

Entwicklung und Bau einer Testbox zur GEM-Simulation für das Large-Prototype-Projekt der LCTPC-Kollaboration

Bachelor-Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

dem Fachbereich Physik der
Universität Siegen

vorgelegt von
Marcus Niechciol

März 2009

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	2
1.2. Der International Linear Collider (ILC)	4
1.2.1. Motivation für einen Linearcollider	4
1.2.2. Der ILC als vorgeschlagener Linearcollider	5
1.2.3. Das ILD-Detektorkonzept für den ILC	8
1.3. Time Projection Chambers (TPCs)	10
1.3.1. Theoretische Grundlagen	10
1.3.2. Funktionsweise einer TPC	12
1.3.3. GEMs als für die ILD-TPC favorisierte Gasverstärkungsmethode	14
1.3.4. Der Large Prototype einer TPC am DESY	17
1.3.5. Motivation für den Bau der Testbox	19
2. Beschreibung der Testbox und der durchgeführten Messungen	21
2.1. Die Testbox	21
2.2. Spannungsversorgung	26
2.2.1. Funktionsüberprüfung der HV-Module	26
2.3. Messgeräte	28
2.3.1. Netzwerk-Auslesemethode für HV-Versorgungen	28
2.4. Beschreibung der Messungen	29
2.4.1. Bestimmung der Zeitkonstanten	29
2.4.2. Spannungsmessungen	30
2.4.3. Ramping-Messungen	31
3. Messungen und Auswertungen	33
3.1. Bestimmung der Zeitkonstanten	33
3.1.1. Kondensator-Aufbau	35
3.1.2. GEM-Aufbau	37
3.1.3. Vergleich der Messungen	39
3.2. Spannungsmessungen	40
3.2.1. Aufbau ohne Testbox	40
3.2.2. Kondensator-Aufbau	43
3.2.3. GEM-Aufbau	44
3.2.4. Vergleich der Messungen	47
3.3. Ramping-Messungen	48
4. Zusammenfassung und Ausblick	53
Anhänge	55
A. Quellcodes der verwendeten Programme	55
A.1. Ausleseprogramm für die HV-Versorgung	55
A.2. Auswertungsskript für die Zeitkonstantenmessungen	56
A.3. Auswertungsskript für die Spannungsmessungen	57

A.4.	Auswertungsskript für die Ramping-Messungen	59
B.	Weitere Bilder der Testbox	60
C.	Detaillierte Ergebnisse der Funktionsüberprüfung der HV-Module . .	61
D.	Literaturverzeichnis	62
E.	Abbildungsverzeichnis	66
F.	Tabellenverzeichnis	67
G.	Abkürzungsverzeichnis	68

1. Einleitung

In der öffentlichen Wahrnehmung wird das Bild der Teilchenphysik derzeit vor allem durch den kürzlich in Betrieb genommenen Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Labor für Teilchenphysik CERN in Genf bestimmt. Doch von der breiten Öffentlichkeit zum Großteil unbeachtet ist schon vor längerer Zeit die Forschungs- und Entwicklungsphase für das nächste internationale Großprojekt der Teilchenphysik angelaufen. Schon zu Beginn war sich die weltweite wissenschaftliche Gemeinschaft einig, dass es sich bei diesem nächsten Großprojekt um einen Elektron-Positron-Linearbeschleuniger handeln soll, auch wenn die Planungen der verschiedenen, „regionalen“ Forschungszentren (z.B. DESY in Deutschland, KEK in Japan oder SLAC in den USA) zuerst getrennt voneinander erfolgten. Im Jahre 2004 schlug das International Technology Recommendation Panel (ITRP), ein eigens zur Begutachtung der verschiedenen Projekte geschaffenes Gremium, vor, dass der geplante Linearbeschleuniger auf der am DESY entwickelten, supraleitenden TESLA-Technologie basieren soll. Im Anschluss an diese Empfehlung schlossen sich die bisher getrennt voneinander arbeitenden Projektgruppen – TESLA in Deutschland, GLC in Japan und NLC in den USA – zusammen und bündelten ihre Kräfte zu einem einzelnen Projekt: dem International Linear Collider (ILC).

Seither wurden große Anstrengungen unternommen, die einzelnen Entwürfe in einem Projektvorschlag zu vereinen, so dass im Jahre 2007 ein vorläufiger Reference Design Report (RDR) für den ILC veröffentlicht werden konnte, in dem die grundlegenden Ziele der Forschung am ILC, die geplanten Beschleuniger- und Detekortechnologien sowie die zum Erreichen der Forschungsziele notwendigen Parameter von Beschleuniger und Detektor ausführlich beschrieben werden. Auf dieser Grundlage werden nun in den einzelnen, über den Globus verstreuten Arbeitsgruppen die technischen Details weiter ausgearbeitet, am DESY in Hamburg z.B. werden derzeit unter anderem verschiedene Studien mit Zeitprojektionskammern (Time Projection Chambers, im Folgenden wird die Abkürzung TPC verwendet) durchgeführt. Die vorliegende Bachelor-Arbeit wurde im Rahmen des durch das EUDET-Programm der Europäischen Union geförderten Large-Prototype-Projekts der Linear-Collider-TPC-Kollaboration (LCTPC-Kollaboration) durchgeführt, dessen Ziel die Inbetriebnahme einer großen TPC mit auf GEM-Folien und MicroMEGAS basierender Gasverstärkungstechnologie ist, und trägt einen kleinen Teil zu den Studien der in diesem Projekt benutzten GEM-Folien bei. Ziel dieser Arbeit ist es, die Frage zu beantworten, ob die benutzten GEM-Folien durch handelsübliche elektronische Bauteile (z.B. Kondensatoren und Widerstände) simuliert werden können, um damit dann beispielsweise Hochspannungs-Tests ohne die Gefahr der Beschädigung einer GEM-Folie durchführen zu können. Die Ergebnisse dieser, während eines Aufenthalts am DESY durchgeführten Untersuchungen werden in der vorliegenden Bachelor-Arbeit vorgestellt.

1.1. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Die Vorstellung, dass die uns umgebende Materie nicht unendlich oft in unendlich kleine Bestandteile zerlegt werden kann, sondern aus kleinsten, nicht weiter teilbaren, also „elementaren“, Bausteinen aufgebaut ist, existiert schon seit der Antike. Im 5. Jh. v. Chr. formulierten griechische Naturphilosophen als erste eine solche Theorie, und sie nannten diese elementaren Teilchen „Atome“ (von gr. $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$, „unteilbar“). Der Atombegriff wurde dann erst im 19. Jahrhundert wieder von verschiedenen Naturwissenschaftlern für die Bausteine der chemischen Elemente aufgegriffen. Heute weiß man, dass die Teilchen, die wir als „Atome“ bezeichnen, keineswegs unteilbar sind, sondern eine Substruktur aus Atomkern und Atomhülle aufweisen. Der Kern besteht seinerseits wiederum aus Protonen und Neutronen und die Hülle aus Elektronen. Diese Teilchen wurden nach und nach entdeckt, und nach ihnen noch eine Vielzahl anderer Teilchen, z.B. Myonen, Pionen oder Kaonen. Mit der Zeit sammelte sich so ein ganzer Zoo an Teilchen an, woraufhin sich die Physiker die berechnete Frage stellten, ob denn alle diese Teilchen als Elementarteilchen im engeren Sinne anzusehen wären.

Mittlerweile hat sich unter den verschiedenen Erklärungsansätzen das Standardmodell der Elementarteilchenphysik (kurz Standardmodell oder SM) durchgesetzt. Gemäß des SM ist alle Materie aus lediglich 24 Elementarteilchen aufgebaut: je 6 Quarks und Leptonen sowie die jeweiligen Antiteilchen. Drei Quarks bilden beispielsweise ein Hadron, etwa ein Proton (uud), ein Quark und ein Antiquark bilden zusammen ein Meson, z.B. ein Pion ($u\bar{d}$). Quarks und Leptonen sind in jeweils drei „Generationen“ mit je zwei Quarks oder Leptonen eingeteilt, wobei die Masse der Teilchen von Generation zu Generation ansteigt. In Abb. 1.1 sind Quarks und Leptonen auf der linken Seite eingezeichnet.

Die rechte Seite von Abb. 1.1 bilden die Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen, die im SM als Quantenfeldtheorien formuliert sind: Die starke Wechselwirkung mit dem Gluon als Austauschteilchen, die elektromagnetische Wechselwirkung mit dem Photon und die schwache Wechselwirkung mit den W- und Z-Bosonen. Bisher ist es gelungen, mit Hilfe der Glashow-Salam-Weinberg-Theorie (GSW-Theorie, [1], [2], [3]) die Theorie der schwachen Wechselwirkung mit der der elektromagnetischen Wechselwirkung zugrundeliegenden Quantenelektrodynamik (QED) zu einer Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zu vereinigen. Eine weitere Vereinigung mit der Quantenchromodynamik (QCD), der der starken Wechselwirkung zugrundeliegenden Theorie, zu einer Grand Unified Theory (GUT) wird zurzeit angestrebt, konnte aber noch nicht erreicht werden.

Trotz anfänglicher Skepsis – die zu Beginn nur postulierten Quarks etwa treten nur in gebundenen Zuständen und nicht isoliert auf, was ihren Nachweis anfangs schwierig gestaltete – hat sich das SM als sehr erfolgreich erwiesen. In vielen Experimenten wurden seine Voraussagen geprüft und bestätigt. Nichtsdestotrotz gibt es noch eini-

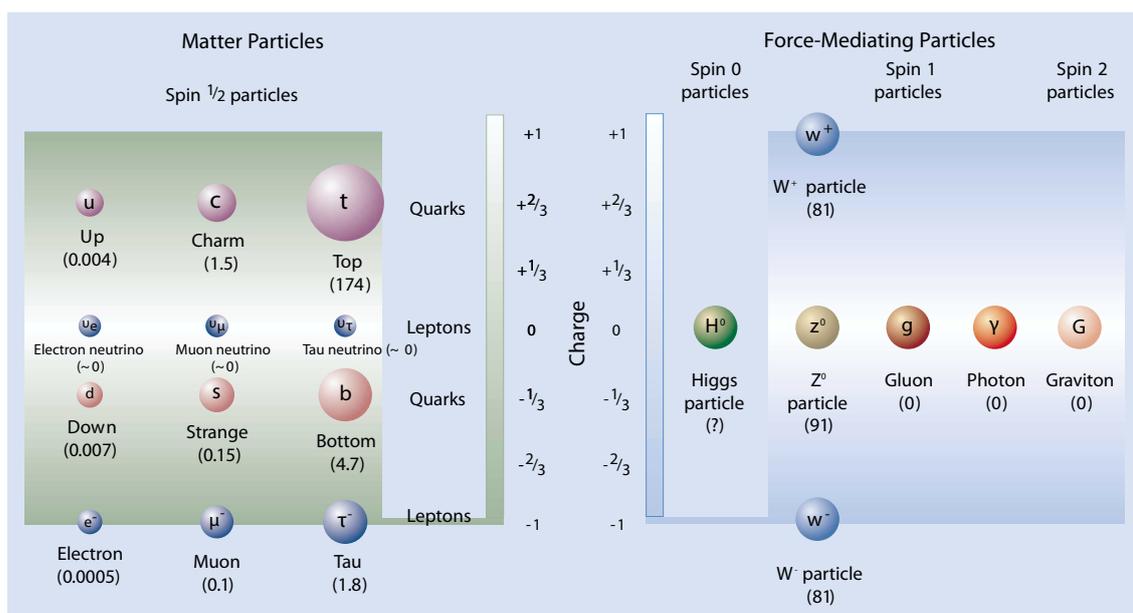


Abbildung 1.1: Die Teilchen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik [4]. Die Zahlen in Klammern geben die Masse der Teilchen in GeV an.

ge Probleme: So setzen die Eichtheorien, die dem SM zugrunde liegen, voraus, dass alle Teilchen masselos sind, was natürlich nicht der Fall ist. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein weiteres Teilchen postuliert, das Higgs-Boson [5]. Durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld mit dem Higgs-Boson als Austauscheteilchen erhalten nun alle Teilchen, sowohl Quarks und Leptonen als auch die massiven Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung, ihre Masse. Der Nachweis des Higgs-Bosons steht jedoch noch aus und wird eine der Hauptaufgaben der Experimente ATLAS und CMS am kürzlich angelaufenen LHC sein.

Auch fehlt derzeit im SM eine Beschreibung der Gravitation, obwohl diese die dem Menschen historisch gesehen vertrauteste Kraft ist. Derzeit wird versucht, eine quantenfeldtheoretische Beschreibung der Gravitation mit dem postulierten Graviton als Austauscheteilchen zu finden. Weitere Fragen, die das SM derzeit noch nicht beantworten kann, werden z.B. durch die Astrophysik aufgeworfen und stellen sich beispielsweise bei der Dunklen Materie oder der im Universum bestehenden Materie-Antimaterie-Asymmetrie. Ansätze für diese Fragen können etwa supersymmetrische (SUSY) Erweiterungen des SM sein, bei denen zu jedem bestehenden Teilchen des SM ein supersymmetrischer Partner postuliert wird, doch fehlt diesen Theorien zurzeit noch ein erster experimenteller Nachweis.

1.2. Der International Linear Collider (ILC)

1.2.1. Motivation für einen Linearcollider

Die Werkzeuge der Teilchenphysik bei der Erzeugung und Untersuchung neuer Teilchen sind Teilchenbeschleuniger und die dazugehörigen Kollisionsexperimente. Die meisten großen Teilchenbeschleuniger der jüngeren Vergangenheit, z.B. LEP am CERN in Genf, Tevatron am Fermilab in Chicago oder HERA und PETRA am DESY in Hamburg, waren Ringbeschleuniger, in denen die Teilchen auf kreisförmigen Bahnen beschleunigt und an bestimmten Kreuzungspunkten zur Kollision gebracht wurden. Der Vorteil einer solchen Beschleunigergeometrie ist, dass die Teilchen die kreisförmige Beschleunigungsstrecke mehrmals durchlaufen können, bevor sie zur Kollision gebracht werden, was u.a. den Materialaufwand für die Beschleunigerstrukturen reduziert. Allerdings bringt diese Geometrie auch Nachteile mit sich: Um die beschleunigten Teilchen auf der Kreisbahn zu halten, müssen sie ständig von starken Magneten abgelenkt werden. Dabei geben sie, wie jede beschleunigte Ladung, Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung (Synchrotronstrahlung) ab, was bei jedem Umlauf im Beschleuniger zu einem Energieverlust ΔE führt, für den nach [6] gilt:

$$\Delta E \propto \left(\frac{E}{m}\right)^4 \cdot \frac{1}{R}. \quad (1.1)$$

Dabei ist E die Energie des Teilchens, m dessen Ruhemasse und R der Radius des Beschleunigers. Dieser Energieverlust muss ständig ausgeglichen werden und führt zu einer maximalen Energie, bei der das Teilchen bei einem Umlauf genau soviel Energie verliert wie es durch die Beschleunigerstrukturen aufnimmt. Um den Energieverlust zu verringern und damit die Maximalenergie zu erhöhen, kann man zwei Parameter in (1.1) verändern, R und m . Was R anbetrifft, so wurde bereits mit dem LEP (Umfang 27 km) die Grenze des wirtschaftlich Machbaren erreicht, es bleibt also nur übrig, m zu erhöhen. Dieser Ansatz wird etwa bei dem kürzlich angelaufenen LHC, dessen Umfang dem von LEP entspricht, verfolgt, bei dem Protonen zur Kollision gebracht werden. Da Protonen etwa 2000 mal schwerer sind als die beim LEP beschleunigten Elektronen und Positronen und die Masse in (1.1) in der vierten Potenz eingeht, kann der Energieverlust signifikant reduziert werden, so dass der LHC bei Protonkollisionen eine maximale Schwerpunktsenergie von 14 TeV erreicht (zum Vergleich: LEP erreichte in der letzten Ausbaustufe bei Elektron-Positron-Kollisionen eine maximale Schwerpunktsenergie von 209 GeV). Bei der Beschleunigung von Protonen lassen sich also hohe Energien erzielen, bei der Kollision handelt man sich jedoch Probleme ein: Da Protonen im Gegensatz zu Elektronen und Positronen keine elementaren Teilchen sind, sondern aus Quarks (und den sie verbindenden Gluonen) bestehen, ist die Energie der tatsächlich miteinander wechselwirkenden Teilchen unbekannt. Zusätzlich treten bei jeder Kollision unerwünschte und uninteressante Untergrundreaktionen auf, die die Rekonstruktion interessanter Ereignisse erschweren. Man geht derzeit davon aus, dass am LHC

die Existenz des Higgs-Bosons und weiterer möglicher SUSY-Teilchen nachgewiesen werden kann – natürlich nur, falls sie überhaupt existieren –, doch die präzise Vermessung dieser Teilchen gestaltet sich aufgrund der gerade genannten Effekte schwierig.

Für diese Präzisionsmessungen ist daher, sozusagen als „Nachfolger“ des LHC, ein Elektron-Positron-Linearcollider geplant, der die Ergebnisse der Messungen am LHC ergänzen und erweitern soll. Der im Folgenden beschriebene International Linear Collider (ILC) stellt – neben dem am CERN erarbeiteten Compact Linear Collider (CLIC) – den derzeit am intensivsten verfolgten Vorschlag für einen solchen Linearcollider dar.

1.2.2. Der ILC als vorgeschlagener Linearcollider

In Abschnitt 1 wurde bereits ein kurzer Überblick über die Geschichte des ILC gegeben, der an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden soll. Vielmehr soll im folgenden Abschnitt kurz auf die geplanten Technologien für den Beschleuniger eingegangen werden, wie sie im ILC Reference Design Report (RDR, [7], [8], [9], [10]) beschrieben werden. Es wird derzeit angestrebt, dem im August 2007 veröffentlichten RDR 2012 einen ausführlicheren und tiefergehenden Technical Design Report (TDR) folgen zu lassen, auf dessen Grundlage die Bauarbeiten beginnen können. Der geplante Aufbau des ILC ist in Abb. 1.2 schematisch dargestellt und wird im Laufe dieses Abschnitts näher erläutert.

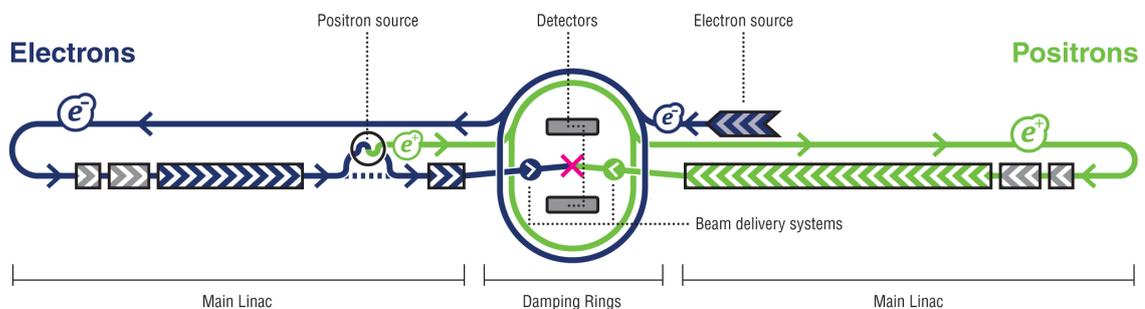


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des geplanten Elektron-Positron-Linearcolliders ILC [<http://www.interactions.org>].

Das gesamte Design des ILC ist darauf ausgerichtet, die vom International Committee for Future Accelerators (ICFA) festgelegten Parameter [11] zu erfüllen. Die wichtigsten dieser Parameter sollen im Folgenden kurz erwähnt werden.

Die maximal erreichbare Schwerpunktsenergie bei Elektron-Positron-Kollisionen soll bei 500 GeV liegen mit einer maximalen Luminosität¹ von $2 \cdot 10^{34} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$, wobei die

¹Die Luminosität \mathcal{L} ist eine charakteristische Größe für die Effizienz eines Teilchenbeschleuni-

Luminosität über die ersten vier Jahre des Betriebs integriert 500 fb^{-1} betragen soll. Der Elektronenstrahl soll eine Polarisation von mindestens 80 % aufweisen. Energie und Polarisation des Strahls müssen stabil und präzise mit einer maximalen Abweichung von 0,1 % sein, und beide Parameter müssen auch mit dieser Genauigkeit gemessen werden können (diese Voraussetzung ist insbesondere für die geplanten, präzisen Vermessungen eventuell am LHC gefundener, neuer Teilchen nötig). Nicht zuletzt soll der Wechselwirkungsbereich des Beschleunigers Platz bieten für zwei verschiedene Experimente, um unabhängige und sich gegenseitig ergänzende Messungen zu ermöglichen. Dabei können entweder zwei verschiedene Kollisionspunkte geschaffen werden, oder beide Experimente können sich einen einzelnen Kollisionspunkt teilen. Für dieses „Push-Pull-Szenario“, dessen Machbarkeit derzeit Gegenstand der Forschung ist, wird gefordert, dass die Experimente innerhalb von maximal einer Woche getauscht werden können.

