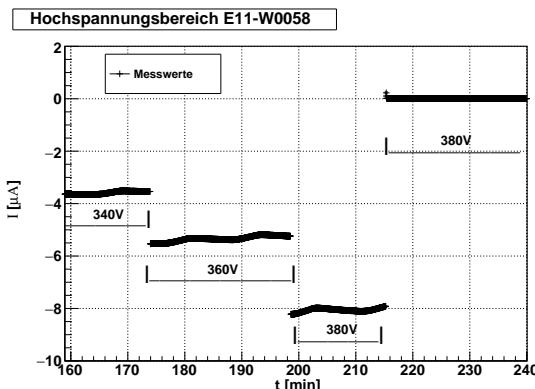


Abbildung 4.11: Messung des Timepix-ASIC E11-W0058 im Spannungsbereich von 340 V bis 380 V

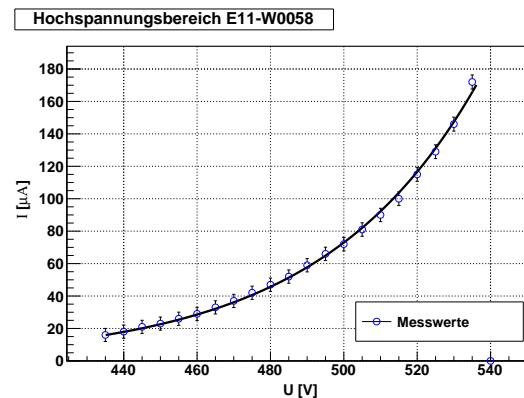


Abbildung 4.12: Messung des Timepix-ASIC E11-W0058 im Spannungsbereich von 435 V bis 540 V

4.5 Timepix-ASIC K10-W0063, IZM-5

4.5.1 Stromverhalten im Niederspannungsbereich

Für die dritte Messung steht ein aus der IZM-5-Produktionsserie stammender Timepix-ASIC zur Verfügung. Das Messverfahren im Niederspannungsbereich von -35 V bis 35 V ist identisch zu dem der ersten beiden Chips. Der gesamte Bereich hat problemlos vermessen werden können. Eine Anpassung der Daten wird im negativen Bereich von -13 V bis -5 V und im positiven Bereich von 3 V bis 11 V vorgenommen. Die Resultate dieser Anpassung sind den Abbildungen 4.13 und 4.14 zu entnehmen.

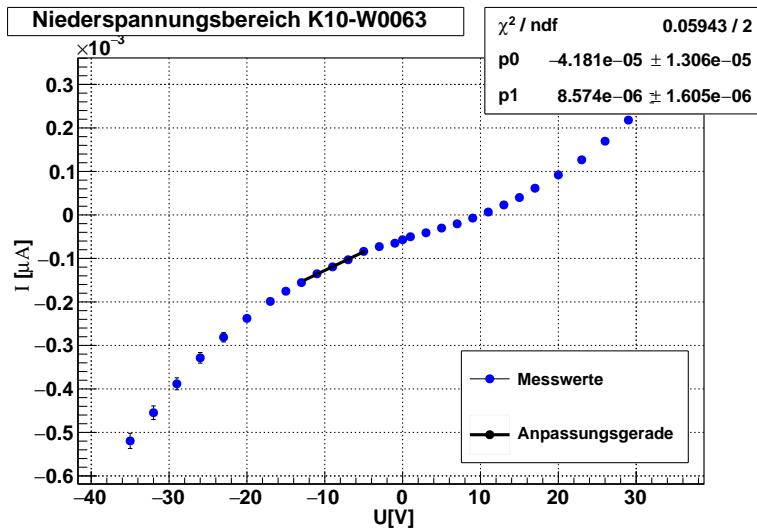


Abbildung 4.13: Vermessung des Niederspannungsbereiches für den Timepix-ASIC K10-W0063:
gezeigt ist die Anpassung der Messwerte im Spannungsintervall von -13 V bis -5 V an eine lineare Regression