Wie bereits weiter oben beschrieben, wurde 2004 vom ITRP vorgeschlagen, dass der in Planung befindliche Linearbeschleuniger zur Erfüllung der gerade beschriebenen Parameter auf der für das TESLA-Projekt am DESY entwickelten SCRF-Beschleunigertechnologie (SCRF: Superconducting Radio-Frequency) basieren sollte. Kernstück dieser Technologie sind 1,3 GHz-9-Zellen-Niob-Kavitäten (Abb. 1.3 (a)), in denen die Teilchenstrahlen mittels hochfrequenter elektromagnetischer Felder beschleunigt werden. Da die supraleitenden Kavitäten eine Betriebstemperatur von 2 K benötigen, werden sie mit flüssigem Helium auf diese Temperatur heruntergekühlt. Jeweils 8 Kavitäten sowie die für die Kühlung notwendige Technik werden dabei zu einem Kryomodul zusammengefasst (Abb. 1.3(b)). Dieselbe Technologie kommt derzeit am DESY sowohl bei dem bereits betriebenen Freie-Elektronen-Laser FLASH als auch bei dem gerade im Aufbau befindlichen Europäischen Röntgenlaser X-FEL zum Einsatz, so dass diese Technologie einem eingehenden Praxistest unterzogen werden kann.

Beim ILC bilden die gerade beschriebenen Beschleunigerstrukturen den Main Linac (Main Linear Accelerator), in dem die zu kollidierenden Elektronen und Positronen mit einem durchschnittlichen Beschleunigungsgradienten von $31,5 \frac{\text{MeV}}{\text{m}}$ auf ihre Endenergien von jeweils 250 GeV beschleunigt werden. Vor dem Eintritt in den Main Linac durchlaufen die Teilchen jedoch, wie in der schematischen Darstellung des Aufbaus des ILC in Abb. 1.2 abgebildet, noch weitere Beschleunigerstrukturen, die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in [9].

Die zu beschleunigenden Elektronen werden mittels eines laserbetriebenen Photoinjektors erzeugt, bei dem ein Target mit 2 ns-Laserpulsen mit hoher Intensität beschossen wird. Anschließend werden die dadurch ausgelösten Elektronen mit elektromagnetischen Feldern gesammelt und zu „Bündeln“ (Bunches) mit je $2 \cdot 10^{10}$

gers bei Teilchenkollisionen. Ist der Wirkungsquerschnitt σ für den zu untersuchenden Prozess bekannt, so lässt sich mittels $\dot{N} = \sigma \cdot \mathcal{L}$ die erwartete Ereignisrate \dot{N} bestimmen.

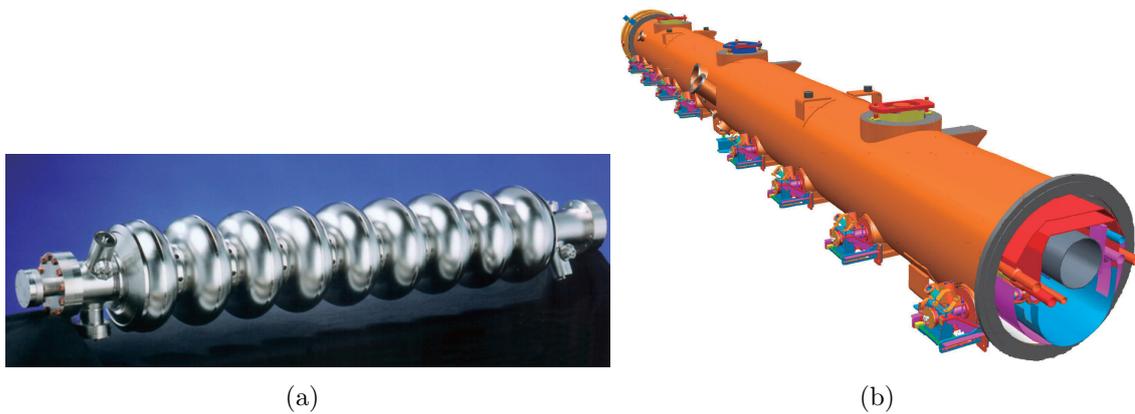


Abbildung 1.3: (a) Eine 1,3 GHz-9-Zellen-Niob-Kavität, wie sie zur Beschleunigung des Elektronen- bzw. Positronenstrahls beim ILC eingesetzt werden soll; (b) CAD-Zeichnung eines Kryomoduls, in dem 8 Niob-Kavitäten sowie die nötige Kühltechnik zu einem Modul zusammengefasst sind; [7].

Elektronen zusammengefasst. Da die Bunches bei der Produktion nicht die nötige Teilchendichte bzw. Emittanz² aufweisen, um innerhalb des Detektors genug Teilchenkollisionen zu produzieren, werden sie nach einer Vorbeschleunigung auf 5 GeV in einen Damping Ring – von denen es zwei gibt, einen für Elektronen und einen zweiten für Positronen – geführt. Hier werden die Bunches in „Wiggeln“ zur Aussendung von Photonen angeregt, wodurch sie kompakter werden, die Emittanz sinkt also. Nachdem die Bunches den Damping Ring verlassen haben, werden sie in den Main Linac geführt, in dem sie auf ihre Endenergie beschleunigt werden. Bevor sie diese Energie jedoch erreichen, wird der Strahl durch einen Undulator geleitet, in dem die Elektronen auf gebogenen Bahnen zur Aussendung von Photonen angeregt werden. Während die Elektronen wieder zurück in den Main Linac geleitet werden, werden die Photonen gesammelt und auf ein Titan-Target geschossen, in dem sie Elektron-Positron-Paare erzeugen. Die so erzeugten Positronen werden wiederum gesammelt und ebenso wie die Elektronen zuvor zu Bunches zusammengefasst, anschließend vorbeschleunigt, in einen Damping Ring geleitet und schließlich im Positronen-Main-Linac auf die Endenergie beschleunigt, bevor sie in der Mitte des Linearcolliders mit dem gegenläufigen Elektronenstrahl zur Kollision gebracht werden. Diese Kollisionen werden schließlich mit den um den Kollisionspunkt angeordneten Detektorsystemen vermessen.

Insgesamt kommt der ILC damit auf eine Gesamt-Länge von etwa 31 km. Es gibt bereits jetzt schon Szenarien, die einen späteren Ausbau auf eine maximale Schwer-

²Die Emittanz ist ein Maß für das von einem Teilchenstrahl im Phasenraum eingenommene Volumen. Ein Teilchenstrahl aus nahe beieinanderliegenden Teilchen mit gleichen Impulsen hat eine niedrigere Emittanz als ein Teilchenstrahl aus weiter entfernten Teilchen mit unterschiedlichen Impulsen.

punktsenergie von 1000 GeV vorsehen, wobei sich hier der modulare Aufbau des Beschleunigers auszahlt, denn zur Erhöhung der maximal möglichen Schwerpunktsenergie kann einfach der Main Linac um eine entsprechende Anzahl von Kryomodulen erweitert werden. Weitere Szenarien sehen z.B. auch den Umbau in einen Elektron-Elektron-, Elektron-Photon- oder Photon-Photon-Collider vor.

1.2.3. Das ILD-Detektorkonzept für den ILC

Die Bandbreite an physikalischen Fragestellungen, auf die der ILC Antworten liefern soll, stellt auch besondere Anforderungen an die Detektoren, die die Teilchenkollisionen vermessen und dabei das Potential des ILC so weit wie nur möglich ausnutzen sollen. In der letzten Dekade haben sich aus den Arbeiten verschiedener Arbeitsgruppen insgesamt vier Detektorkonzepte für den ILC herauskristallisiert [10]. Jedes dieser Detektorkonzepte besitzt den bekannten und bewährten zwiebelschalenartigen Aufbau, bei dem die einzelnen Detektorsysteme in Lagen um den Kollisionspunkt angeordnet sind, um so eine fast komplette Raumwinkelabdeckung zu erreichen. Die einzelnen Konzepte unterscheiden sich teilweise deutlich, was Abmessungen, Magnetfeld und verwendete Detektortechnologien angeht, was jedoch durchaus erwünscht ist, da die beiden schlussendlich verwirklichten Konzepte möglichst komplementär sein und sich so ergänzen sollen, um die Messergebnisse durch Kombination der Messungen beider Detektoren verlässlicher zu gestalten. Im Folgenden sollen nur zwei der vier Konzepte kurz beschrieben werden, für die beiden verbleibenden Konzepte (Silicon Detector (SiD) und 4th Concept) sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Publikationen verwiesen ([12], [13]).

Bei den beiden hier beschriebenen Konzepten handelt es sich um das vor allem von europäischen Arbeitsgruppen verfolgte Large Detector Concept (LDC) [14] und das japanische Konzept Global Large Detector (GLD) [15]. Zwischen beiden Konzepten bestehen große Ähnlichkeiten, was die Wahl der einzelnen Detektortechnologien angeht, und so erscheint es nur folgerichtig, dass die betreffenden Arbeitsgruppen derzeit versuchen, beide Konzepte zu einem einzigen zu vereinen: dem International Large Detector (ILD). Bis dato wurde jedoch noch keine vollständige Beschreibung des ILD-Detektorkonzeptes veröffentlicht, abgesehen von einem Parameterdokument für Detektorsimulationen [16], das jedoch ständigen Änderungen unterliegt. Eine erste vollständige Beschreibung des Konzeptes auch im Hinblick auf die geplanten Technologien wird voraussichtlich erst mit dem Letter of Intent³ für den ILD veröffentlicht. Daher beziehen sich die folgenden Beschreibungen lediglich auf die bereits bestehenden Konzepte LDC und GLD.

³Im Oktober 2007 bat das International Linear Collider Steering Committee (ILCSC) die bestehenden Detektorkonzeptgruppen, einen Letter of Intent (LoI) zu verfassen, der unter anderem eine detaillierte Beschreibung des Detektorkonzeptes enthalten soll. Auf Grundlage dieser LoIs wird dann entschieden, welche beiden Detektorkonzepte für den ILC schlussendlich in Frage kommen.

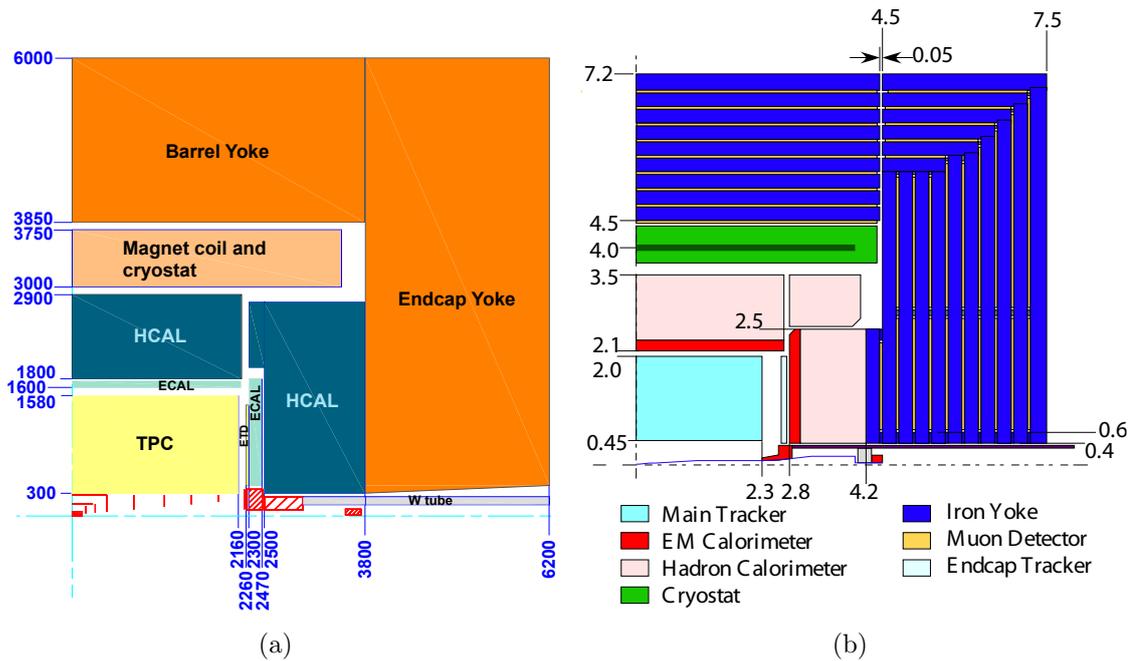


Abbildung 1.4: Schematische und nicht vollständige Darstellung des Aufbaus der Detektorkonzepte LDC (a) und GLD (b); Dimensionsangaben bei (a) in mm, bei (b) in m; [7].

In Abb. 1.4 sind schematisch je ein Quadrant des LDC- und des GLD-Detektorkonzeptes dargestellt. Man erkennt deutlich, dass beide Konzepte von der Anordnung der einzelnen Detektorelemente her sehr ähnlich sind und sich lediglich in den Dimensionen unterscheiden. Beide Konzepte setzen auf eine großvolumige TPC als zentralen Spurdetektor, gefolgt von elektromagnetischen Kalorimetern (ECAL, bei beiden Konzepten aus abwechselnden Lagen von Szintillatoren und Wolfram-Absorbern aufgebaut) und hadronischen Kalorimetern (HCAL, ebenfalls aus Lagen von Szintillatoren bestehend, die sich allerdings mit Eisen-Schichten (LDC) bzw. Blei-Schichten (GLD) abwechseln). Um das HCAL angeordnet ist der supraleitende Magnet, der innerhalb des Detektors ein Magnetfeld von 4 T (LDC) bzw. 3 T (GLD) erzeugen soll. Das Eisen-Rückführjoch des Magneten, welches die äußerste „Schicht“ des Detektors bildet, dient bei beiden Konzepten durch den Einbau von Myonenkammern gleichzeitig auch als Myon-Detektor. Desweiteren besitzen beide Konzepte einen Silizium-Pixeldetektor als innersten, direkt um den Kollisionspunkt angeordneten Vertexdetektor sowie eine Vielzahl weiterer, kleinerer Detektorsysteme an verschiedenen Stellen des Detektors, auf die jedoch an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

1.3. Time Projection Chambers (TPCs)

Ebenso wie bei den Konzepten LDC und GLD, so ist auch für das aus diesen beiden Konzepten hervorgegangene ILD-Detektorkonzept eine Zeitprojektionskammer (Time Projection Chamber, TPC) als zentraler Spurdetektor vorgesehen. In den folgenden Abschnitten soll, aufbauend auf den theoretischen Grundlagen der Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie, die Funktionsweise einer TPC beschrieben werden, sowie die verschiedenen Gasverstärkungsmethoden wie Gas Electron Multiplier (GEM) oder MicroMEGAS und der kürzlich von der LCTPC-Kollaboration am DESY in Betrieb genommene Prototyp einer großen TPC (Large Prototype).

1.3.1. Theoretische Grundlagen

Grundlage eines jeden Teilchennachweises in einem Detektor ist die Wechselwirkung des nachzuweisenden Teilchens mit der Detektormaterie. Theoretisch eignet sich jede Form der Wechselwirkung als Basis für einen Detektor, und so existiert eine Vielzahl verschiedener Detektortypen für eine Vielzahl verschiedener Zwecke, beispielsweise Orts-, Energie- oder Impulsmessungen.

Im Falle einer TPC, bzw. im allgemeineren Fall einer Driftkammer, bilden Anregung und Ionisation der Atome bzw. Moleküle des Gases, mit dem die Kammer gefüllt ist, durch das nachzuweisende Teilchen die Grundlage des Teilchennachweises. Ein geladenes Teilchen, das die Driftkammer durchquert, gibt einen Teil seiner Energie in Stößen an die Atome bzw. Moleküle des Füllgases ab, die dadurch angeregt oder ionisiert werden. Allgemein wird der mittlere Energieverlust dE pro Wegstrecke dx in einem Medium beschrieben durch die Bethe-Bloch-Formel⁴:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z}{m_e c^2 \beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right], \quad (1.2)$$

wobei

- $\beta = \frac{v}{c}$ Verhältnis der Geschwindigkeit v des ionisierenden Teilchens zur Lichtgeschwindigkeit c ,
- n Elektronendichte des Mediums, beschrieben durch $n = \frac{N_A Z \rho}{A}$ mit N_A : Avogadro-Konstante; ρ : Dichte des Mediums; Z und A : Ladungs- bzw. Massenzahl des Mediums,
- z Ladungszahl des ionisierenden Teilchens,
- m_e Ruhemasse des Elektrons,

⁴Die hier angegebene Form der Bethe-Bloch-Formel entspricht der in der heutigen Literatur (z.B. [6], [17]) üblichen und unterscheidet sich damit teilweise von der ursprünglichen Form von Bethe [18].

I mittleres Anregungspotential des Mediums, für $Z > 1$ näherungsweise beschrieben durch $I = Z^{0,9} \cdot (16 \text{ eV})$.

Für geladene Teilchen mit Masse $m > m_e$ sind die Energieverluste durch Anregung und Ionisation die dominierenden Verlustprozesse, so dass (1.2) den Energieverlust in Materie für diese Teilchen sehr gut beschreibt. Für Teilchen mit Masse $m \leq m_e$ gilt (1.2) nicht mehr. Für solche Teilchen stellen Anregung und Ionisation aber auch nicht mehr die dominierenden Prozesse des Energieverlusts ins Materie dar. Stattdessen verlieren diese Teilchen ihre Energie hauptsächlich durch Bremsstrahlung, also Aussendung von Photonen bei Abbremsung im Coulombfeld der Atomkerne der Materie. Der Energieverlust durch Bremsstrahlung kann für Elektronen beschrieben werden durch

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}, \quad (1.3)$$

wobei die Strahlungslänge X_0 eine materialabhängige Konstante des Mediums darstellt [6]. In Abb. 1.5 ist der Energieverlust für verschiedene geladene Teilchen in Abhängigkeit vom Teilchenimpuls in einer Ar-CH₄-Gasmischung aufgetragen. Man erkennt, dass der Energieverlust für Elektronen deutlich von dem schwererer Teilchen abweicht. Zusätzlich ist zu erkennen, dass es sich um einen statistischen Prozess handelt. Genauere Berechnungen ergeben, dass die Abweichungen von dem durch (1.2) gegebenen mittleren Energieverlust Landau-verteilt sind [6]. Der für jede Teilchenart charakteristische Verlauf der Impuls-Energieverlust-Kurve legt zudem nahe, diesen zur Teilchenidentifikation zu nutzen, indem man den Energieverlust beim Durchgang durch den Detektor und zusätzlich den Impuls des Teilchens misst, etwa durch Anlegen eines Magnetfelds und Bestimmen des Krümmungsradius der Teilchenbahn.

Neutrale Teilchen entziehen sich den gerade beschriebenen Prozessen und damit auch dem direkten Nachweis in darauf basierenden Detektoren. Vielmehr müssen zuerst durch andere Prozesse sekundäre, geladene Teilchen erzeugt werden, die dann mit dem Detektor nachgewiesen werden können. Im Falle von Photonen – es kann sich hier sowohl um Photonen aus primärer ionisierender Strahlung handeln als auch um erst im Detektor durch Bremsstrahlung erzeugte Photonen – sind dies im Wesentlichen die drei folgenden Prozesse.