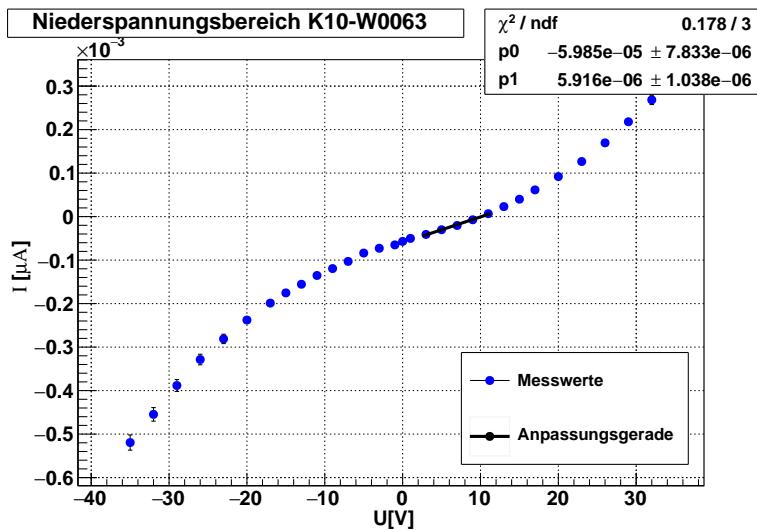


Abbildung 4.14: Vermessung des Niederspannungsbereiches für den Timepix-ASIC K10-W0063:
gezeigt ist die Anpassung der Messwerte im Spannungsintervall von 3 V bis 11 V an eine lineare Regression

Die Widerstandswerte können nun erneut über die Gleichung 4.1 für beide Bereiche berechnet und klassifiziert werden.

$$R_{\text{neg}} = (116,6 \pm 22,0) \text{ G}\Omega \quad \text{und} \quad R_{\text{pos}} = (169 \pm 30) \text{ G}\Omega.$$

Für die zugehörigen Flächenwiderstandswerte erhält man

$$R_{F,\text{neg}} = (230,75 \pm 43,53) \text{ G}\Omega \text{ cm}^{-2} \quad \text{und} \quad R_{F,\text{pos}} = (334,45 \pm 59,37) \text{ G}\Omega \text{ cm}^{-2}.$$

4.5.2 Stromverhalten im Hochspannungsbereich

Für den Hochspannungsbereich wird am ISEG mit einer 40 V-Spannung begonnen. Die Resultate sind in der Abbildung 4.15 dargestellt. Bis zu einer Spannung von 100 V entspricht das Stromverhalten dem der vorherigen Chips.

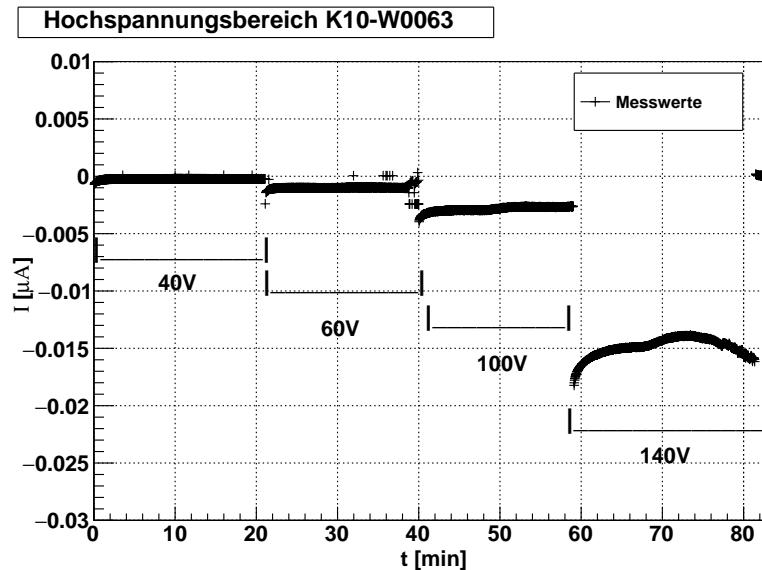


Abbildung 4.15: Hochspannungsbereich des Timepix-ASIC K10-W0063
im Spannungsintervall von 40 V bis 140 V

Der Stromverlauf zeigt bei Anwendung einer 140 V-Spannung auf der Oberfläche eine erkennbare Schwankung. Um den Verlauf zu erforschen, wird die Spannung unverändert gelassen. Nach etwa 20 min ist ein Kurzschluss eingetreten. Der Chip zeigt kurzzeitig maximale Ströme an, welche dann in einen Stromwert von 0 μ A übergehen. Um die Funktionstüchtigkeit des Chips noch einmal zu prüfen, wird der Chip an eine Niederspannung von 20 V angeschlossen. Auch für diese Spannung erreicht der Chip maximale Ströme und ist für weitere Messungen nicht mehr verwendbar.

4.6 Timepix-ASIC K10-W0011, IZM-1

Die letzte Messung findet an einem aus der ersten Produktionsserie (IZM-1) stammenden Timepix-ASIC statt. Das Verhalten der Schutzschicht wird zunächst erneut im Niederspannungsbereich untersucht. Die Ergebnisse hierfür sind in der Abbildung 4.16 gezeigt.

Die Messung wird mit einer Spannung von -35 V gestartet. Bereits zu Beginn sind hohe Ströme zu erkennen, welche auf einen, im Vergleich zu den anderen vermessenen Timepix-ASICS geringeren Widerstandswert schließen lassen. Zudem ist kein Einfluss der Klimaanlage in den Messwerten zu erkennen, da die Stromwerte willkürlichen Schwankungen unterzogen sind. Dennoch wird die Messreihe fortgesetzt und die Spannung in 3 V Abständen variiert. Bei Anlegen einer -20 V-Spannung hat sich ein leitender, niederohmiger Kanal (vgl. Kapitel 2.2.2) gebildet, welcher nun im Chip zu einem irreversiblen Durchbruch geführt hat.

Um zu prüfen, ob es während der Messungen zu Beschädigungen gekommen ist, wird die Spannungsquelle ausgeschaltet und der Timepix-ASIC aus der Kupferbox entfernt. Es ist zu erkennen, dass sich ein Teil des Silberleitklebers von der goldbeschichteten Oberfläche gelöst hat und lediglich ein gering leitender Kontakt zur Oberfläche besteht. Dies erklärt das unkoordinierte Fluktuieren in den Stromwerten und den plötzlichen Durchbruch. Eine Hochspannungsmessung ist daher für diesen Chip nicht mehr durchführbar.

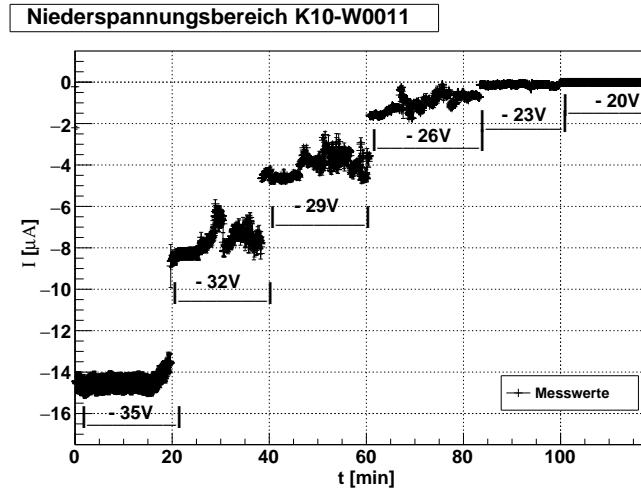


Abbildung 4.16: Niederspannungsbereich Timepix-ASIC K10-W0011
im Spannungsintervall von -35 V bis -20 V

Resümierend werden nun noch einmal die Ergebnisse der errechneten Flächenwiderstände $R_{F,neg}$ und $R_{F,pos}$ der Schutzschicht für die einzelnen Timepix-ASCs in einer Tabelle dargestellt. Außerdem sind auch die Ergebnisse eingetragen, bei denen ein irreversibler Durchbruch bei der angelegten Spannung U_{irr} nachgewiesen werden kann. Da für den letzten Timepix-ASIC keine Berechnung der Flächenwiderstände möglich ist, sind lediglich die Ergebnisse für den Durchbruch eingetragen. Auch diese Werte sind in der Tabelle 4.1 aufgelistet.

Nº	Typ	Wafer	$R_{F,neg}[\text{G}\Omega/\text{cm}^2]$	$R_{F,pos}[\text{G}\Omega/\text{cm}^2]$	$U_{irr}[\text{V}]$
1	D5	W0056 (IZM-3)	$76,39 \pm 2,47$	$92,87 \pm 3,62$	380
2	E11	W0058 (IZM-4)	$30,30 \pm 6,81$	$42,57 \pm 13,65$	540
3	K10	W0063 (IZM-5)	$230,75 \pm 43,53$	$334,45 \pm 59,37$	140
4	K10	W0011 (IZM1)	-	-	-20 V

Tabelle 4.1: Ergebnisse der errechneten Flächenwiderstände der Timepix-ASCs
bei der Vermessung des Niederspannungsbereichs

Die Ergebnisse zeigen die deutlichen Unterschiede der Flächenwiderstandswerte für die verschiedenen Produktionsserien. Bei einigen Chips deuten die entstandenen reversiblen Durchbrüche auf Materialfehler hin wie z.B. Risse in der Schutzschicht. In den Flächenwiderstandswerten ist zwischen den einzelnen Produktionsserien eine Verbesserung der Schutzschicht erkennbar. Das IZM in Berlin hat über eine Nadel Spannung auf die Schutzschicht gegeben und vergleichsweise ähnliche Resultate erhalten.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Verhalten von Aufladungseffekten und Durchbrüchen der Schutzschicht von Timepix-ASICs erforscht worden.