Für Photonenergien $E_\gamma < 100 \text{ keV}$ dominiert der Photoeffekt. Hierbei wird das Photon komplett von einem Hüllenelektron der Materieatome absorbiert, wodurch das Elektron aus der Atomhülle ausgelöst wird und die Differenz zwischen der Photonenergie und der Bindungsenergie als kinetische Energie davonträgt. Für Photonenergien im MeV-Bereich dominiert der Compton-Effekt, also die Streuung der Photonen an quasi-freien Hüllenelektronen. Hierbei wird jedoch nur ein Bruchteil der Photonenergie auf das Elektron übertragen. Für noch höhere Energien ($E_\gamma \gg 1 \text{ MeV}$) dominiert die Paarerzeugung, bei der sich das Photon im Coulombfeld eines Kernes in ein Elektron-Positron-Paar umwandelt. Allen drei Prozessen

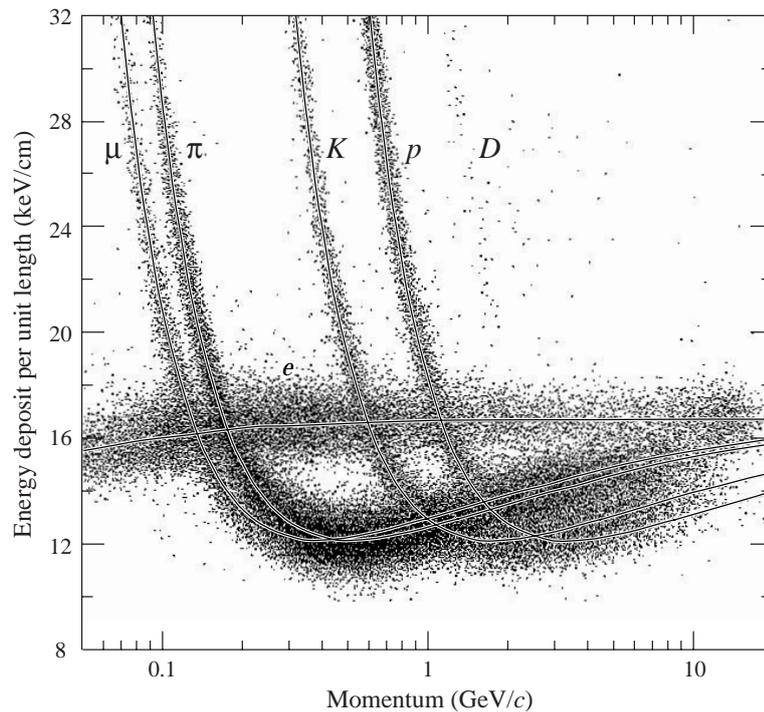


Abbildung 1.5: Spezifischer Energieverlust für verschiedene geladene Teilchen in Materie (hier: Ar-CH₄-Gasmischung): Elektronen (e), Myonen (μ), Pionen (π), Kaonen (K), Protonen (p) und Deuteronen (D) [19].

ist, wie bereits erwähnt, gemein, dass sie ein geladenes Teilchen, meist ein Elektron, erzeugen, das dann wieder mit den weiter oben genannten Wechselwirkungen nachgewiesen werden kann und so den indirekten Nachweis des Photons ermöglicht.

1.3.2. Funktionsweise einer TPC

Prinzipiell besteht eine TPC aus einem meist zylindrischen, mit einem Gas gefüllten „sensitiven“ Volumen. Auf der einen Stirnseite befindet sich eine Kathode, auf der anderen eine Anode, auf der zudem die Auslesestrukturen angebracht sind, und zwischen Anode und Kathode wird ein elektrisches Feld angelegt.

Das Funktionsprinzip einer TPC ist in Abb. 1.6 dargestellt. Ein geladenes Teilchen, das das sensitive Volumen der TPC durchquert, erzeugt gemäß der im vorigen Abschnitt genannten Prozesse entlang seiner Bahn Elektron-Ion-Paare. In dem elektrischen Feld, das die Kammer ausfüllt, driften die Elektronen nun in Richtung der Anode und werden mittels der dort angebrachten Auslesestruktur registriert. Diese Auslesestruktur ist in der Regel in einzelne Pads segmentiert, so dass aus den auf diesen Pads deponierten Ladungsmengen eine zweidimensionale Projektion der Teilchenspur auf die Ausleseebene (xy - bzw. $r\phi$ -Ebene, je nach Segmentierung der

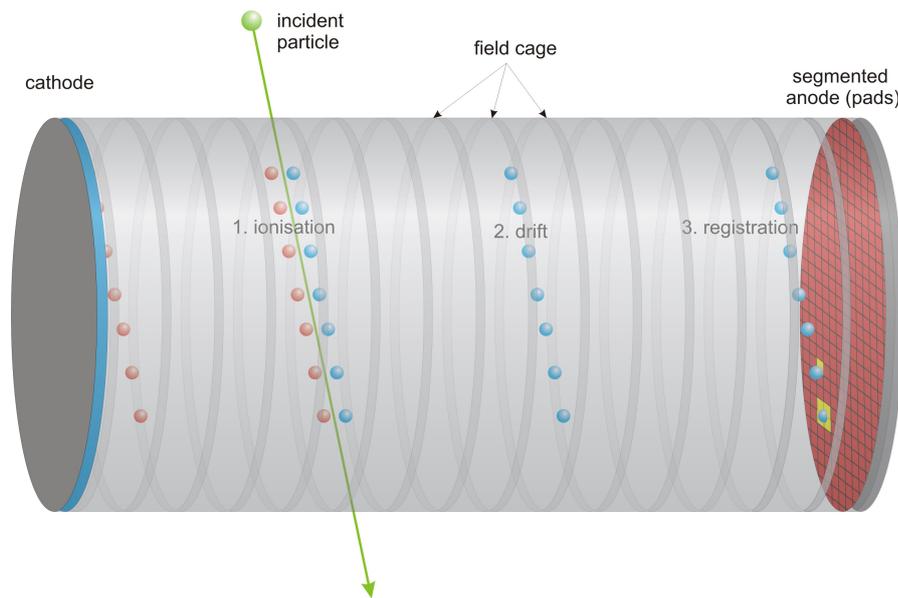


Abbildung 1.6: Funktionsprinzip einer TPC [<http://www-flc.desy.de/>].

Auslesepads) rekonstruiert werden kann. Die dritte Koordinate – die z -Koordinate in Längsrichtung der TPC – der einzelnen Spurpunkte kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird über eine zusätzliche Messung der Driftzeit der in der TPC erzeugten Elektronen rekonstruiert. Hierzu ist vor allem die Kenntnis der genauen Driftgeschwindigkeit der Elektronen entscheidend, die von dem verwendeten Füllgas sowie von den angelegten elektrischen und magnetischen Feldern abhängt. Damit die Driftgeschwindigkeit über die gesamte Driftstrecke hinweg konstant bleibt, ist ein hochgradig homogenes elektrisches Feld nötig, das von Anode und Kathode alleine nicht erzeugt werden kann. Stattdessen ist das sensitive Volumen der TPC meist von einem Feldkäfig umschlossen, der aus senkrecht zum elektrischen Feld regelmäßig angeordneten Leiterstreifen besteht, zwischen denen jeweils Widerstände geschaltet sind. Dadurch erhält man entlang der Längsrichtung der TPC einen konstanten Abfall des Potentials und das Feld innerhalb der TPC ist homogen.

Die durch die Elektronen auf den Auslesepads deponierte Ladungsmenge reicht in der Regel jedoch nicht aus, um direkt ein verwertbares Signal zu erzeugen. Eine elektronische Verstärkung des Signals würde jedoch zuviel elektronisches Rauschen mit sich bringen, daher greift man auf einen anderen Verstärkungsmechanismus direkt im Gas zurück, die Gasverstärkung. Dazu wird vor der Ausleseebene eine weitere Ebene eingeführt, die Verstärkungsebene. Hier wird lokal ein sehr hohes elektrisches Feld (Größenordnung $10^4 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) erzeugt, so dass die driftenden Elektronen genug Energie aufnehmen können um nun ihrerseits weitere Gasatome zu ionisieren. Ist das angelegte Feld hoch genug, kann so eine Elektronenlawine ausgelöst werden, die auf den Auslesepads deponierte Ladung vervielfacht und führt zu einem verwertbaren Signal. Bisher wurden die zur Lawinenbildung nötigen Felder durch eine Anord-

nung von feinen Drähten vor den Auslesepads erzeugt. Mittlerweile existieren jedoch als Alternativen zu dieser Draht-Verstärkung zwei weitere, vielversprechende Gasverstärkungsmethoden, die derzeit intensiv erforscht werden: MicroMEGAS und Gas Electron Multiplier (GEM). MicroMEGAS wurden im französischen Forschungszentrum Saclay entwickelt und zum ersten Mal 1996 vorgestellt [20]. Bei dieser Methode der Gasverstärkung ist über der Ausleseebene im Abstand von $50 - 100 \mu\text{m}$ ein feinmaschiges Metallnetz ($3 \mu\text{m}$ dick, $17 \mu\text{m}$ breite Maschen) angebracht, auf dielektrischen Abstandhaltern, um einen konstanten Abstand zu gewährleisten. Zwischen dem Netz und der Ausleseebene ist ein elektrisches Feld von $30 - 80 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ angelegt, so dass die durch das Netz driftenden Elektronen dort eine Lawine auslösen können, die dann auf den Auslesepads registriert wird. Die dabei ebenfalls entstehenden Ionen werden von dem Netz aufgesammelt und driften nicht in das sensitive Volumen herein, so dass sich MicroMEGAS auch für hohe Teilchenflüsse eignet.

1.3.3. GEMs als für die ILD-TPC favorisierte Gasverstärkungsmethode

Ebenso wie MicroMEGAS sind auch GEMs eine Entwicklung der jüngeren Vergangenheit. Entwickelt in der Gas Detector Development Group (GDD) am CERN, wurden GEMs erstmals 1997 vorgestellt [21] und seither bereits in verschiedenen Großexperimenten der Teilchenphysik eingesetzt, etwa als Teil des Spurdetektors im HERA-B-Experiment am DESY oder im COMPASS-Experiment am CERN. Auch der Myon-Trigger im LHCb-Experiment am LHC wird neben konventionellen Drahtkammern auch auf GEMs basierende Gasdetektoren enthalten.

Prinzipiell bestehen GEMs aus einer dünnen ($50 \mu\text{m}$) Polyimid-Folie [22], die auf beiden Seiten mit Kupfer beschichtet ist. Die Dicke dieser Kupferschichten beträgt in der Regel $5 \mu\text{m}$. In die beschichtete Folie ist dann, meist über photolithographische Verfahren, eine regelmäßige Matrix aus Löchern geätzt, wodurch die Löcher eine doppelt-konische Form erhalten⁵. Abb. 1.7 zeigt zwei verschiedene Aufnahmen einer GEM-Folie. In der Elektronenmikroskop-Aufnahme ist deutlich die hexagonale Anordnung der Löcher zu erkennen. Diese Anordnung wird üblicherweise gewählt, obwohl auch andere Loch-Anordnungen (etwa quadratisch) realisiert werden können. Der Abstand der Lochmittelpunkte, der Pitch p , beträgt in der Regel zwischen 90 und $200 \mu\text{m}$, während der Durchmesser d eines Lochs üblicherweise zwischen 40 und $100 \mu\text{m}$ liegt. Um nun ein Maß für die von den Löchern eingenommene Fläche im Vergleich zu der gesamten Folienfläche (bzw. genauer zur „aktiven“ Fläche, also der mit Löchern versehenen Fläche; meist besitzen GEM-Folien noch einen nicht mit Löchern versehenen Rand) zu erhalten, nutzt man die optische Transparenz T_{opt} , die sich aus rein geometrischen Überlegungen für den Fall einer hexagonalen

⁵Mittlerweile existieren neben dem Ätzen der Löcher weitere Verfahren, z.B. Laser Drilling, bei denen die Löcher eine zylindrische Form erhalten.

Lochanordnung ergibt zu

$$T_{opt} = \frac{A_{Loch}}{A_{aktiv}} = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}p^2}. \quad (1.4)$$

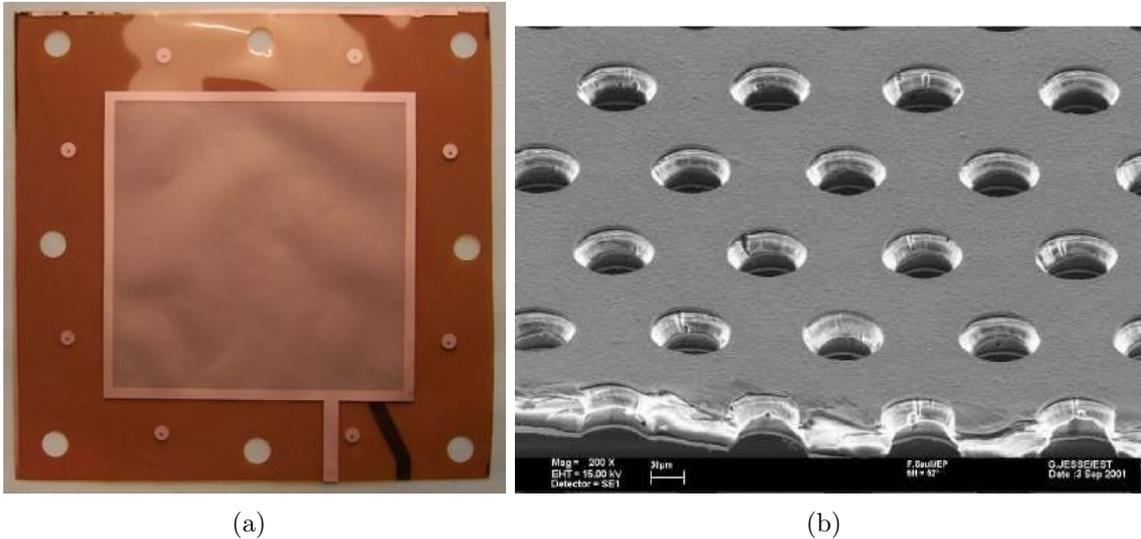


Abbildung 1.7: (a) Aufnahme einer ungerahmten GEM-Folie; (b) Elektronenmikroskopaufnahme einer GEM-Folie; [<http://gdd.web.cern.ch/>].

Legt man nun an die beiden kupferbeschichteten Flächen einer GEM-Folie eine Spannung (Größenordnung 10^2 V) an, so entsteht innerhalb der Löcher ein sehr hohes elektrisches Feld (Größenordnung $10^4 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$). Erreicht die Feldstärke innerhalb der Löcher einen von dem in der TPC verwendeten Füllgas abhängigen kritischen Wert, so können in das Loch tretende Elektronen Lawinen auslösen, ihre Zahl vervielfacht sich und die Gasverstärkung setzt ein. In Abb. 1.8 ist die typische Feldkonfiguration bei einer GEM-Folie dargestellt. Die Folie trennt hierbei einen Bereich niedrigerer elektrischer Feldstärke – die Driftregion, in der die durch ein das TPC-Volumen durchquerendes ionisierendes Teilchen entstehenden Elektronen entlang des elektrischen Feldes zur GEM-Folie driften – von einem Bereich etwas höherer Feldstärke – die Transferregion, durch die die durch die GEM vervielfachten Elektronen zur Ausleseebene gelangen können. Man erkennt, dass nicht alle Feldlinien des Driftfeldes in die GEM-Löcher gesammelt werden, sondern dass ein Teil auf der GEM-Folie selbst endet. Ebenso ist es möglich, dass eine Feldlinie nach dem Austritt aus dem Loch, also auf der anderen Seite der GEM-Folie endet. Die Elektronen, die dem Verlauf der Feldlinien folgen, gelangen also nicht alle in die Transferregion, sondern ein Teil geht auf der GEM-Folie verloren. Um diese Sachverhalte zu quantifizieren, führt man verschiedene Koeffizienten ein: die Sammeleffizienz (Collection Efficiency) C , die ein Maß für die Anzahl der in die Löcher gesammelten Elektronen im Verhältnis zur Gesamtzahl der auf die GEM treffenden Elektronen darstellt; die Verstärkung (Gain) G , der Vervielfachungsfaktor der Elektronen innerhalb der Löcher; und die Extraktionseffizienz (Extraction Efficiency) X , die das Verhältnis der Anzahl der

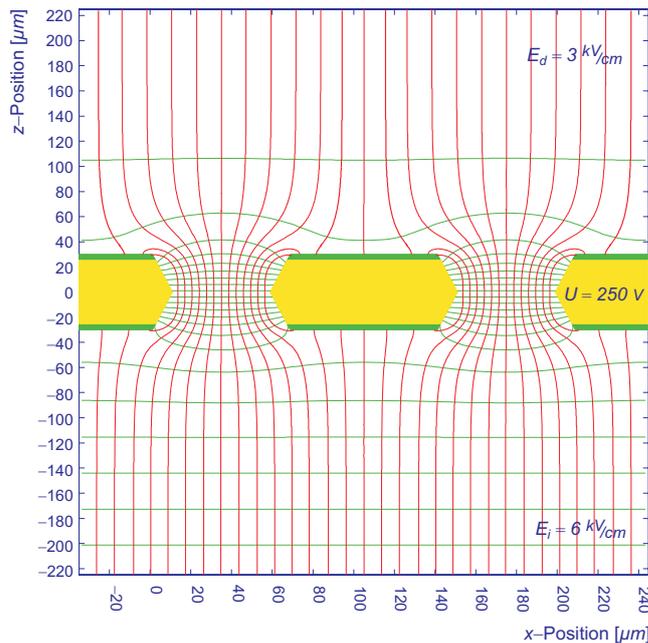


Abbildung 1.8: Simulierte Feldkonfiguration in den Löchern einer GEM-Folie: Feldlinien (rot bzw. vertikal) und Äquipotentiallinien (grün bzw. horizontal) [23].

aus den Löchern in die Transferregion tretenden Elektronen zur Gesamtzahl der in den Löchern befindlichen Elektronen beschreibt. Diese drei Koeffizienten hängen von der konkreten Feldkonfiguration und der geometrischen Struktur der GEM-Folie ab und ergeben zusammengenommen die effektive Verstärkung G_{eff} .

Für den laufenden Betrieb von GEM-basierten Detektoren sind effektive Verstärkungen in der Größenordnung von 10^4 nötig. Um eine solche Verstärkung mit einer einzigen GEM zu erreichen, sind hohe GEM-Spannungen nötig (Größenordnung 400 V), was auf Kosten der Betriebssicherheit (z.B. durch Funken (Sparks), kurzzeitige Entladungen, die die Oberfläche der GEM-Folie beschädigen und die Folie somit unbrauchbar machen können) und der Langzeitstabilität geht. Um dieses Problem zu lösen, nutzt man in der Regel Mehrfach-GEM-Strukturen. Hierbei werden mehrere GEMs in geringen Abständen hintereinander angebracht, so dass die Gasverstärkung nicht in einem Schritt, sondern in Stufen erfolgt, wodurch die Spannungen an den einzelnen GEMs niedriger und somit betriebssicherer gewählt werden können.

Ein weiterer Vorteil von solchen Mehrfach-GEM-Strukturen ist die intrinsische Unterdrückung der Ionen-Rückdrift. Bei der Gasverstärkung entstehen nicht nur die gewünschten Elektronen, sondern auch Ionen in großer Zahl, die dann, sofern nicht vorher abgefangen, zurück in das Driftvolumen gelangen und dort die Homogenität des elektrischen Feldes stören können. Um die Ionen vorher abzufangen, wurde bisher vor die Verstärkungsebene eine weitere Ebene, die Gating-Ebene, eingefügt,

die aus weiteren Drähten besteht, die jedoch nur direkt nach jedem Ereignis kurz unter Spannung gesetzt werden und so die zurück ins Driftvolumen driftenden Ionen abfangen können ohne den eigentlichen Betrieb des Detektors zu stören. Bei der ILD-TPC ist ein solches Gating aufgrund der hohen Ereignisraten nicht direkt möglich, so dass auf andere Methoden zur Unterdrückung der Ionen-Rückdrift zurückgegriffen werden muss. Mehrfach-GEM-Strukturen bieten hierbei eine elegante Möglichkeit der passiven Unterdrückung, da ein Teil der Ionen auf den GEM-Folien selbst gesammelt wird und somit nur ein Bruchteil überhaupt ins Driftvolumen gelangen kann, so dass eine zusätzliche Gating-Ebene möglicherweise nicht nötig ist. Ein weiterer Vorteil von GEMs gegenüber konventioneller Draht-Verstärkung – bei der die Drähte maximal in mm-Abständen gespannt werden können – liegt in der Feinheit der Lochmatrix, wodurch eine bessere Ortsauflösung gegeben ist. Diese und weitere Vorteile (Strahlenhärte, Kurz- und Langzeitstabilität, hohe Verstärkung bei guter Effizienz) sind der Grund dafür, dass für die ILD-TPC GEMs neben MicroMEGAS als eine Möglichkeit der Gasverstärkung in Betracht gezogen werden. Um jedoch endgültig zu klären, welche Technologie am Ende gewählt wird, sind noch weitere Forschungen nötig.

1.3.4. Der Large Prototype einer TPC am DESY

Auch wenn GEMs bereits in verschiedenen Großexperimenten der Teilchenphysik eingesetzt wurden, so bildet der Einsatz als Gasverstärkungsmethode in einer TPC neue Herausforderungen, nicht zuletzt durch die Dimensionen (die LDC- bzw. GLD-Konzepte sehen TPCs mit 1,5 m bzw. 2 m Radius vor, deren Stirnflächen möglichst komplett durch GEMs oder MicroMEGAS abgedeckt sein müssen). Derzeit baut die LCTPC-Kollaboration im Rahmen des EUDET-Programms⁶ einen großen Prototypen (Large Prototype) einer TPC, der in einem Elektronen-Teststrahl am DESY betrieben werden und unter anderem dabei helfen soll, die an kleineren TPC-Prototypen zum Betrieb von GEMs und MicroMEGAS gewonnenen Erkenntnisse auf eine große TPC zu übertragen. In diesem Abschnitt soll kurz der Aufbau des Large Prototype, gestützt auf den aktuellsten Statusbericht vom 19. Dezember 2008 [24], erläutert werden.

Der Large Prototype weist einen Durchmesser von 750 mm und eine Länge von 600 mm auf. Diese Maße sind so gewählt, dass die TPC genau in den supraleitenden Magneten, den PCMAG (Permanent Current Magnet, Abb. 1.10(a)), hereinpasst, wie in Abb. 1.9(a) dargestellt. Der PCMAG war ursprünglich als Ersatz-Magnet für das Ballon-Experiment BESS gebaut worden, so dass er vergleichsweise leicht (460 kg) und autark (u.a. integrierter Helium-Tank) konstruiert wurde. Der Magnet liefert ein Magnetfeld von maximal 1,25 T, wobei jedoch das Feld innerhalb des

⁶EUDET ist ein von der Europäischen Union im 6. Rahmenprogramm „Structuring the European Research Area“ gefördertes Programm, an dem sich derzeit 31 Partner- und 24 assoziierte Institute aus dem Gebiet der Hochenergiephysik beteiligen [25].

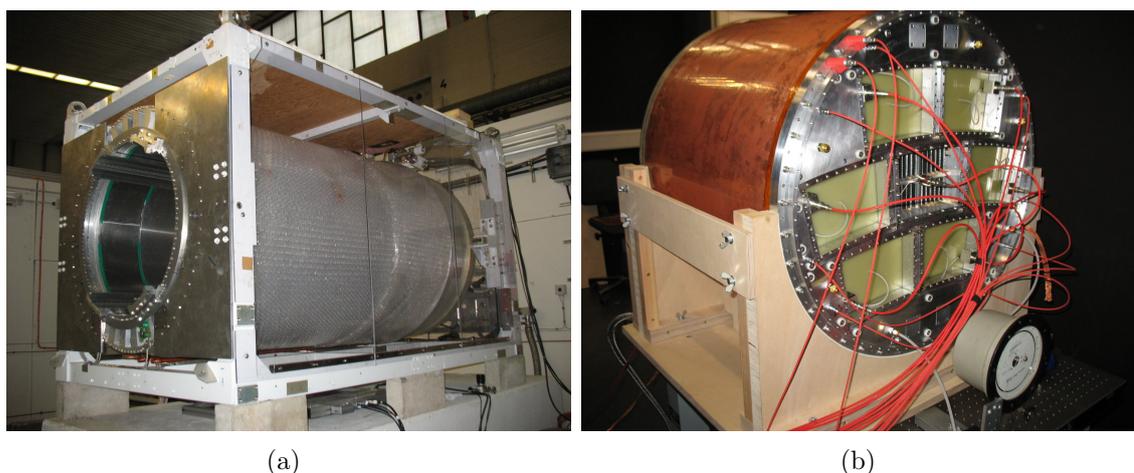


Abbildung 1.10: (a) Der PCMAG im Teststrahl-Bereich am DESY; (b) Der Feldkäfig für den Large Prototype mit bereits installierter Anoden-Endplatte; [26].

auch mit Elektronen aus dem Teststrahl⁷. Die Veröffentlichung der Ergebnisse dieser Messungen steht jedoch zurzeit noch aus. Weitere Messungen werden demnächst mit zusätzlichen GEM-Modulen bei verschiedenen Magnetfeldstärken durchgeführt. Im Rahmen des EUDET-Programms stehen der PCMAG und der Large Prototype den kooperierenden Instituten darüber hinaus für eigene Forschungen zur Verfügung.

1.3.5. Motivation für den Bau der Testbox

Die Spannungsversorgung der einzelnen Teile des Large Prototype, sowohl die Versorgung der Kathode mit Hochspannung (High Voltage, HV) als auch die Versorgung der einzelnen Module mit niedrigeren Spannungen, wird im Wesentlichen zentral gesteuert. Die Steuerung übernimmt dabei ein DOOCS-Server⁸, der so programmiert wird, dass er nicht nur die reine Spannungsversorgung übernimmt, sondern auch Sicherheitsfunktionen, etwa das automatische Herunterfahren der GEM-Spannungen bei Überschreiten eines vorher definierten Stroms, um die GEM-Folien nicht zu beschädigen.

Bevor die Steuerungs-Programme jedoch im Large Prototype eingesetzt werden können, müssen sie auf volle Funktionalität getestet werden. Hier besteht jedoch ein Problem: Ein rein „virtuelles“ Testen der Programme am Computer legt möglicherweise nicht alle Probleme offen und ein Testen am konkreten Aufbau könnte

⁷Der DESY-II-Teilchenbeschleuniger liefert für den Teststrahl Elektronen oder Positronen mit einer Energie von maximal 7 GeV, bei einer Intensität von $\approx 10^{10}$ Teilchen.

⁸DOOCS ist ein am DESY hauptsächlich für TESLA entwickeltes, verteiltes, objekt-orientiertes Steuerungssystem [27].

durch unerwartete Fehlfunktionen möglicherweise zu Beschädigungen des Aufbaus selbst führen. Insbesondere GEM-Folien zeigen sich in dieser Hinsicht problematisch. Wie bereits weiter oben beschrieben, können unter Spannung Entladungen bzw. Funken (Sparks) auftreten, die durch den dabei kurzzeitig fließenden, hohen Strom die Kupferoberfläche beschädigen oder sogar eine leitende Verbindung zwischen beiden Seiten der Folie herstellen können. Insbesondere wenn die GEM-Folien nicht in der empfohlenen, hochreinen Umgebung betrieben werden, können durch kleinste Staubablagerungen in den Löchern solche Entladungen auftreten, die die GEM-Folie komplett unbrauchbar machen können. Schon allein aus Kostengründen sollte daher die Gefahr von Beschädigungen minimiert werden, nicht zu vergessen der zusätzliche Zeit- und Arbeitsaufwand, den das Rahmen einer neuen GEM-Folie und der Einbau in den Detektor mit sich bringen.

Aus diesen Gründen bietet es sich an, den gesamten Aufbau nicht nur virtuell zu simulieren, sondern auch real durch einen entsprechenden Schaltkreis, so dass die Steuerungsprogramme getestet werden können ohne die bei einem Test am eigentlichen Aufbau auftretenden Risiken von Beschädigungen. In der vorliegenden Arbeit wurde in einem ersten Schritt untersucht, ob es überhaupt möglich ist, eine einzelne GEM durch einen Ersatz-Schaltkreis aus gewöhnlichen Widerständen und Kondensatoren zu simulieren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können dann dabei helfen, einen Ersatz-Schaltkreis für den gesamten Aufbau zu entwerfen.

2. Beschreibung der Testbox und der durchgeführten Messungen

Nachdem im vorigen Kapitel vor allem der größere Rahmen, in dem die vorliegende Arbeit erstellt wurde, thematisiert wurde, sollen nun im folgenden Kapitel die Messungen selbst und die dabei verwendeten Geräte beschrieben werden. Dazu gehören zum Einen die eigentliche Testbox und zum Anderen die verwendeten (Hoch-)Spannungsversorgungs- und Messgeräte. Zusätzlich werden die Tests vorgestellt, die zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der HV-Module für die zuerst benutzte HV-Versorgung durchgeführt wurden, sowie eine Netzwerk-Auslesemethode für eine zweite, ebenfalls bei den Messungen verwendete HV-Versorgung.

2.1. Die Testbox

In diesem Abschnitt soll nun das Kernstück dieser Arbeit, die entworfene und gebaute Testbox zur GEM-Simulation, eingehend beschrieben werden. Zweck dieser Testbox ist die Simulation einer GEM mittels handelsüblicher elektronischer Bauteile. Gemeint ist damit jedoch keine vollständige Simulation, die sämtliche Eigenschaften einer GEM-Folie bis ins Detail nachbildet, sondern eine an die gegebene Fragestellung – den Test von HV-Programmen mit der Testbox – angepasste Nachbildung der elektrischen Eigenschaften und des Verhaltens in einem Stromkreis.

Basis der Testbox bildet ein Leergehäuse (Abb. 2.1(a)) [28]. Obwohl solche Leergehäuse aus Thermoplast primär als Sicherungskästen gedacht sind, bietet das verwendete Gehäuse dennoch einige Vorteile für die Nutzung als Testbox im Sinne dieser Arbeit: Zum Einen betragen die nutzbaren Innenmaße $275 \text{ mm} \times 275 \text{ mm}$ (Außenmaße $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 214 mm Höhe), so dass genügend Platz auch für den Einbau von GEMs für vergleichende Messungen besteht. Zum Anderen besitzt das Gehäuse die Schutzklasse II und die Schutzart IP-65, ein Berühren der innenliegenden Teile ist also bei geschlossenem Deckel nicht möglich, das Gehäuse ist staubdicht und zusätzlich gegen den Eintritt von Wasser (Strahlwasser aus beliebigem Winkel) geschützt. Durch den transparenten Deckel ist zudem der Blick auf den Schaltkreis im Inneren des Gehäuses frei, so dass mögliche Fehlfunktionen, z.B. Rauchentwicklung durch defekte Kondensatoren oder Widerstände, frühzeitig erkannt und behoben werden können, bevor Schäden an den verwendeten Geräten auftreten.

Bestandteil des Leergehäuses ist auch eine Hartpapier-Platte, die auf die eigentliche Bodenplatte der Box geschraubt wird und die Grundplatte bildet, auf die der eigentliche Schaltkreis aufgebaut wird. Dazu wurde eine quadratische Lochmatrix in die Platte gebohrt (Lochabstand 35 mm), auf die anschließend mittels Plastik-Schrauben nicht-leitende Plastik-Abstandhalter aufgeschraubt wurden. Auf diese Abstandhalter kann nun mit Hilfe von Lötösen aus den einzelnen elektronischen

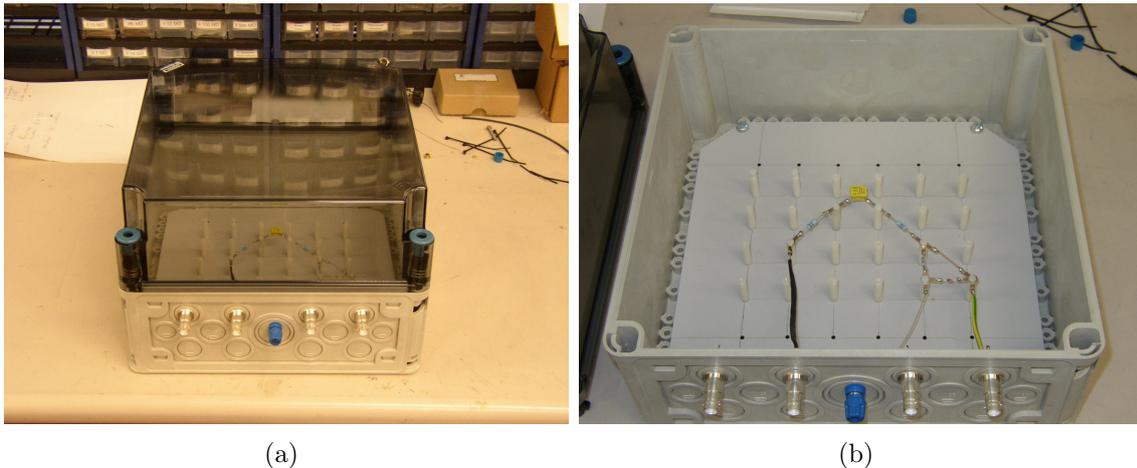


Abbildung 2.1: Bilder der Testbox: (a) Außenansicht, (b) Innenansicht der ersten Ausführung mit Kondensator; für weitere Bilder der Testbox siehe Anhang B.

Bauteilen der Schaltkreis aufgebaut werden. Eine solche „halb-fliegende“ Konstruktion des Schaltkreises besitzt gegenüber einer festen Konstruktion, bspw. mit Leiterplatten, den Vorteil einer hohen Flexibilität: Die einzelnen Bauteile müssen nur einmal auf die Lötösen gelötet werden und können dann beliebig zu Schaltkreisen zusammengesetzt und auf die Abstandhalter aufgeschraubt werden. Dies war ein wichtiger Punkt bei den Planungen der Testbox, da für die verschiedenen Messungen unterschiedliche Schaltkreise benötigt wurden, die mit der gewählten, flexiblen Konstruktion ohne großen Zeitaufwand ineinander umgebaut werden konnten.

Zum Anschluss der Spannungsversorgungs- und Messgeräte während der durchgeführten Messungen wurde die Testbox mit insgesamt vier SHV-Anschlüssen sowie einer Bananenbuchse ausgestattet. Alle SHV-Anschlüsse besitzen eine gemeinsame Erdung, die zuerst durch ein einfaches Verbindungskabel hergestellt wurde, später jedoch durch eine mit Polyimidfolie beklebte Kupferfolie, an die auch die Abschirmungen der später verwendeten Koaxial-Kabeln angelötet wurden. Alle Anschlüsse sind zudem abgedichtet, so dass die Testbox trotz der für die Anschlüsse nötigen Bohrungen staubdicht bleibt.

In Abb. 2.2 sind die Schaltbilder dargestellt, die für die einzelnen Messungen realisiert wurden. Beide Schaltkreise können, wie abgebildet, sowohl mit einem Kondensator als auch mit einer GEM aufgebaut werden, das Schaltbild bleibt jeweils das gleiche. Da jedoch die Testbox über einen längeren Zeitraum hinweg entwickelt und benutzt wurde und dabei ständig modifiziert und verbessert wurde, unterscheidet sich die genaue Realisierung der Schaltbilder in der Testbox in einigen Punkten (z.B. durch die Verwendung von Koaxial-Kabeln anstelle von einfachen Kupferlitzen), so dass im Folgenden die einzelnen, bei den durchgeführten Messungen benutzten

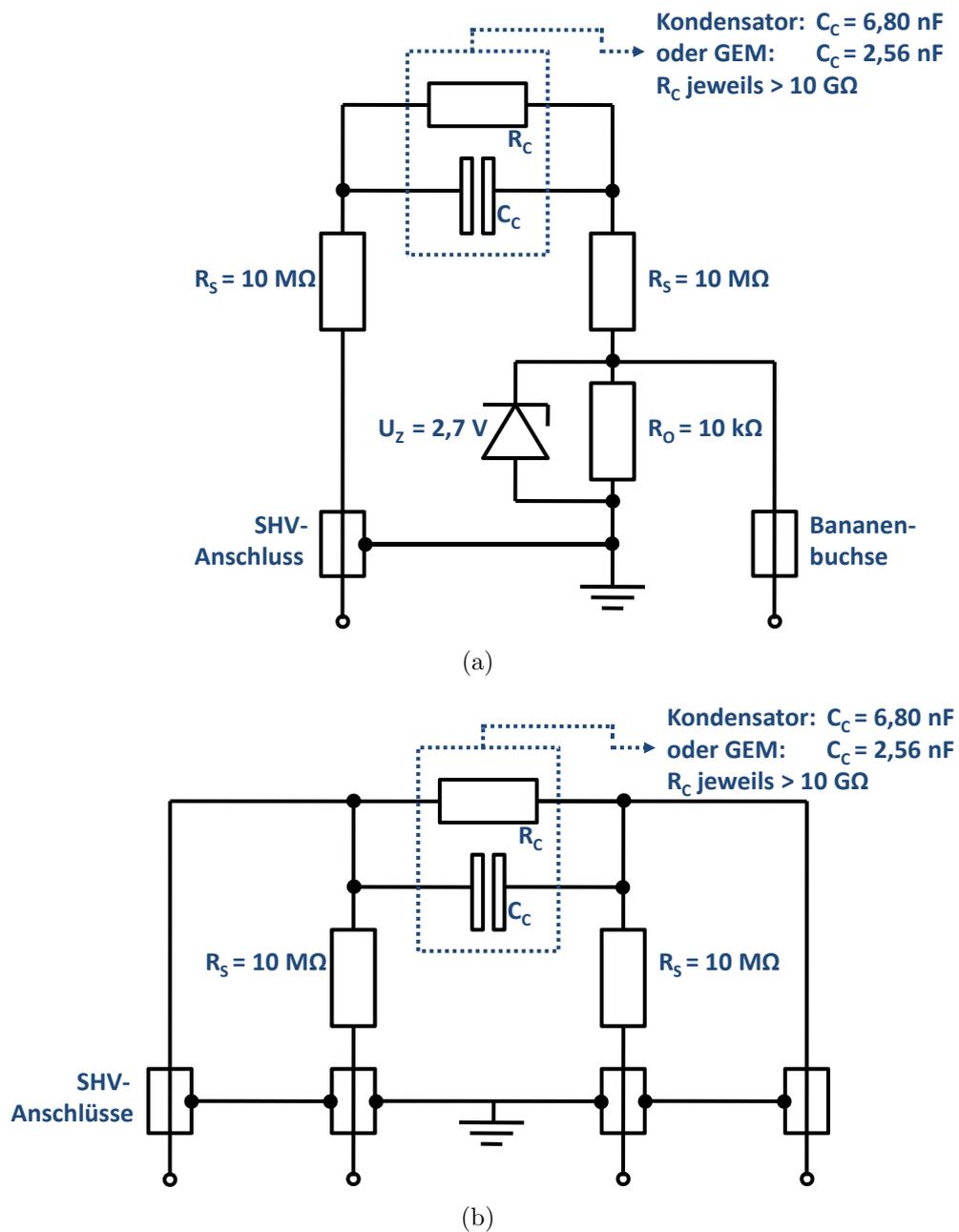


Abbildung 2.2: Schaltbilder der Testbox: (a) erste (mit Kondensator) und vierte (mit GEM) Ausführung, (b) zweite (mit Kondensator) und dritte (mit GEM) Ausführung.

Ausführungen der Testbox getrennt voneinander beschrieben werden.

Die erste Ausführung der Testbox (Abb. 2.1(b)), die gebaut wurde, ist der Schaltkreis aus Abb. 2.2(a) mit einem Kondensator. Wie dem Schaltbild zu entnehmen ist, wurde in dieser Ausführung nur ein SHV-Anschluss sowie die Bananenbuchse

genutzt. Die leitenden Verbindungen zwischen den Lötösen wurden hier durchgehend durch Drahtstücke hergestellt. Für die zweite Ausführung der Testbox (Abb. B.1(a)) wurden gemäß Abb. 2.2(b) alle vier SHV-Anschlüsse genutzt und die für diese Messungen nicht mehr benötigten Teile entfernt. Für die dritte Ausführung (Abb. B.1(b)) wurde die Testbox stärker verändert: Es wurde nicht nur der Kondensator gegen eine GEM ausgetauscht, sondern es wurde, wie bereits oben beschrieben, die gemeinsame Erdung der SHV-Anschlüsse verändert. Gleichzeitig wurden die bisher zur Verbindung der Anschlüsse mit den Bauteilen verwendeten Kupferlitzen durch Koaxial-Kabel ersetzt, um eine bessere Abschirmung der Signale zu erreichen. Die vierte und letzte Ausführung der Testbox (Abb. B.1(c)) stellt nun wieder eine Realisierung des Schaltkreises aus Abb. 2.2(a) dar, diesmal jedoch mit einer GEM. Aus Zeitgründen wurden, wie in Abb. B.1(c) zu sehen, bei dieser Ausführung jedoch die nicht genutzten SHV-Anschlüsse nicht komplett aus dem Schaltkreis entfernt, sondern blieben mit ihm verbunden. Effektiv genutzt wurden hier allerdings wie bei der ersten Ausführung nur ein SHV-Anschluss sowie die Bananenbuchse.

Bei der ersten und zweiten Ausführung wurde jeweils ein Polykarbonat-Folienkondensator [29] genutzt, der eine Kapazität von 6800 pF besitzt und für Gleichspannungen bis zu 400 V geeignet ist. Die Kapazität des Kondensators wurde dabei so gewählt, dass sie in der Größenordnung ungefähr der einer Standard-CERN-GEM entspricht, die ursprünglich für die vergleichenden Messungen vorgesehen war. Die Kapazität der GEM wurde durch folgende Vorbetrachtungen abgeschätzt: Idealisiert als Plattenkondensator betrachtet gilt für die Kapazität

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D} , \quad (2.1)$$

wobei D der Abstand der Kupferflächen, also die Dicke der Polyimidfolie, ist, und A die effektive Fläche der GEM, für die gilt:

$$A = A_{GEM} - A_{Loch} = A_{GEM} - A_{aktiv} T_{opt} , \quad (2.2)$$

mit A_{GEM} als Gesamt-Fläche der Folie, A_{aktiv} als aktive Fläche und T_{opt} als der weiter oben definierten optischen Transparenz. Setzt man nun in (2.1) und (2.2) die Werte für eine Standard-CERN-GEM (100 mm \times 100 mm aktive Fläche mit 4 mm Rand, Polyimid-Dicke 50 μ m, Lochdurchmesser 70 mm, Pitch 140 mm bei hexagonaler Anordnung⁹) und das verwendete Polyimid ($\epsilon_r = 3,4$ [30]) ein, so erhält man eine Kapazität von $C_{theo} = 5,66$ nF. Im Labor wurde experimentell die Kapazität einer solchen GEM bestimmt zu $C_{exp} = (5,7 \pm 0,1)$ nF, was innerhalb der 1 σ -Fehlergrenze mit dem berechneten Wert übereinstimmt. Aus Gründen der Verfügbarkeit wurde schließlich ein Kondensator mit einer Kapazität von 6,8 nF gewählt. Dieser Wert stimmt zwar nicht exakt mit der berechneten Kapazität überein, liegt jedoch in derselben Größenordnung, was für den Einsatz in der Testbox völlig ausreicht. Entgegen der ursprünglichen Planungen wurde dann allerdings für die vergleichenden

⁹Alle Angaben von <http://gdd.web.cern.ch/>.