Zu Beginn ist es gelungen, einen Strommonitor zur Verbesserung der Messgenauigkeit zu kalibrieren. Die Vorbereitung der Timepix-ASICs stellt eine Herausforderung dar. Hierbei ist eine leitende Verbindung zwischen der Pixelfläche und der Spannungsquelle mit einem Draht hergestellt worden. Doch dieser hat sich bei minimaler Störung aufgrund von Scherspannungen von der Pixelfläche gelöst und den Chip für die Messung unbrauchbar gemacht. Somit sind lediglich vier Timepix-ASICs für die Messungen relevant. Daher ist die Aussagekraft für eine ausreichende Statistik anzuzweifeln. Störende, sich auf die Messung auswirkende Faktoren sind erfolgreich reduziert worden.

Die Analyse der Ergebnisse ist durch geeignete Wahl einzelner Spannungsintervalle mit Hilfe der linearen Regression erfolgt. Die erhaltenen Resultate charakterisieren nicht nur individuell für jeden Chip die Flächenwiderstände, sondern zeigen als Gesamtheit den hohen Widerstand der Schutzschicht. Dadurch wird ihre Anwendung künftig in GridPix-Detektoren bei der Vermessung von Teilchenereignissen neue Messergebnisse für hohe Spannungen liefern.

Trotz der fehlenden statistischen Relevanz der Ergebnisse können die Erfahrungen bei den verschiedenen Messungen der Timepix-ASICs auch jetzt schon Aufschluss über die Qualität der Schutzschicht geben. Dies kommt auch künftigen Messungen am GridPix zugute.

Literaturverzeichnis

- [1] TRONCON, Pierre S.: *Die Zukunft des Göttlichen in der Ewigkeit*. 2014
- [2] RUDOLF P. HUEBENER, Heinz L.: *Die Physikalisch- Technische Reichsanstalt*. 1. 2011
- [3] HERMANN KOLANOSKI, Norbert W.: *Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen*. 1. 2015
- [4] GOETHE, Johann W.: *Faust. Der Tragödie erster Teil*. 2012
- [5] KLEINKNECHT, Konrad: *Detektoren für Teilchenstrahlung*. 4. 2005
- [6] KRAMMER, Univ.-Doz. Dr. M.: *Vorlesungsunterlagen: Detektoren in der Hochenergiephysik*. <https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-2-Wechselwirkungen.pdf>
- [7] Gridpix: *TPC development on the right track*. <https://www.nikhef.nl/fileadmin/Doc/Docs20&20pdf/Communicatie/Media/samenvatting-MF-2.pdf>
- [8] HILKE, H J.: *Time projection chambers*. <https://lhcb-doc.web.cern.ch/lhcb-doc/presentations/TalksNotDirectlyRelatedLHCb/Postscript/Hilke.pdf>
- [9] SCHULTENS, Martin: *Diplomarbeit: Teststrahlmessungen mit hochgranularer Auslese einer Zeitprojektionskammer bei verschiedenen Pixelgrößen*. <https://www.lhc-ilc.physik.uni-bonn.de/ergebnisse/dateien/t00000016.pdf>
- [10] KILLENBURG, Martin: *Resolution studies of a GEM-based TPC*. <http://publications.rwth-aachen.de/record/61694>. Version: 2006
- [11] RÜCKL, Reinhold: *Fachverband Teilchenphysik*. <http://www.dpg-verhandlungen.de/year/2011/conference/karlsruhe/static/t.pdf>
- [12] Y. GIOMATARIS, J.P. Robert G. C. Ph. Rebougeard R. Ph. Rebougeard: *MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments*. 1996
- [13] DANGER, Helge: *Untersuchung von Aufladungseffekten und Alterungsstudie an einem Micromegas Detektor mit resistiver Streifenanode*, Diplomarbeit. 2014
- [14] XIAO, Dengming: *Gas Discharge and Gas*. 2016
- [15] D'YAKOV, M. I. ; KACHOROVSKII, V. Y.: *Streamer discharge in a homogeneous field*. 25.10.1988
- [16] V.PESKOV, P.Fonte: *Research on discharges in micropattern and small gap gaseous detectors*. 2009
- [17] KÖHLI, Markus: *Entwicklung einer Labortestkammer für mikrostrukturierte Gasdetektoren mit hochpixelierter Auslese und Charakterisierung postprozessierter TimePix-Chips unter Verwendung von GEM-Folien zur Gasverstärkung*, Diplomarbeit. 2010
- [18] DRECHSLER, Eric: *Gain Measurements of a GridPix detector operated in Ar / iC₄H₁₀ at different*