Messungen keine Standard-CERN-GEM verwendet, sondern eine bereits fertig gerahmte GEM aus dem bereits beendeten HERA-B-Experiment, die deutlich kleiner ist ($56,8 \text{ mm} \times 98,2 \text{ mm}$ aktive Fläche ohne Rand), ansonsten aber dieselben Eigenschaften aufweist. Die berechnete Kapazität beträgt für diese GEM $2,59 \text{ nF}$. Dieser Wert liegt ebenfalls in derselben Größenordnung wie die Kapazität des verwendeten Kondensators, so dass die Messergebnisse immer noch verglichen werden können.

Der Widerstand der GEM ergibt sich aus ähnlichen Überlegungen. Die GEM wird dabei als idealer Leiter betrachtet, der Gesamt-Widerstand ist also die Summe aus den Widerständen von Kupfer und Polyimid, wobei jedoch der Widerstand des Kupfers gegenüber dem Widerstand des Polyimids vernachlässigt werden kann. Für den Widerstand gilt

$$R = \rho \frac{D}{A} . \quad (2.3)$$

Mit den oben genannten Werten und $\rho_{Polyimid} = 1,5 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ [30] erhält man für eine Standard-CERN-GEM $R_{theo} = 7,98 \cdot 10^{16} \Omega$. Hier fehlt jedoch ein experimenteller Vergleichswert, da mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten der Widerstand nur zu $R_{exp} > 10 \text{ G}\Omega$ bestimmt werden konnte. Der Widerstand der GEM spielt bei den durchgeführten Messungen allerdings nur eine untergeordnete Rolle und ist daher hier auch nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Wie den beiden Schaltbildern aus Abb. 2.2 zu entnehmen ist, wurden zusätzlich noch weitere Widerstände in die Testbox eingebaut: Zwei $10 \text{ M}\Omega$ -Widerstände zu beiden Seiten des Kondensators bzw. der GEM, die den fließenden Strom begrenzen, sowie bei der ersten und vierten Ausführung der Testbox noch ein $10 \text{ k}\Omega$ -Widerstand, über den die Spannung abgegriffen und auf einem Oszilloskop dargestellt wird. Bei diesen Ausführungen wurde zusätzlich noch zum Schutz des angeschlossenen Oszilloskops bei eventuellen Fehlfunktionen und damit verbundenen hohen Strömen eine Zener-Diode mit einer Durchbruchspannung von $2,7 \text{ V}$ eingebaut.

2.2. Spannungsversorgung

Zur Spannungsversorgung des Aufbaus wurde dieselbe HV-Versorgung gewählt, die auch beim Large Prototype eingesetzt wird [31]. Diese HV-Versorgung besitzt eine modulare Struktur, d.h. das 19"-Crate kann mit verschiedenen HV-Modulen mit unterschiedlichen Eigenschaften (positive/negative Spannung, verschiedene maximale Spannungen und Ströme, unterschiedliche Anzahl an HV-Kanälen) bestückt werden, so dass man im Einsatz sehr flexibel ist und mit demselben Crate z.B. die unterschiedlichen GEM-Module des Large Prototype gleichzeitig versorgen kann. Jeder Kanal auf jedem Modul lässt sich dabei separat einstellen und auslesen, entweder über ein spezifisches Netzwerk [32] oder direkt am Crate über ein eingebautes Display.

Da jedoch der zur Steuerung der HV-Versorgung über das spezifische Netzwerk nötige PCI-Controller während der Durchführung der Messungen noch nicht zur Verfügung stand, wurde für einen Teil der Messungen auf eine andere HV-Versorgung zurückgegriffen [33]. Diese HV-Versorgung unterscheidet sich von der gerade beschriebenen HV-Versorgung vor allem durch eine andere Modul-Form und eine verbesserte Steuerung über das eingebaute Display. Im Gegensatz zur vorher beschriebenen HV-Versorgung kann diese HV-Versorgung zudem noch direkt ohne zusätzlichen Controller an ein bestehendes Computer-Netzwerk angebunden werden – in diesem Fall das DESY-Netzwerk –, so dass sie mit entsprechenden Programmen theoretisch von jedem PC aus dem DESY-Netzwerk gesteuert werden kann (siehe dazu Abschnitt 2.3.1).

Zusätzlich wurde für einen Teil der Messungen noch ein Funktionsgenerator [34] verwendet, da mit den gerade beschriebenen HV-Versorgungen das Erzeugen einer periodischen Rechteck-Spannung, wie sie für diese Messungen benötigt wurde, nicht möglich war.

2.2.1. Funktionsüberprüfung der HV-Module

Da die zur Verfügung stehenden HV-Module für die zuerst verwendete HV-Versorgung nicht neu erworben wurden – im Gegensatz zu den HV-Modulen für die andere HV-Versorgung –, sondern aus den Beständen der HERMES-Gruppe des DESY Zeuthen übernommen wurden, war nichts über deren Funktion bekannt, so dass sie vor Durchführung der eigentlichen Messungen überprüft werden mussten. Im folgenden Abschnitt wird die dazu entworfene Test-Prozedur kurz vorgestellt und anschließend die Ergebnisse der Tests diskutiert.

Die Funktionsüberprüfung der HV-Module bezieht sich dabei jedoch nur auf ihre generelle Funktion, d.h. auf korrektes Ramping, also das korrekte Hochfahren der Spannung auf einen vorher eingestellten Wert, korrekte Spannungseinstellungen und

korrektes Tripping, also automatisches Abschalten des Kanals bei Überschreiten einer festgelegten Stromgrenze. Da bei den verwendeten HV-Modulen die einzelnen Kanäle nahezu vollständig unabhängig voneinander sind, musste jeder Kanal separat getestet werden. Die Test-Prozedur besteht aus 10 Schritten, die wie folgt durchgeführt werden:

1. Spannung für den zu testenden Kanal einstellen auf U_{set} , Ramping-Geschwindigkeiten einstellen auf $S_{up} = S_{down} = S$,
2. Kanal einschalten,
3. Ramping beobachten, erreichte End-Spannung U_{on} und fließenden Strom I_{on} protokollieren,
4. Kanal ausschalten,
5. Ramping beobachten, erreichte End-Spannung U_{off} und fließenden Strom I_{off} protokollieren,
6. Stromgrenze für den zu testenden Kanal einstellen auf einen Wert kleiner I_{on} ,
7. Kanal einschalten,
8. Tripping beobachten,
9. Kanal ausschalten,
10. Fortfahren mit dem nächsten Kanal.

Um die Spannung auf dem zu testenden Kanal sowie den fließenden Strom beobachten zu können, wurde während des Tests ein Digitalmultimeter an den jeweiligen Kanal angeschlossen, um einerseits den Stromkreis zu schließen und einen Strom messen zu können und andererseits die auf dem Display der HV-Versorgung angezeigten Spannungen gegenzuprüfen. Als Spannungs- und Ramping-Einstellungen wurden für die durchgeführten Tests $U_{set} = 300 \text{ V}$ und $S = 60 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ gewählt.

Die detaillierten Ergebnisse der Funktionsüberprüfungen finden sich in Tab. C.1 in Anhang C. Von den 23 getesteten Modulen sind 12 nicht verwendbar aufgrund verschiedener Fehler. Zusätzlich sind auf den als verwendbar eingestuften Modulen vereinzelt einzelne Kanäle nicht benutzbar, die übrigen Kanäle sind jedoch aufgrund der Unabhängigkeit der einzelnen Kanäle immer noch uneingeschränkt nutzbar. Dennoch ist die relativ hohe Ausfallquote von über 52% überraschend. Da Bedien- oder Einstellfehler ausgeschlossen werden können, sind die Fehler der einzelnen Module vollständig auf Defekte der Module zurückzuführen. Eine genauere Untersuchung der Module ist jedoch nötig, um festzustellen, ob eine Reparatur möglich ist. Da jedoch für die durchgeführten Messungen mit der Testbox und den Einsatz beim

Large Prototype genügend Module mit einer ausreichenden Gesamtzahl an HV-Kanälen verwendbar waren, wurde eine solche genauere Überprüfung vorerst nicht durchgeführt.

2.3. Messgeräte

Für die Messung von Strom und Spannung in den einzelnen Stromkreisen war zuerst geplant, die eingebauten Messfunktionen der HV-Versorgungen zu nutzen. Über das eingebaute Display sollten sich die an den einzelnen HV-Kanälen anliegenden Spannungen sowie die jeweils über die Kanäle fließenden Ströme mit einer nur vom verwendeten HV-Modul abhängigen Genauigkeit messen lassen, so dass zusätzliche Messgeräte nicht nötig gewesen wären. Während der Funktionsüberprüfung der HV-Module wurde jedoch festgestellt, dass die angezeigte Spannung und die tatsächlich anliegende Spannung um bis zu 11 V voneinander abwichen. Daher wurde für die Spannungsmessungen ein zusätzliches HV-Messgerät [35] verwendet. Dieses Messgerät bietet vier Messkanäle, von denen jedoch zwei defekt sind. Ein weiterer großer Nachteil bei diesem HV-Messgerät ist die nur vierstellige Anzeige, welche im verwendeten Spannungsbereich ($< 1,9$ kV) die gemessenen Spannungen nur auf bis zu ± 1 V genau anzeigen kann. Da dieses Messgerät jedoch das einzige war, das den für die durchgeführten Messungen benötigten hohen Innenwiderstand aufwies, musste es trotz der aufgeführten Nachteile benutzt werden.

Für einen Teil der Messungen wurde zudem ein Oszilloskop [36] verwendet. Dieses Oszilloskop bietet zwar keine direkte Anschlussmöglichkeit an einen PC zur Auswertung der Messwerte, doch die Messwerte können in verschiedenen Dateiformaten auf eine Diskette gespeichert und so manuell auf einen PC übertragen werden.

2.3.1. Netzwerk-Auslesemethode für HV-Versorgungen

Um Ramping-Messungen durchführen zu können, ist es notwendig, dass die fließenden Ströme und angelegten Spannungen nahezu kontinuierlich gemessen und gespeichert werden können. Zu diesem Zweck wurde eine eigens für die Verwendung beim Large Prototype programmierte Netzwerk-Auslesemethode verwendet [37]. Ein darauf basierendes Programm ist als Referenz in Anhang A.1 zu finden.

Dieses Programm stellt dabei Funktionen bereit, die über die in der HV-Versorgung integrierten Remote-Funktionen direkt auf die internen Strom- und Spannungswerte zugreifen, die auch auf dem integrierten Display angezeigt werden. Die so ausgelesenen Werte werden dabei in entsprechende Variablen gespeichert und können dann beliebig weiterverarbeitet werden. Zusätzlich ist eine Funktion integriert, die die Zeit zwischen dem Start des Programms und dem Auslesen der Werte misst.

Durch eine entsprechend gesetzte Schleife ist es so möglich, eine nahezu kontinuierliche Messung von Strom und Spannung durchzuführen. Die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten sind dabei durch die HV-Versorgung vorgegeben und betragen im Mittel ungefähr 5 ms.

Zusätzlich enthalten die Bibliotheken, auf denen das Programm basiert, noch Steuerungsfunktionen. So ist es nicht nur möglich, die Strom- und Spannungswerte auszulesen, sondern darauf basierend die Einstellungen für den betreffenden Kanal sofort zu verändern. Dadurch können z.B. automatische Sicherungsprogramme entworfen werden, die einzelne Kanäle gemäß vorher festgelegter Routinen ein- und abschalten und mit variablen Ramping-Geschwindigkeiten hoch- und herunterfahren können.

2.4. Beschreibung der Messungen

Um zu überprüfen, ob die Testbox die an sie gestellten Forderungen erfüllen kann, wurden mit ihr verschiedene Messungen durchgeführt. Diese Messungen, die in der vorliegenden Arbeit ausgewertet und verglichen werden, sollen im folgenden Abschnitt kurz beschrieben werden.

2.4.1. Bestimmung der Zeitkonstanten

In der ersten durchgeführten Messung sollten die Zeitkonstanten des aus Kondensator bzw. GEM und den ebenfalls in die Testbox eingebauten Widerständen bestehenden RC-Gliedes bestimmt werden, um so eine erste Aussage über die Vergleichbarkeit von Kondensator- und GEM-Aufbau treffen zu können, die dann durch weitere Messungen überprüft werden kann. Der für die Messung der Zeitkonstanten verwendete Aufbau ist in Abb. 2.3 schematisch dargestellt.

Die Verbindung zwischen Funktionsgenerator (BNC-Anschluss) [34] und Testbox (SHV-Anschluss) wurde mit einem eigens angefertigten Adapterkabel hergestellt, bei dem ein SHV-Stecker auf zwei Bananenstecker (Signal und Erde) geführt wird, die dann mit einem Bananenstecker-BNC-Adapter an den Funktionsgenerator angeschlossen werden. Auch das Oszilloskop [36] ist über einen Bananenstecker-BNC-Adapter und ein Kabel mit der Testbox verbunden (siehe dazu den Schaltkreis in Abb. 2.2(a)). Die direkte Referenz-Verbindung zwischen Funktionsgenerator und Oszilloskop wird mit einem normalen BNC-Kabel hergestellt.

Bei der Durchführung der Messungen wurde dann mit dem Funktionsgenerator ein definierter, periodischer Rechteckpuls an die Testbox angelegt und, als Referenz, auf einem zweiten Kanal auch direkt an das Oszilloskop. Gemessen wird dann die über den Messwiderstand R_O abfallende Spannung U_O . Da U_O dem fließenden Lade-

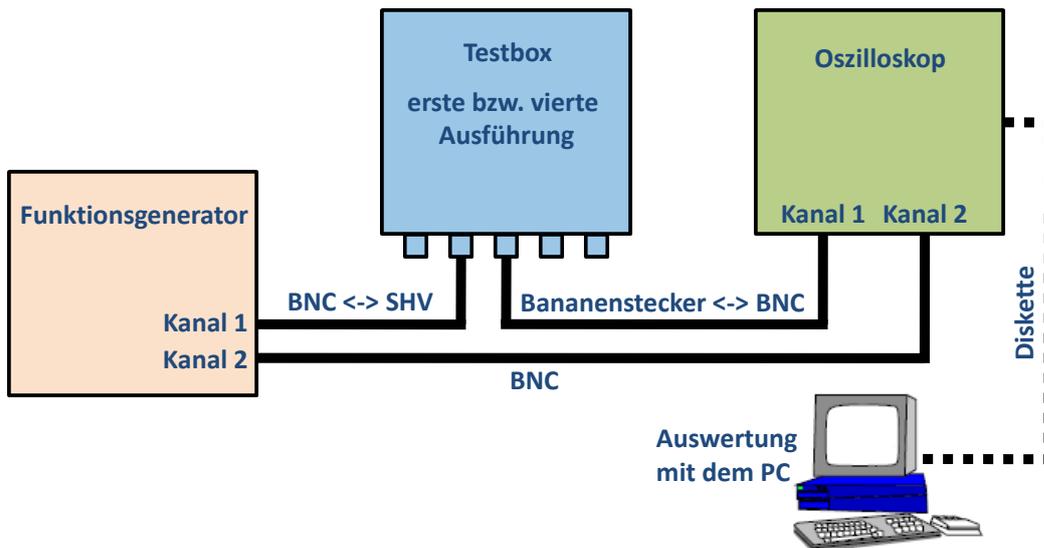


Abbildung 2.3: Blockdiagramm des Aufbaus für die Messung der Zeitkonstanten.

bzw. Entladestrom gemäß des Ohmschen Gesetzes direkt proportional ist, lassen sich somit aus dem (exponentiellen) Verlauf von U_O direkt die Zeitkonstanten für den Lade- bzw. Entladevorgang¹⁰ zu bestimmen. Der genannte Spannungsverlauf wird dazu vom Oszilloskop als Liste von Datenpunkten gespeichert, die anschließend zur Auswertung auf einen PC übertragen werden kann.

2.4.2. Spannungsmessungen

Nach der Bestimmung der Zeitkonstanten sollte mit den anschließenden Spannungsmessungen vor allem das Verhalten der Testbox in einem Stromkreis und der Einfluss der Testbox auf die zu messenden Ströme und Spannungen untersucht werden. Des Weiteren soll anhand dieser Messungen eine Kalibrierungskurve erstellt werden, da die reale Spannung von der an der HV-Versorgung eingestellten und von ihr auch angezeigten Spannung um bis zu 11 V abweicht. Eine bekannte Kalibrierungskurve würde es dann ermöglichen, genau die Spannung einzustellen, die an den angeschlossenen Geräten die gewünschte Spannung liefert.

Der verwendete Aufbau ist in Abb. 2.4 dargestellt. Zusätzlich wurde noch eine Vergleichsmessung ohne Testbox durchgeführt, hierbei wurden die Kanäle 1 und 4 des in die HV-Versorgung [31] eingebauten Moduls direkt mit den Kanälen 1 und 4

¹⁰Eine Unterscheidung von Lade- und Entladevorgang ist an dieser Stelle nötig, da der verwendete Schaltkreis mit der Zener-Diode ein asymmetrisches Bauteil enthält, dessen Verhalten von der Stromrichtung abhängt. Bei dem gegebenen Aufbau (siehe Abb. 2.2(a)) sollte daher die Zeitkonstante für den Ladevorgang höher sein als für den Entladevorgang.

des HV-Messgeräts [35] verbunden.

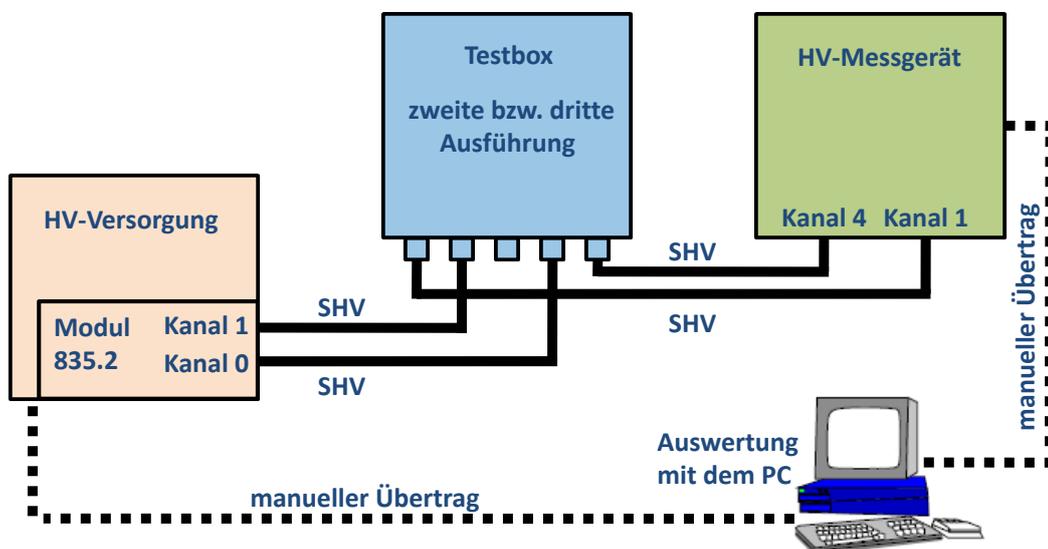


Abbildung 2.4: Blockdiagramm des Aufbaus für die Spannungsmessungen: Das Blockdiagramm zeigt den Aufbau mit Testbox, für die Messungen ohne Testbox wurden die Kanäle 1 und 0 des HV-Moduls direkt mit den Kanälen 1 und 4 des HV-Messgeräts verbunden.

Gemessen wurde die an den beiden Kanälen anliegenden Spannungen – also die an beiden Seiten des Kondensators bzw. der GEM anliegenden Spannungen – sowohl mit der internen Messfunktion der HV-Versorgung als auch mit dem HV-Messgerät. Diese Werte werden dann mit den eingestellten Spannungen verglichen. Diese Messungen wurden dreimal durchgeführt: Einmal mit der zweiten Ausführung der Testbox (Kondensator), danach mit der dritten Ausführung (GEM) und ein drittes Mal als Referenzmessung ohne Testbox. Diese Messungen wurden dann jeweils auch für verschiedene Spannungseinstellungen durchgeführt, so dass sich in der Auswertung durch Vergleich der Messungen schließlich einerseits eine Aussage über den Einfluss der Testbox auf die gemessenen Spannungen treffen, andererseits aber auch die oben angesprochene Kalibrierungskurve bestimmen lässt.

2.4.3. Ramping-Messungen

Zuletzt wurde noch eine Reihe von Ramping-Messungen durchgeführt, bei denen explizit untersucht wurde, wie sich die Testbox beim Hochfahren der Spannung verhält. Insbesondere sollte der beim Hochfahren fließende Strom gemessen werden, denn für einen realen GEM-Aufbau muss dieser begrenzt werden, um Beschädigungen der GEM-Folie durch Entladungen zu vermeiden. Mit der Testbox kann der Strom

vorher gemessen und für den realen Aufbau angepasst werden, so dass die Risiken minimiert werden.

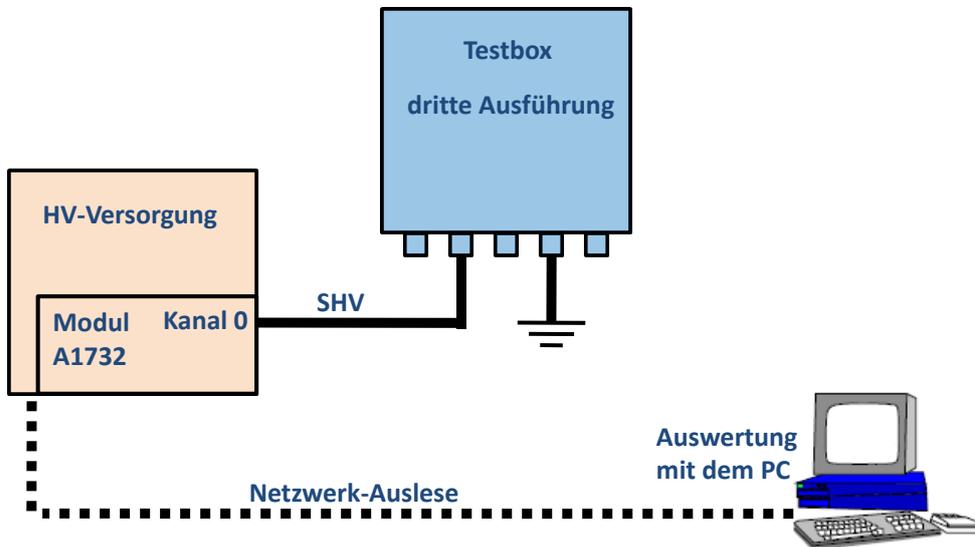


Abbildung 2.5: Blockdiagramm des Aufbaus für die Ramping-Messungen.

In Abb. 2.5 ist der bei diesen Messungen verwendete Aufbau schematisch dargestellt. Wie man sieht, ist nur ein SHV-Anschluss der Testbox – die Messungen wurden nur mit der dritten Ausführung der Testbox durchgeführt, also nur mit der GEM – an die HV-Versorgung angeschlossen, der andere SHV-Anschluss wurde mit einem eigens angefertigten SHV-Stecker geerdet, so dass eine Seite der GEM auf Erdpotential lag. Gemessen wurde mit diesem Aufbau mit Hilfe des oben beschriebenen Ausleseprogramms der im Stromkreis fließende Strom für verschiedene Ramping-Geschwindigkeiten.

Bei den gerade beschriebenen Ramping-Messungen wurde allerdings nicht die schon bei den Spannungsmessungen zuvor verwendete HV-Versorgung [31] benutzt, sondern eine neuere [33], vor allem da so auch die gleichzeitig entwickelte Netzwerk-Auslese für diese HV-Versorgung getestet werden konnte. Die Messungen wurden daher vollständig mit dieser Auslesemethode durchgeführt, der Quellcode des verwendeten Ausleseprogramms ist als Referenz beigefügt in Anhang A.1.

3. Messungen und Auswertungen

Im vorigen Kapitel wurden die für die durchgeführten Messungen verwendeten Geräte sowie die jeweiligen Aufbauten diskutiert. In diesem Kapitel soll nun die konkrete Durchführung der Messungen kurz beschrieben sowie die Messergebnisse ausgewertet werden, um anschließend die Ergebnisse zu diskutieren und zu vergleichen.

3.1. Bestimmung der Zeitkonstanten

Der für die Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten verwendete Aufbau wurde bereits in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Zur Durchführung der Messungen wurde mittels des Funktionsgenerators eine periodische (1 Hz) 20 Vpp-Rechteckspannung, wie in Abb. 3.1(a) dargestellt, an die Testbox angelegt. Die Steig- und Fallzeit der Spannungspulse liegt im ns-Bereich und ist daher vernachlässigbar gering im Vergleich zur Länge einer Periode.

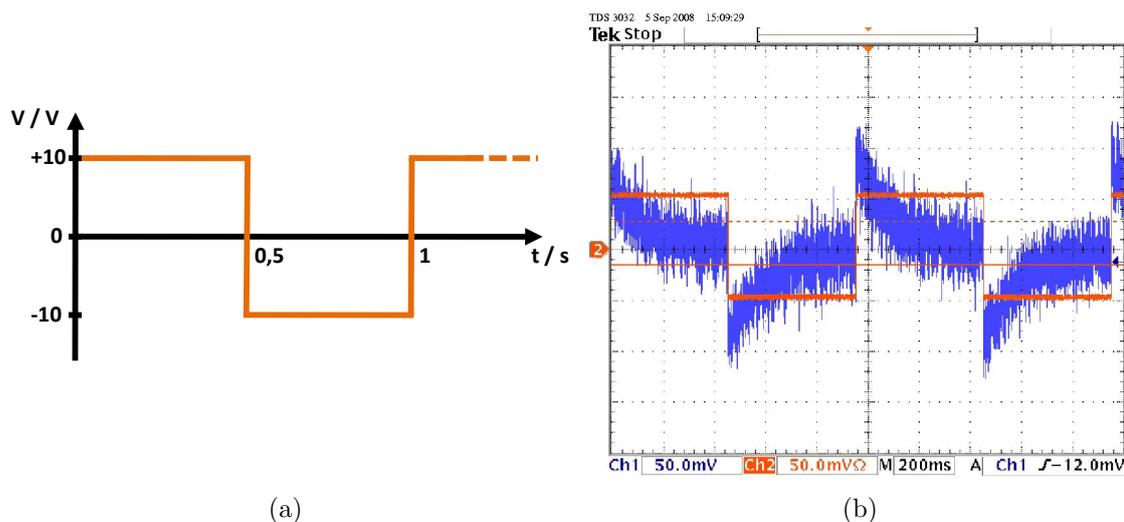


Abbildung 3.1: (a) Die mit dem Funktionsgenerator an die Testbox angelegte Rechteckspannung; (b) Anzeige des Oszilloskops während der Messungen; Kanal 1: gemessene Spannung; Kanal 2: zur Referenz angelegte Rechteckspannung.

Die über den Messwiderstand R_O abfallende Spannung wurde anschließend mit dem Oszilloskop gemessen. In Abb. 3.1(b) ist die Anzeige des Oszilloskops dargestellt, auf der der erwartete exponentielle Verlauf der Spannung, entsprechend der Lade- bzw. Entladekurve des RC-Gliedes, deutlich zu erkennen ist. Zur Messung des Spannungsverlaufs wurde ein „Schnappschuss“ der Oszilloskop-Anzeige angefertigt, dazu wurde der Ausschnitt so verschoben, dass eine Lade- bzw. Entladekurve zentral

angezeigt wurde. Der angezeigte Spannungsverlauf wurde anschließend als Liste von Datenpunkten (1. Koordinate Zeit t , 2. Koordinate Spannung U_O) abgespeichert, wobei das Oszilloskop die Zeitwerte auf einer relativen Skala der Anzeige entsprechend abspeichert (Mitte der Anzeige $t = 0$ s, linker bzw. rechter Rand $t = \mp 0,5$ s) und die Spannungswerte als absoluten Wert in Volt. Auf diese Weise wurden für Kondensator- und GEM-Aufbau jeweils 10 Lade- bzw. Entladekurven aufgenommen, also insgesamt 40 Messungen mit je 10.000 Datenpunkten durchgeführt.

Im Anschluss wurden die mit dem Oszilloskop aufgenommenen Messreihen (Abb. 3.2(a)) mit dem PC nachbearbeitet. Dazu wurden zuerst die Datenpunkte auf den für die Messung relevanten Bereich (dunkel markiert in Abb. 3.2(a)) der Lade- bzw. Entladekurve reduziert, d.h. die überflüssigen Datenpunkte gelöscht. Da die Periode der angelegten Rechteckspannung 1 s betrug, wurde so die Hälfte der 10.000 ursprünglichen Punkte gelöscht. Anschließend wurde die Zeitskala so verschoben, dass der erste übriggebliebene Datenpunkt bei $t' = 0$ s liegt. Die Liste der bearbeiteten Datenpunkte (Abb. 3.2(b)) wurde schließlich in eine neue Datei gespeichert.

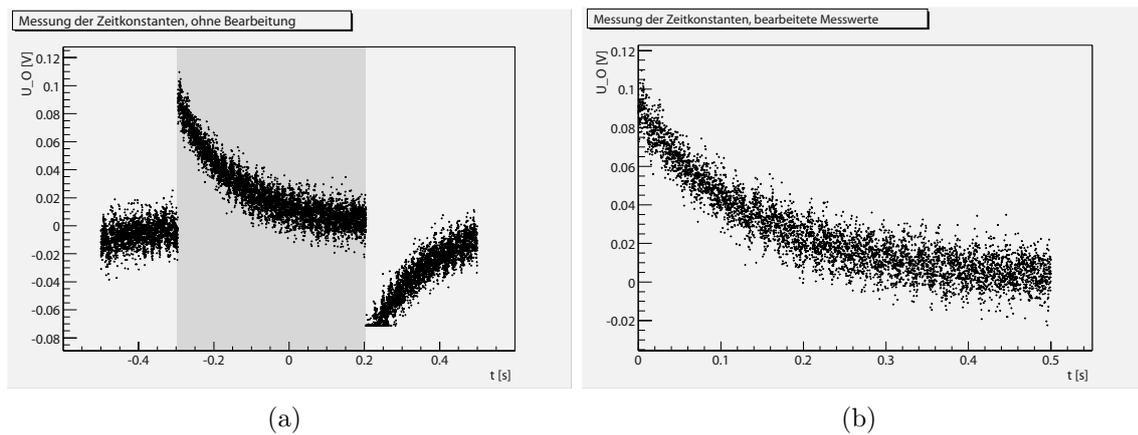


Abbildung 3.2: (a) Mit dem Oszilloskop aufgenommene Datenpunkte, markiert ist der für die Messung relevante Bereich; (b) Datenpunkte nach der Bearbeitung.

Die weitere Auswertung erfolgte mittels eines ROOT¹¹-Skriptes, dessen Quellcode als Referenz in Anhang A.2 zu finden ist. Dieses Skript liest zuerst die Datei mit den bearbeiteten Datenpunkten ein und speichert die Datenpunkte in Arrays. Anschließend werden die Datenpunkte zu 100 Bins mit je 50 Datenpunkten zusammengefasst. Für jedes Bin wird aus den enthaltenen Datenpunkten Mittelwert und Standardabweichung gebildet. Durch die aus den so erzeugten Punkten gebildete Kurve wird anschließend mit den in ROOT implementierten Methoden eine Exponentialfunktion der folgenden Form gefittet:

$$U_O(t) = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.1)$$

¹¹ROOT ist ein am CERN entwickeltes, objektorientiertes Software-Framework zur Datenanalyse [38].

U_{max} ist dabei die maximale Spannung und τ die gesuchte Zeitkonstante. Zuletzt wird der gefittete Graph in einer Datei abgespeichert. In den folgenden Abschnitten sollen nun die Auswertungen zuerst getrennt für Kondensator- und GEM-Aufbau vorgestellt und anschließend verglichen werden.

3.1.1. Kondensator-Aufbau

In Abb. 3.3 sind für Lade- und Entladevorgang je 2 der mit dem gerade beschriebenen ROOT-Skript erstellten Graphen abgebildet. In Tab. 3.1 sind die gefitteten Parameter für jede Messung einzeln aufgelistet.

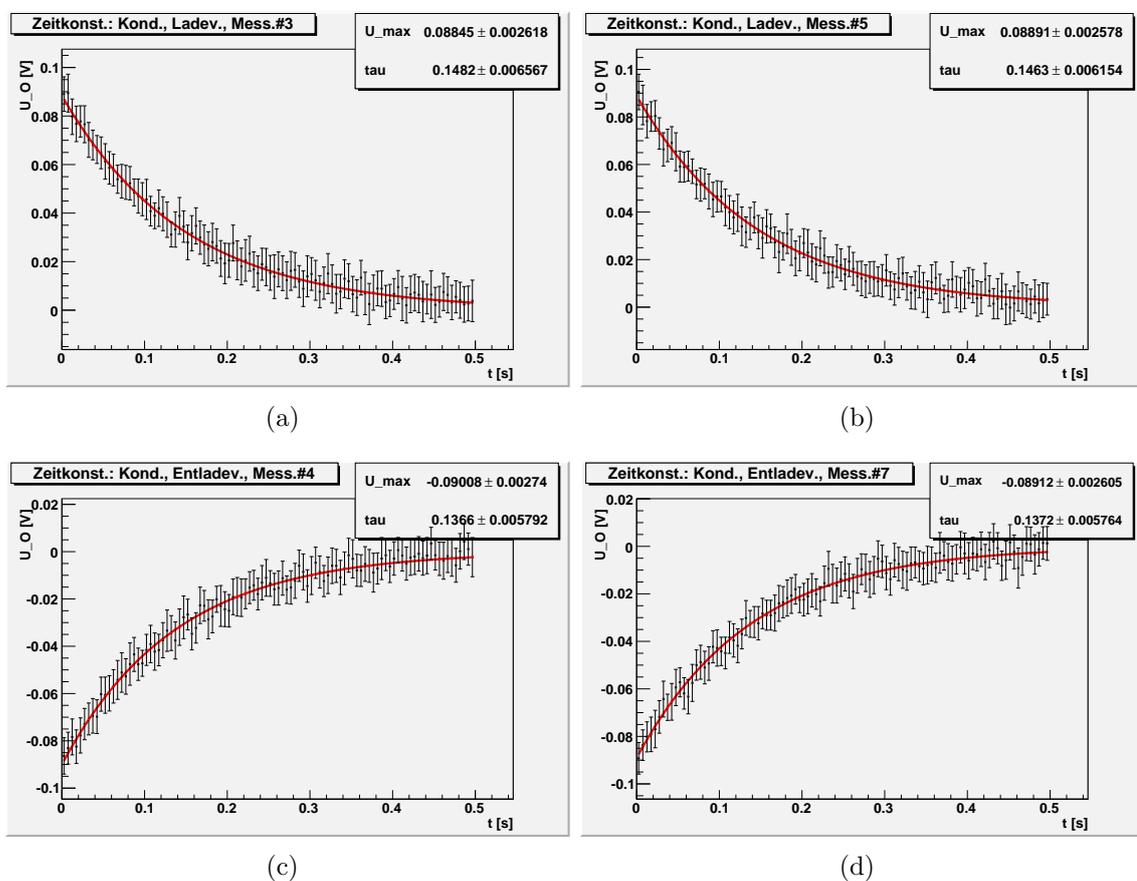


Abbildung 3.3: Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, Kondensator-Aufbau; (a), (b): Ladevorgang; (c), (d): Entladevorgang.

Sowohl τ als auch U_{max} stimmen innerhalb der beiden Messreihen jeweils innerhalb der 1σ -Fehlergrenzen überein. Zudem ist, wie aufgrund des Einbaus der Zener-Diode in den Schaltkreis erwartet, die Zeitkonstante für den Ladevorgang höher als die Zeitkonstante für den Entladevorgang. Aus den in Tab. 3.1 aufgelisteten Werten wird

(a)				
Messung i	τ [ms]	$\Delta\tau$ [ms]	U_{max} [mV]	ΔU_{max} [mV]
1	146,4	6,157	89,38	2,62
2	144,6	6,115	88,63	2,478
3	148,2	6,567	88,45	2,618
4	146,9	6,472	88,65	2,794
5	146,3	6,154	88,91	2,578
6	147,3	6,063	89	2,545
7	146,4	5,923	90,06	2,514
8	148,9	6,397	89,33	2,665
9	150,4	6,067	86,5	2,37
10	146,9	6,788	88,42	2,92

(b)				
Messung i	τ [ms]	$\Delta\tau$ [ms]	U_{max} [mV]	ΔU_{max} [mV]
1	140,9	6,688	-88,45	2,994
2	140	6,917	-88,96	3,189
3	135,4	5,818	-90,17	2,732
4	136,6	5,792	-90,08	2,74
5	137,1	6,599	-88,7	2,868
6	136,8	5,779	-89,95	2,664
7	137,2	5,764	-89,12	2,605
8	137	5,873	-89,12	2,719
9	142,3	6,032	-87,65	2,589
10	135,9	5,888	-89,5	2,737

Tabelle 3.1: Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, Kondensator-Aufbau; (a) Ladevorgang, (b) Entladevorgang.

nun das mit den Fehlern der Einzelmessungen gewichtete Mittel sowie dessen Fehler berechnet. Damit erhält man für den Ladevorgang $\bar{\tau}_{Kond.,Lad.} = (147,2 \pm 2,0)$ ms und für den Entladevorgang $\bar{\tau}_{Kond.,Entl.} = (137,8 \pm 1,9)$ ms.

Um diese experimentell bestimmten Werte einordnen zu können, wird nun noch der theoretisch zu erwartende Wert für die Zeitkonstante – ohne Berücksichtigung der Diode und des daraus resultierenden Unterschiedes in den Zeitkonstanten, eine solche Betrachtung würde an dieser Stelle zu weit führen – bestimmt. Theoretisch gilt für die Zeitkonstante τ eines RC-Gliedes:

$$\tau = R \cdot C, \quad (3.2)$$

wobei R der Widerstand des RC-Gliedes ist und C die Kapazität. Im Falle der Testbox ist C die Kapazität des verwendeten Kondensators ($C_C = 6,8$ nF). Da der Widerstand des Kondensators im Vergleich zu den anderen in die Testbox eingebau-

ten Widerständen sehr groß ist ($R_C > 10 \text{ G}\Omega$), ist R in diesem Fall nur die Summe der anderen drei Widerstände ($2 \cdot 10 \text{ M}\Omega + 10 \text{ k}\Omega$), damit erhält man als theoretischen Vergleichswert $\tau_{Kond.,theo.} = 136 \text{ ms}$, was innerhalb des 1σ -Bereichs mit dem gemessenen Wert für den Entladevorgang übereinstimmt.

3.1.2. GEM-Aufbau

In Abb. 3.4 sind für Lade- und Entladevorgang je 2 der mit dem oben beschriebenen ROOT-Skript erstellten Graphen abgebildet, diesmal für den GEM-Aufbau. In Tab. 3.2 sind die gefitteten Parameter für jede Messung einzeln aufgelistet.

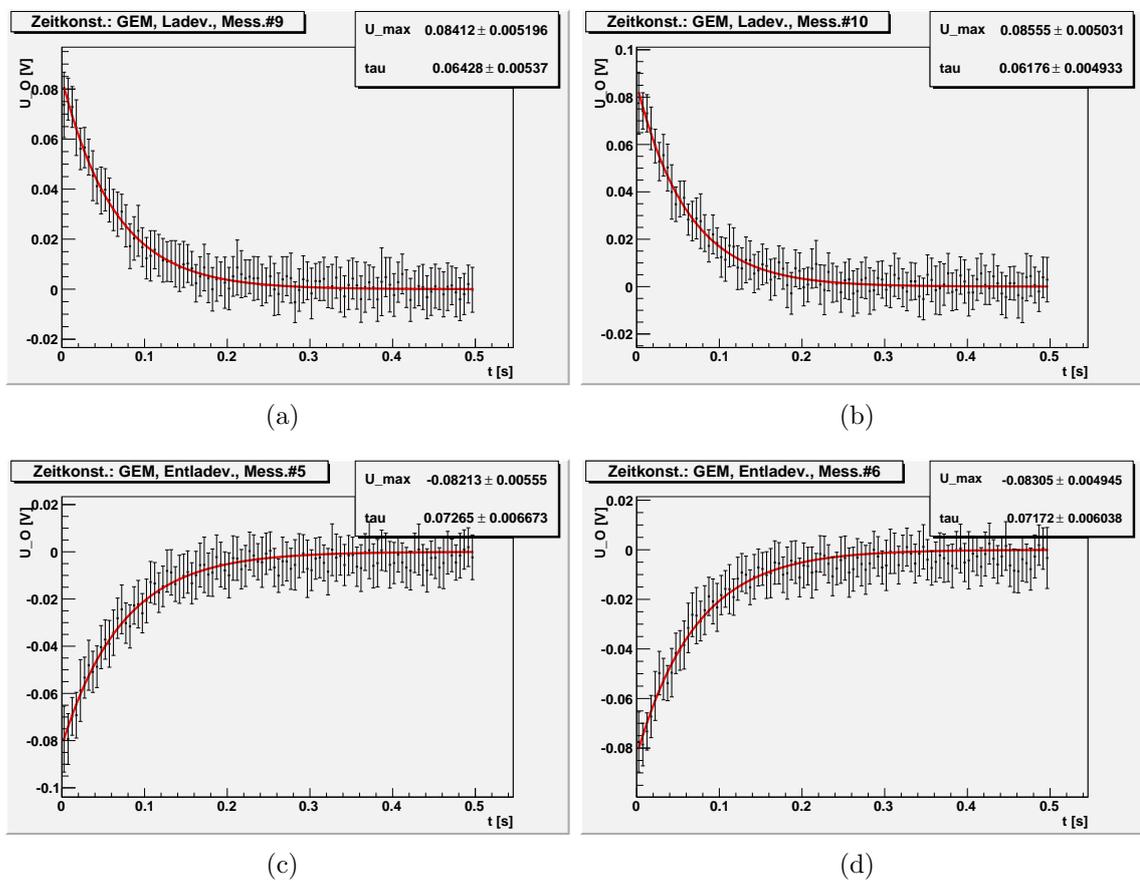


Abbildung 3.4: Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, GEM-Aufbau; (a), (b): Ladevorgang; (c), (d): Entladevorgang.