Literaturverzeichnis

pressures. 2012

- [19] ZAMROWSKI, Michael: *Entwicklung eines Datenerfassungssystems für die Auslese des TimePix-Chips*, Diplomarbeit. 2009
- [20] BILEVYCH, Y. ; BLANCO CARBALLO ET AL., V. M.: *New results from GridPix detectors*. 2008
- [21] BILEVYCH, Y. ; BLANCO CARBALLO ET AL., V. M.: *EUDET-Memo-2008-20 Integrated pixel readout for a TPC at NIKHEF*. 2008
- [22] BECKMANN, Robert: *Properties of the Protective Silicon Nitride Layer in InGrid Detectors*. September 2013
- [23] KRIEGER, Christoph ; BILEVYCH, Yevgen ; DESCH, Klaus ; KAMINSKI, Jochen ; KRAUTSCHEID, Thorsten: *Gasgefüllter Röntgendetektor mit GridPix-Auslese*. 28.02.2012
- [24] LUPBERGER, Michael: *The Pixel-TPC: A feasibility study*. <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2016/4348/4348.htm>, 2016
- [25] HENSELER, Michael: *Bedienungsanleitung CUMO-0.4*. 2014

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau und Funktionsweise einer Zeitprojektionskammer	3
2.2	Schematische Darstellung eines Micromegas-Teilchendetektors	4
2.3	Bildung eines Streamers	5
2.4	Prinzip des TOT-Modus	7
2.5	Prinzip des ToA-Modus	7
2.6	Querschnitt des Timepix-ASIC	7
2.7	Risse in Schutzschicht des Timepix-ASIC	7
2.8	Auftragung der Schutzschicht mit dazwischenliegender Si_xO_y -Schicht	8
3.1	Aktive Pixelfläche eines Timepix-ASIC	10
3.2	Kalibrationsaufbau	10
3.3	Kalibration des aus der vierten Produktionsserie stammenden Strommonitors	11
3.4	Befestigung des Drahtes mit der Oberfläche des Timepix-ASIC	12
3.5	Ablösen der Goldoberfläche beim Lötvorgang durch Scherspannungseffekte	12
4.1	Oszillierende Temperaturschwankungen am Timepix-ASIC	14
4.2	Beobachtung der Temperaturschwankung an einem Widerstand	14
4.3	Niederspannungsbereich-Anpassung Timepix D5-W0056 von -11 V bis -3 V	16
4.4	Niederspannungsbereich-Anpassung Timepix D5-W0056 von 1 V bis 3 V	16
4.5	Verhalten im Hochspannungsbereich im Spannungsintervall von 40 V bis 100 V	17
4.6	Verhalten im Hochspannungsbereich im Spannungsintervall von 120 V bis 380 V	17
4.7	Anpassung der Messwerte an eine lineare Regressionsgerade im negativen Bereich	18
4.8	Anpassung der Messwerte an eine lineare Regressionsgerade im positiven Bereich	18
4.9	Hochspannungsmessung des Timepix-ASIC E11-W0058 von 40 V bis 180 V	19
4.10	Hochspannungsmessung des Timepix-ASIC E11-W0058 von 180 V bis 320 V	19
4.11	Hochspannungsmessung des Timepix-ASIC E11-W0058 von 340 V bis 380 V	20
4.12	Hochspannungsmessung des Timepix-ASIC E11-W0058 von 435 V bis 540 V	20
4.13	Niederspannungsbereich für den Timepix-ASIC K10-W0063 von -13 V bis -5 V	21
4.14	Niederspannungsbereich für den Timepix-ASIC K10-W0063 3 V bis 11 V	21
4.15	Hochspannungsbereich des Timepix-ASIC K10-W0063 im von 40 V bis 140 V	22
4.16	Niederspannungsbereich Timepix-ASIC K10-W0011 von -35 V bis -20 V	23

Tabellenverzeichnis

3.1	Auflistung der Timepix-ASICs mit ihren Eigenschaften	10
3.2	Messbereiche des CUMO-Strommonitors	11
4.1	Flächenwiderstände der Timepix-ASICs bei der Vermessung des Niederspannungsbereichs	23