Auch hier erkennt man innerhalb der Messreihen eine Übereinstimmung der Messwerte, die nur um wenige Prozent voneinander abweichen und innerhalb der 1σ -Fehlergrenzen miteinander verträglich sind. Auffallend ist allerdings, dass im Gegensatz zum Kondensator-Aufbau hier die Zeitkonstante für den Entladevorgang einen höheren Wert besitzt.

(a)				
Messung i	τ [ms]	$\Delta\tau$ [ms]	U_{max} [mV]	ΔU_{max} [mV]
1	62,77	4,93	85,08	4,79
2	61,37	5,41	82,32	5,40
3	59,49	4,94	88,22	5,71
4	60,94	4,84	87,93	5,18
5	63,22	5,43	84,10	5,56
6	61,43	5,06	86,12	5,00
7	62,02	5,31	83,88	5,64
8	62,18	5,46	82,15	5,05
9	64,28	5,37	84,12	5,20
10	61,76	4,93	85,55	5,03

(b)				
Messung i	τ [ms]	$\Delta\tau$ [ms]	U_{max} [mV]	ΔU_{max} [mV]
1	69,43	5,953	-84,55	5,205
2	70,68	6,483	-83,98	5,425
3	69,43	5,724	-85,42	5,153
4	69,63	6,233	-85,32	5,394
5	72,65	6,673	-82,13	5,55
6	71,72	6,038	-83,05	4,945
7	71,61	6,155	-82,42	5,167
8	68,58	5,751	-85,26	5,012
9	69,49	5,372	-86,39	4,761
10	70,82	6,079	-85,11	4,916

Tabelle 3.2: Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, GEM-Aufbau; (a) Ladevorgang, (b) Entladevorgang.

Auch für den GEM-Aufbau wird nun das mit den Fehlern gewichtete Mittel sowie dessen Fehler berechnet. Mit den in Tab. 3.2 angegebenen Werten erhält man für den Ladevorgang $\bar{\tau}_{GEM,Lad.} = (61,8 \pm 1,6)$ ms und für den Entladevorgang $\bar{\tau}_{GEM,Entl.} = (70,3 \pm 1,9)$ ms. Der theoretische Vergleichswert ergibt sich wieder aus (3.2) mit der Kapazität der GEM ($C_C = 2,59$ nF) zu $\tau_{GEM,theo.} = 51$ ms. Dieser Wert ist deutlich (Abweichung $> 6\sigma$) niedriger als die experimentell bestimmten. Eine mögliche Erklärung dafür wird im folgenden Abschnitt gegeben.

3.1.3. Vergleich der Messungen

In Tab. 3.3 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten aufgelistet.

	Kondensator	GEM
theoretisch	136 ms	51 ms
Ladevorgang	$(147,2 \pm 2,0)$ ms	$(61,8 \pm 1,6)$ ms
Entladevorgang	$(137,8 \pm 1,9)$ ms	$(70,3 \pm 1,9)$ ms

Tabelle 3.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten.

Die gemessenen Werte für den Kondensator-Aufbau stimmen mit den Erwartungen überein. Beim GEM-Aufbau liegen die gemessenen Werte für die Zeitkonstanten zwar in der erwarteten Größenordnung, sind jedoch tendenziell zu hoch. Zudem ist, entgegen der Erwartung, die Zeitkonstante für den Entladevorgang größer als die Zeitkonstante des Ladevorgangs. Statistische Effekte können als Ursache für den zu hohen Wert der Zeitkonstante für den Entladevorgang ausgeschlossen werden, da die Abweichung mehr als 6σ beträgt. Ebenso können auch die anderen Bauteile der Testbox als Fehlerquellen ausgeschlossen werden, da die Ergebnisse für den Kondensator-Aufbau mit den Erwartungen übereinstimmen. Die Ursache für die zu hohen Werte scheint also bei der verwendeten GEM zu liegen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass das verwendete, idealisierende Modell der GEM-Folie als idealer Plattenkondensator nicht zutrifft. Durch die komplizierte reale Feldkonfiguration einer GEM (Abb. 1.8) können beispielsweise Randeffekte nicht mehr vernachlässigt werden. Eine genauere Untersuchung der Abweichungen wurde allerdings an dieser Stelle nicht durchgeführt. In jedem Fall ist das Ergebnis ein erster Hinweis darauf, dass die Testbox zwar eine GEM simulieren kann – der Verlauf der Lade- bzw. Entladekurve sowie die Größenordnung der Zeitkonstanten erfüllen die Erwartungen –, in Details aber abweicht, in diesem Fall durch die zusätzlichen Effekte, die beim Lade- bzw. Entladevorgang einer GEM im Vergleich zu einem Kondensator eine Rolle spielen. Die weiteren Messungen, die in den folgenden Abschnitten ausgewertet und diskutiert werden sollen, müssen nun klären, ob weitere grundlegende Abweichungen des GEM-Aufbaus von den Erwartungen auftreten, so dass schlussendlich die Frage beantwortet werden kann, ob die Testbox (im Kondensator-Aufbau) eine GEM simulieren kann oder nicht.

3.2. Spannungsmessungen

Der für die im Folgenden beschriebenen Spannungsmessungen verwendete Aufbau wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 näher erläutert. Insgesamt wurden damit drei Messungen durchgeführt: Je eine mit Kondensator- und GEM-Aufbau sowie eine zusätzliche Messung ohne Testbox als Referenz. Die Durchführung der Messungen war dabei jeweils gleich: Zuerst wurde auf den Kanälen 0 und 1 der HV-Versorgung die Spannung auf 0 V bzw. ΔU eingestellt, nach dem Hochfahren der Spannungen wurden dann die eingestellte Spannung sowie die von der HV-Versorgung und dem HV-Messgerät gemessenen Spannungen protokolliert. Anschließend wurden die Spannungen auf beiden Kanälen in Schritten von 10 V bis auf 1000 V erhöht und die gemessenen Spannungen weiter protokolliert, wobei die Spannungsdifferenz ΔU zwischen beiden Kanälen beibehalten wurde. Durchgeführt wurden diese Messungen für Spannungsdifferenzen von 200 V, 300 V und 400 V. Zusätzlich wurde für jeden Aufbau noch eine weitere Messung durchgeführt, bei der nicht ΔU konstant gehalten wurde, sondern die Spannung auf Kanal 1 fest auf 1000 V eingestellt und ΔU in 10 V-Schritten von 0 V auf 400 V erhöht wurde. Auf diese Weise lässt sich untersuchen, ob die an dem Kondensator bzw. der GEM anliegende Spannung einen Einfluss auf die gemessenen Spannungen hat.

Anschließend wurden die so aufgenommenen Datenpunkte auf dem PC mit Hilfe eines weiteren ROOT-Skriptes ausgewertet, dessen Quellcode als Referenz in Anhang A.3 zu finden ist. Dieses Skript liest zuerst die aufgenommenen Datenpunkte ein, speichert diese in Arrays und erstellt dann vier Graphen – je einen für Kanal 0 bzw. 1 sowie die Messung mit der HV-Versorgung bzw. dem HV-Messgerät –, an die jeweils eine Gerade der Form

$$U(U_{set}) = p_0 \cdot U_{set} + p_1 \quad (3.3)$$

gefittet wird. U_{set} ist in diesem Fall die eingestellte Spannung und U die gemessene. Der zu fittende, dimensionslose Parameter p_0 gibt die Geradensteigung an, der zweite zu fittende Parameter p_1 den Offset der gemessenen Spannung in Volt. Auf diese Weise erhält man für jeden Kanal zwei Kalibrierungsgeraden, die die auf den jeweiligen Messgeräten gemessenen Spannungen in Abhängigkeit von der eingestellten Spannung angeben. Im Folgenden werden nun die Auswertungen der einzelnen Messreihen vorgestellt und im Anschluss daran die Ergebnisse miteinander verglichen.

3.2.1. Aufbau ohne Testbox

In Abb. 3.5 sind die mit Hilfe des oben beschriebenen ROOT-Skriptes erstellten Graphen für die Messungen mit $\Delta U = 200$ V abgebildet, getrennt nach Kanälen und verwendeten Messgeräten. Vergleicht man die einzelnen Graphen, so stellt man

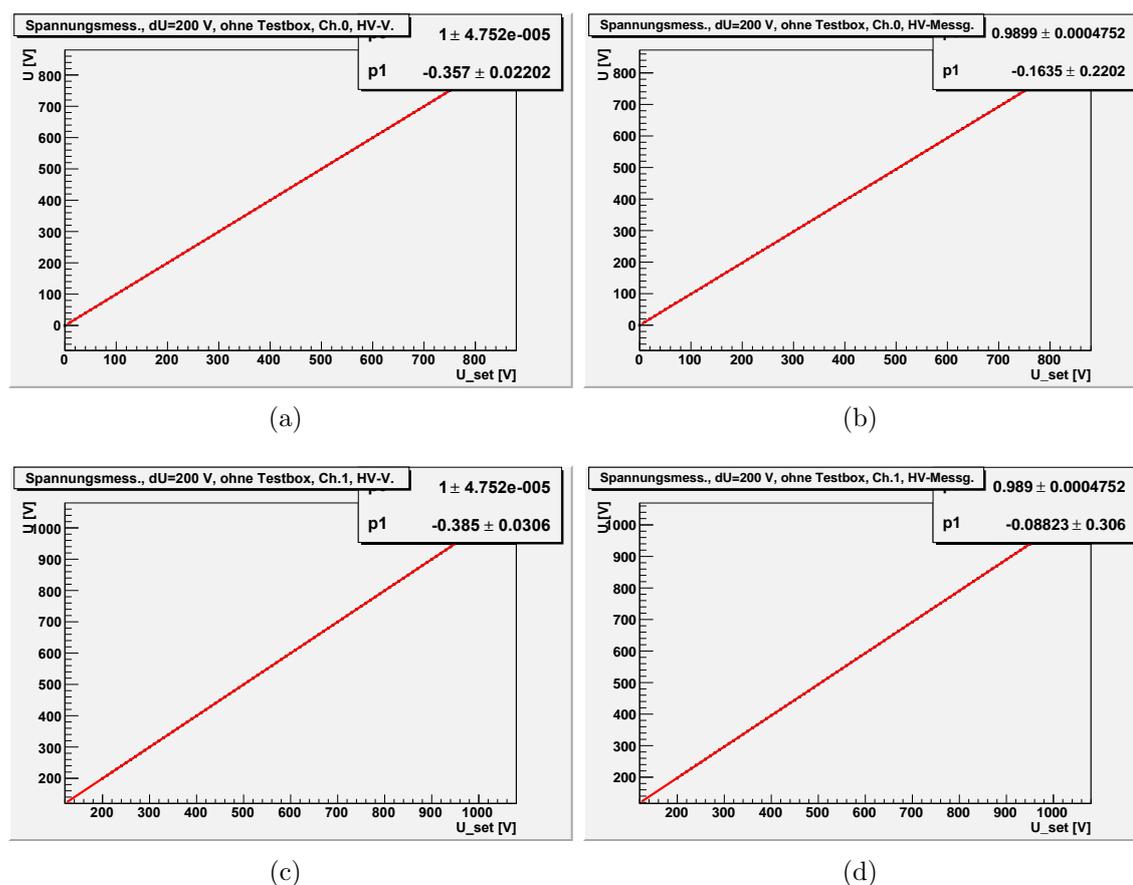


Abbildung 3.5: Auswertung der Spannungsmessungen, Aufbau ohne Testbox; (a) Kanal 0, Messung mit der HV-Versorgung; (b) Kanal 0, Messung mit dem HV-Messgerät; (c) Kanal 1, Messung mit der HV-Versorgung; (d) Kanal 1, Messung mit dem HV-Messgerät.

fest, dass die für Kanal 0 bzw. 1 bestimmten Parameter jeweils für die verschiedenen Messgeräte untereinander vergleichbar sind und innerhalb der 1σ -Fehlergrenzen miteinander übereinstimmen. Vergleicht man anschließend die Ergebnisse der Messungen mit der HV-Versorgung und dem HV-Messgerät, so fällt die geringere Geradensteigung (Parameter p_0) bei Messung mit dem HV-Messgerät auf. Dies bestätigt die bereits bei der Funktionsüberprüfung der HV-Module (Abschnitt 2.2.1) aufgestellte Beobachtung, dass die real auf einem Kanal der HV-Versorgung anliegende Spannung von der eingestellten und angezeigten Spannung abweicht. Die Messergebnisse zeigen, dass die Abweichung linear mit der eingestellten Spannung verläuft, wobei die absolute Abweichung bei eingestellten 1000 V maximal 11 V beträgt. Diese Abweichung ist zwar nicht groß ($\approx 1\%$), sollte aber dennoch nicht vernachlässigt werden, da z.B. bei GEM-Folien die elektrische Feldstärke innerhalb eines Loches und damit der erreichbare Verstärkungsfaktor direkt von der angelegten Spannung abhängen, die somit möglichst genau bekannt sein muss.

(a)				
ΔU [V]	Kanal 0		Kanal 1	
	p_0	p_1 [V]	p_0	p_1 [V]
200	$1 \pm 5 \cdot 10^{-5}$	$-0,36 \pm 0,02$	$1 \pm 5 \cdot 10^{-5}$	$-0,39 \pm 0,03$
300	$1 \pm 6 \cdot 10^{-5}$	$-0,40 \pm 0,02$	$0,9997 \pm 6 \cdot 10^{-5}$	$-0,22 \pm 0,04$
400	$1 \pm 7 \cdot 10^{-5}$	$-0,36 \pm 0,03$	$0,9999 \pm 7 \cdot 10^{-5}$	$-0,28 \pm 0,05$
var.	$0,9998 \pm 1,3 \cdot 10^{-4}$	$-0,19 \pm 0,11$	-	-

(b)				
ΔU [V]	Kanal 0		Kanal 1	
	p_0	p_1 [V]	p_0	p_1 [V]
200	$0,9899 \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$-0,16 \pm 0,22$	$0,9890 \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$-0,09 \pm 0,31$
300	$0,9898 \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$-0,33 \pm 0,23$	$0,9892 \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$-0,31 \pm 0,39$
400	$0,9892 \pm 7 \cdot 10^{-4}$	$-0,09 \pm 0,25$	$0,9901 \pm 7 \cdot 10^{-4}$	$-0,96 \pm 0,52$
var.	$0,9917 \pm 1,3 \cdot 10^{-3}$	$-1,0 \pm 1,1$	-	-

Tabelle 3.4: Auswertung der Spannungsmessungen, Aufbau ohne Testbox; (a) Messung mit der HV-Versorgung; (b) Messung mit dem HV-Messgerät.

In Tab. 3.4 sind die Ergebnisse aller Messungen mit dem Aufbau ohne Testbox aufgelistet. Für variables ΔU und Kanal 1 ist kein Ergebnis gelistet, da auf diesem Kanal die Spannung bei dieser Messung konstant auf 1000 V gehalten wurde, so dass das Bestimmen einer Geraden aus den Messwerten in diesem Fall nicht möglich ist. Ansonsten bestätigen sich die bei der gerade diskutierten Messung mit $\Delta U = 200$ V getroffenen Beobachtungen auch in den anderen Messungen. Die Ergebnisse für die verschiedenen ΔU sind innerhalb der Fehlergrenzen miteinander verträglich, was allerdings auch zu erwarten war, da diese Messung ohne angeschlossene Testbox durchgeführt wurde und somit die einzelnen Kanäle komplett unabhängig voneinander sind. Zusätzlich fällt auf, dass die Fehler bei steigendem ΔU ebenfalls ansteigen. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei größerem ΔU weniger Datenpunkte, an die die Gerade gefittet werden muss, aufgenommen wurden, der Fehler auf die gefitteten Parameter muss demnach steigen. Der Unterschied in der Größenordnung der Fehler für die einzelnen Messgeräte – der Fehler auf die Parameter für das HV-Messgerät ist im Mittel eine Größenordnung größer als der Fehler für die HV-Versorgung – resultiert aus den unterschiedlichen Auflösungen der Messgeräte. Für die HV-Versorgung betrug die Auflösung 0,1 V, für das HV-Messgerät aufgrund der begrenzten Anzeige 1 V. Beide Auflösungen sind auch als Fehler auf die einzelnen Datenpunkte in die mit dem ROOT-Skript berechneten Graphen eingetragen, die Fehlerbalken sind jedoch im gewählten Maßstab nicht sichtbar.

Nun werden aus den gerade gelisteten Messergebnissen getrennt für beide Messgeräte gemittelte Kalibrierungsgeraden bestimmt. Dazu wird der gewichtete Mittelwert aus den einzelnen Parametern gebildet. Die Wichtungsfaktoren sind dabei die

Fehler der einzelnen Parameter. In den Mittelwert gehen an dieser Stelle sowohl die Parameter für Kanal 0 als auch jene für Kanal 1 ein. Damit erhält man folgende Kalibrierungsgeraden, die in Abschnitt 3.2.4 mit den Kalibrierungsgeraden für die anderen Aufbauten verglichen werden:

$$U_{HV-Vers.}(U_{set}) = (1 \pm 2 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{set} - (0,36 \pm 0,04) \text{ V},$$

$$U_{HV-Messg.}(U_{set}) = (0,9896 \pm 2 \cdot 10^{-4}) \cdot U_{set} - (0,24 \pm 0,39) \text{ V}.$$

3.2.2. Kondensator-Aufbau

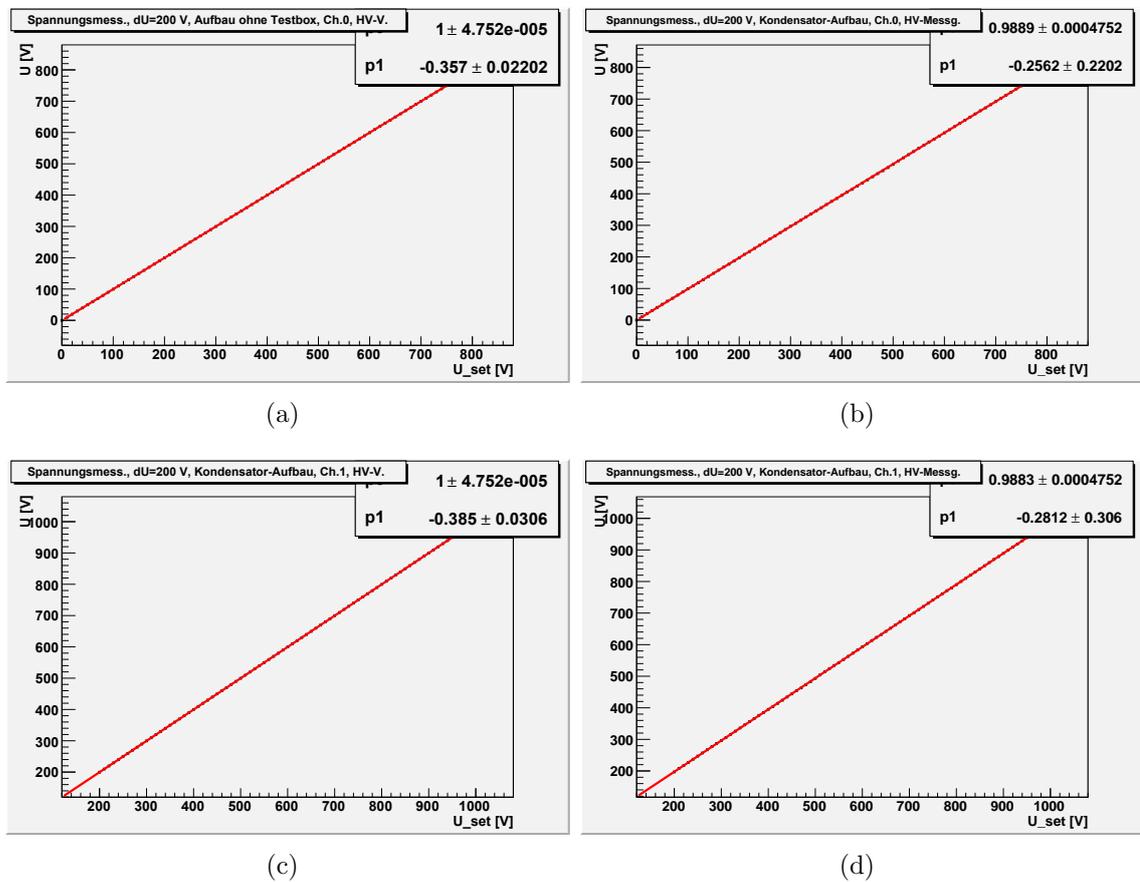


Abbildung 3.6: Auswertung der Spannungsmessungen, Kondensator-Aufbau; (a) Kanal 0, Messung mit der HV-Versorgung; (b) Kanal 0, Messung mit dem HV-Messgerät; (c) Kanal 1, Messung mit der HV-Versorgung; (d) Kanal 1, Messung mit dem HV-Messgerät.

In Abb. 3.6 sind stellvertretend die mit Hilfe des ROOT-Skripts erstellten Graphen für die Messungen mit $\Delta U = 200 \text{ V}$ am Kondensator-Aufbau dargestellt. Auch hier stimmen die Ergebnisse für beide Kanäle innerhalb der Fehlergrenzen überein.

(a)				
ΔU [V]	Kanal 0		Kanal 1	
	p_0	p_1 [V]	p_0	p_1 [V]
200	$1 \pm 5 \cdot 10^{-5}$	$-0,36 \pm 0,02$	$1 \pm 5 \cdot 10^{-5}$	$-0,39 \pm 0,03$
300	$1 \pm 6 \cdot 10^{-5}$	$-0,40 \pm 0,02$	$1 \pm 6 \cdot 10^{-5}$	$-0,36 \pm 0,04$
400	$1 \pm 7 \cdot 10^{-5}$	$-0,36 \pm 0,03$	$0,9999 \pm 7 \cdot 10^{-5}$	$-0,28 \pm 0,05$
var.	$0,9998 \pm 1,3 \cdot 10^{-4}$	$-0,19 \pm 0,11$	-	-

(b)				
ΔU [V]	Kanal 0		Kanal 1	
	p_0	p_1 [V]	p_0	p_1 [V]
200	$0,9889 \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$-0,26 \pm 0,22$	$0,9883 \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$-0,28 \pm 0,31$
300	$0,9889 \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$-0,34 \pm 0,23$	$0,9886 \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$-0,62 \pm 0,39$
400	$0,9885 \pm 7 \cdot 10^{-4}$	$-0,15 \pm 0,25$	$0,9892 \pm 7 \cdot 10^{-4}$	$-0,93 \pm 0,52$
var.	$0,9903 \pm 1,3 \cdot 10^{-3}$	$-0,7 \pm 1,0$	-	-

Tabelle 3.5: Auswertung der Spannungsmessungen, Kondensator-Aufbau; (a) Messung mit der HV-Versorgung; (b) Messung mit dem HV-Messgerät.

In Tab. 3.5 sind die Ergebnisse aller Messungen am Kondensator-Aufbau aufgelistet. Ebenso wie bei den weiter oben beschriebenen Messungen ohne Testbox stimmen die Ergebnisse für verschiedene ΔU miteinander im Rahmen der Fehlergrenzen überein. Die angelegte Spannung scheint also keinen Einfluss auf die gemessenen Spannungen zu haben. Aus den in Tab. 3.5 aufgelisteten Ergebnissen werden wieder wie oben beschrieben die gemittelten Kalibrierungsgeraden bestimmt, auch hier werden wieder beide Kanäle zusammengefasst:

$$U_{HV-Vers.}(U_{set}) = (1 \pm 2 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{set} - (0,37 \pm 0,04) \text{ V},$$

$$U_{HV-Messg.}(U_{set}) = (0,9888 \pm 2 \cdot 10^{-4}) \cdot U_{set} - (0,33 \pm 0,39) \text{ V}.$$

3.2.3. GEM-Aufbau

Bei den Messungen am GEM-Aufbau traten unerwartete Probleme auf. Die gemessene Spannung brach ein (Differenz > 50 V), sobald auf einem der beiden Kanäle eine Spannung > 650 V eingestellt wurde, wobei ab diesem Punkt auch ein vergleichsweise hoher Strom gemessen werden konnte. Dieser Fehler könnte durch eine Beschädigung der GEM-Folie hervorgerufen worden sein, bei der, etwa durch einen Funken, ein Teil des Kupfers in ein Loch gelaufen ist, jedoch ohne eine dauerhafte, leitende Verbindung zwischen beiden Seiten der GEM-Folie herzustellen. Dadurch kann die Durchbruchspannung in die GEM-Folie umgebenden Gas lokal herabgesetzt worden sein, so dass ab einer gewissen Spannung ein Strom zwischen beiden

Seiten der GEM-Folie fließen kann. Dies würde auch erklären, warum sich die GEM unterhalb von 650 V völlig den Erwartungen entsprechend verhielt. Aufgrund dieses Fehlers konnte die Messung mit $\Delta U = 400$ V für das GEM-Setup auch nicht durchgeführt werden. Im Gegensatz zur Erwartung aufgrund des gerade beschriebenen Fehlers der verwendeten GEM entsprach die Messung mit variablen ΔU jedoch wieder völlig den Erwartungen für eine fehlerfreie GEM, auch im Bereich bis 400 V. Dies deutet auf eine kompliziertere Beschädigung der GEM-Folie hin. Aus Zeit- und Verfügbarkeitsgründen konnten jedoch die Messungen nicht mit einer anderen GEM-Folie durchgeführt werden, sondern es musste die bereits eingebaute GEM verwendet werden, bei der allerdings im Gegensatz zu den vorher durchgeführten Messungen auf beiden Kanälen nur maximal eine Spannung von 650 V eingestellt wurde. Die Ergebnisse für $\Delta U = 200$ V, $\Delta U = 300$ V und variables ΔU entsprechen im Bereich bis 650 V jedoch den Erwartungen, so dass zumindest in diesem Bereich die Vergleichbarkeit mit den übrigen Messungen gewahrt bleibt.

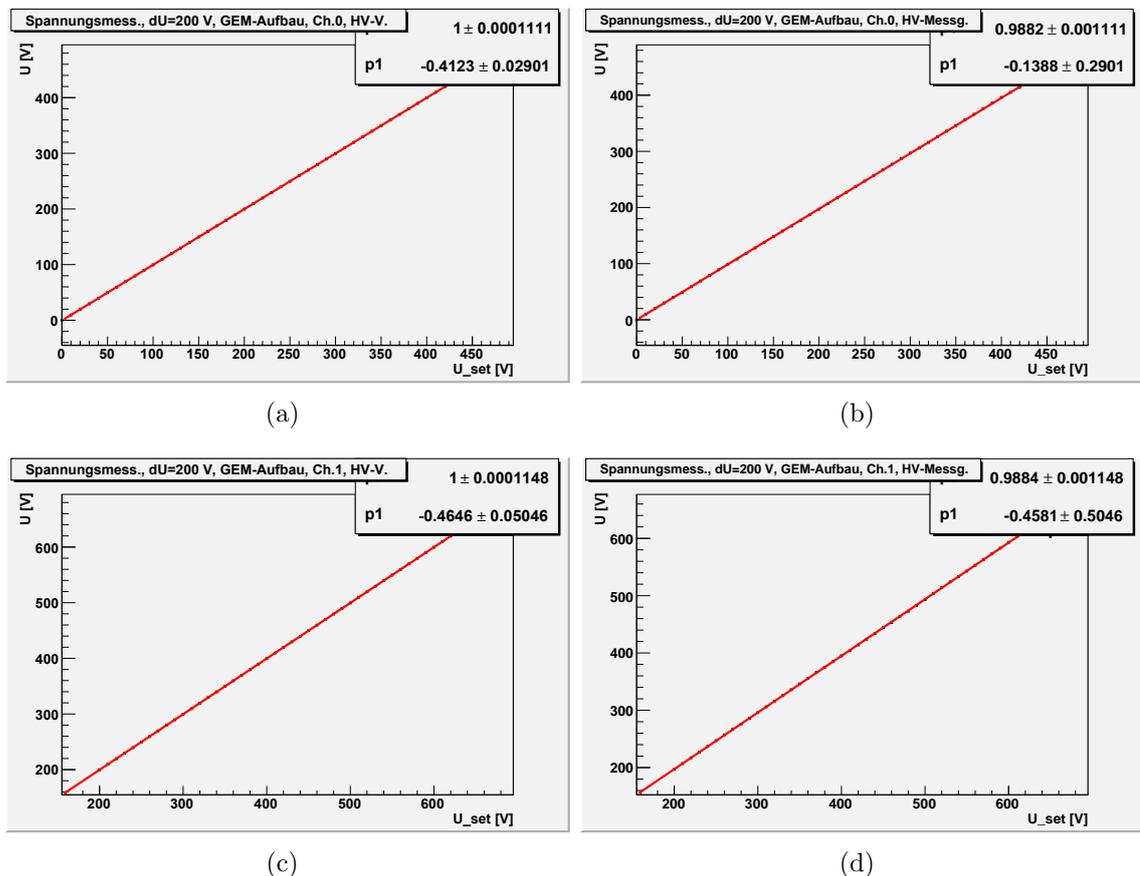


Abbildung 3.7: Auswertung der Spannungsmessungen, GEM-Aufbau; (a) Kanal 0, Messung mit der HV-Versorgung; (b) Kanal 0, Messung mit dem HV-Messgerät; (c) Kanal 1, Messung mit der HV-Versorgung; (d) Kanal 1, Messung mit dem HV-Messgerät.

In Abb. 3.7 sind die Ergebnisse der Auswertungen für die Messungen bei $\Delta U = 200$ V abgebildet. Zu beachten ist, dass die Skalen in diesem Fall nicht, wie in den Abbildungen 3.5 und 3.6, bis maximal 1000 V gehen, sondern nur bis maximal 650 V, da bei höheren Spannungen die oben beschriebenen Fehler auftraten. Aus Gründen der Übersicht wurden die fehlerhaften Bereiche daher in den Graphen weggelassen. Im angegebenen Bereich ist jedoch, ebenso wie bei den zuvor beschriebenen Messungen, festzustellen, dass keine Unterschiede zwischen beiden Kanälen auftreten, ebenso wie die Abweichungen der Datenpunkte von der mittels des ROOT-Skriptes bestimmten Geraden nur minimal sind.

(a)					
ΔU [V]	Kanal 0		Kanal 1		
	p_0	p_1 [V]	p_0	p_1 [V]	
200	$1 \pm 1,1 \cdot 10^{-4}$	$-0,41 \pm 0,03$	$1 \pm 1,1 \cdot 10^{-4}$	$-0,46 \pm 0,05$	
300	$1 \pm 1,5 \cdot 10^{-4}$	$-0,43 \pm 0,03$	$1 \pm 1,6 \cdot 10^{-4}$	$-0,39 \pm 0,08$	
var.	$1 \pm 1,3 \cdot 10^{-4}$	$-0,48 \pm 0,06$	-	-	

(b)					
ΔU [V]	Kanal 0		Kanal 1		
	p_0 [10^{-3}]	p_1 [V]	p_0 [10^{-3}]	p_1 [V]	
200	$988,2 \pm 1,1$	$-0,14 \pm 0,29$	$988,4 \pm 1,1$	$-0,46 \pm 0,50$	
300	$987,9 \pm 1,5$	$0,13 \pm 0,32$	$988,9 \pm 1,6$	$-0,74 \pm 0,78$	
var.	$986,8 \pm 1,3$	$-0,46 \pm 0,55$	-	-	

Tabelle 3.6: Auswertung der Spannungsmessungen, GEM-Aufbau; (a) Messung mit der HV-Versorgung; (b) Messung mit dem HV-Messgerät.

In Tab. 3.6 sind die Ergebnisse der Auswertungen der Messungen mit dem GEM-Aufbau aufgelistet. Auch hier stimmen die mit Hilfe des ROOT-Skriptes bestimmten Parameter innerhalb der Fehlergrenzen für alle Messreihen bei unterschiedlichen ΔU überein, auch in diesem Fall scheint also die Spannungsdifferenz zwischen beiden Kanälen keine oder nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Dass der Fehler auf die Parameter bei der Messung mit $\Delta U = 300$ V diesmal höher ist als der Fehler bei variablem ΔU ist wieder durch die Anzahl der aufgenommenen Datenpunkte bedingt, bei $\Delta U = 300$ V wurden mit dem GEM-Aufbau 38 Datenpunkte aufgenommen, von denen 36 in die Berechnung der Geraden eingingen, bei variablem ΔU hingegen 41, so dass der höhere Fehler durchaus im Rahmen der Erwartungen liegt. Aus den in Tab. 3.6 gelisteten Parametern werden nun wieder wie oben die gemittelten Kalibrierungsgeraden bestimmt, die im folgenden Abschnitt mit den übrigen Kalibrierungsgeraden verglichen werden sollen:

$$U_{HV-Vers.}(U_{set}) = (1 \pm 6 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{set} - (0,43 \pm 0,02) \text{ V},$$

$$U_{HV-Messg.}(U_{set}) = (0,9880 \pm 6 \cdot 10^{-4}) \cdot U_{set} - (0,16 \pm 0,18) \text{ V}.$$

3.2.4. Vergleich der Messungen

In Tab. 3.7 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Spannungsmessungen mit den verschiedenen Aufbauten aufgelistet. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Kalibrierungsgeraden für die Messung mit der HV-Versorgung für alle Aufbauten innerhalb der 1σ -Fehlergrenzen miteinander übereinstimmen, die Spannungsmessung mit der HV-Versorgung ist also weitgehend unabhängig von den angeschlossenen Geräten. Es ist daher anzunehmen, dass sich die HV-Versorgung für genaue Messungen der real an den einzelnen Kanälen anliegenden Spannungen nicht eignet, vielmehr scheint nur eine Art „interne“ Spannung angegeben zu werden, von der die „real nutzbare“ Spannung – etwa aufgrund des Innenwiderstandes der HV-Kanäle – abweichen kann.

Aufbau ohne Testbox:			
$U_{HV-Vers.}(U_{set})$	=	$(1 \pm 2 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{set}$	– $(0,36 \pm 0,04)$ V
$U_{HV-Messg.}(U_{set})$	=	$(0,9896 \pm 2 \cdot 10^{-4}) \cdot U_{set}$	– $(0,24 \pm 0,39)$ V
Kondensator-Aufbau:			
$U_{HV-Vers.}(U_{set})$	=	$(1 \pm 2 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{set}$	– $(0,37 \pm 0,04)$ V
$U_{HV-Messg.}(U_{set})$	=	$(0,9888 \pm 2 \cdot 10^{-4}) \cdot U_{set}$	– $(0,33 \pm 0,39)$ V
GEM-Aufbau:			
$U_{HV-Vers.}(U_{set})$	=	$(1 \pm 6 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{set}$	– $(0,43 \pm 0,02)$ V
$U_{HV-Messg.}(U_{set})$	=	$(0,9880 \pm 6 \cdot 10^{-4}) \cdot U_{set}$	– $(0,16 \pm 0,18)$ V

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungsmessungen.

Im Gegensatz dazu unterschieden sich die Messungen mit dem HV-Messgerät für die verschiedenen Aufbauten. Die Abweichungen von der Messung mit der HV-Versorgung beim Aufbau ohne Testbox wurden bereits in Abschnitt 3.2.1 diskutiert. Im Vergleich mit Kondensator- und GEM-Aufbau ist zusätzlich nun festzustellen, dass die Kalibrierungsgerade eine noch geringere Steigung aufweist. Im Experiment bedeutete dies, dass die gemessene Spannung im Mittel um 1 V sank beim Kondensator- bzw. GEM-Aufbau im Vergleich zum Aufbau ohne Testbox, so dass durchaus ein Einfluss der Testbox auf die gemessenen Spannungen feststellbar ist, der mittels der berechneten Kalibrierungsgeraden nun korrigiert werden kann. Die Unterschiede zwischen Kondensator- und GEM-Aufbau bewegen sich im Rahmen der Erwartungen, es sollte jedoch festgehalten werden, dass die Fehler auf die Parameter der Kalibrierungsgeraden im GEM-Aufbau höher sind als die Fehler beim Kondensator-Aufbau, bedingt durch die fehlenden Messungen. Um genauere Aussagen treffen zu können, wären zusätzliche Messungen nötig, auch mit einem empfindlicheren HV-Messgerät. Dieses stellte bei den durchgeführten Messungen die größte Schwachstelle dar, da die erreichbare Auflösung von ± 1 V einen Vergleich der Messungen untereinander aufgrund der hohen, resultierenden Fehler erschwerte. Da jedoch, wie oben beschrieben, dieses Messgerät das einzig verfügbare war, welches die

für die Messungen benötigten Anforderungen erfüllt, mussten die Messungen damit durchgeführt werden. Sollten in Zukunft weitere Messungen durchgeführt werden, sollte jedoch auf ein anderes Messgerät zurückgegriffen werden.

Insgesamt betrachtet lässt sich jedoch feststellen, dass die in den Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten aufgestellten Vermutungen, dass eine GEM-Folie durch einen einfachen Kondensator hinreichend genau simuliert werden kann, durch die Spannungsmessungen unterstützt werden, insbesondere da die Messungen an Kondensator- und GEM-Aufbau weitgehende Übereinstimmungen aufweisen.

3.3. Ramping-Messungen

Im folgenden Abschnitt sollen die zuletzt durchgeführten Ramping-Messungen beschrieben und ausgewertet werden. Der für diese Messungen verwendete Aufbau wurde bereits in Abschnitt 2.4.3 beschrieben. Wie dort erläutert, haben diese Messungen zum Ziel, eine „sichere“ Ramping-Geschwindigkeit zu bestimmen, bei der der fließende Strom eine vorher festgelegte Grenze nicht überschreitet, um so Beschädigungen der GEM zu vermeiden.

Bei den durchgeführten Messungen wurde gemäß Abb. 2.4 nur ein Kanal (Kanal 0) der HV-Versorgung an die Testbox angeschlossen, der andere SHV-Anschluss der Testbox wurde auf Erdpotential gelegt. Anschließend wurde die Spannung auf dem angeschlossenen Kanal auf $U_0 = 300 \text{ V}$ eingestellt und die Ramping-Geschwindigkeiten auf $S_{up} = s_{down} = S$ gesetzt. Gemessen wurde dann mit Hilfe des in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Ausleseprogramms die von der HV-Versorgung für diesen Kanal gemessenen Strom- und Spannungswerte in einem vorher definierten Zeitintervall T . T ist dabei jeweils so bemessen, dass mindestens 5 komplette Zyklen durchlaufen werden können, d.h. der Kanal fünfmal komplett hoch- und heruntergefahren werden kann, wobei der Kanal hierbei manuell gesteuert wurde, da die Steuerungsfunktionen zu diesem Zeitpunkt noch nicht in das Ausleseprogramm implementiert waren. Die Ramping-Geschwindigkeit S wurde dabei zwischen $10 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ und $500 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ variiert, im Bereich zwischen $10 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ und $250 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ in $10 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ -Schritten und darüber hinaus in $50 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ -Schritten. Anschließend wurden aus den so bestimmten Messwerten mit einem weiteren ROOT-Skript (siehe Anhang A.4) Strom- und Spannungsgraphen für jedes S erstellt, die im Folgenden ausgewertet werden sollen.

In Abb. 3.8 sind stellvertretend für alle Messungen die mit Hilfe des oben beschriebenen ROOT-Skriptes erstellten Graphen für die Ramping-Geschwindigkeiten $80 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ und $160 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ dargestellt. Der Verlauf der Spannung entspricht den Erwartungen, die einzelnen „Stufen“ beim Hoch- bzw. Herunterfahren sind durch die Technik der HV-Versorgung – u.A. die im Vergleich zur Auslesefrequenz des Ausleseprogramms (200 Messungen pro Sekunde) niedrigere Aktualisierungsfrequenz der internen Spannungswerte, auf die auch das Ausleseprogramm zugreift – bedingt und erwartet. Die

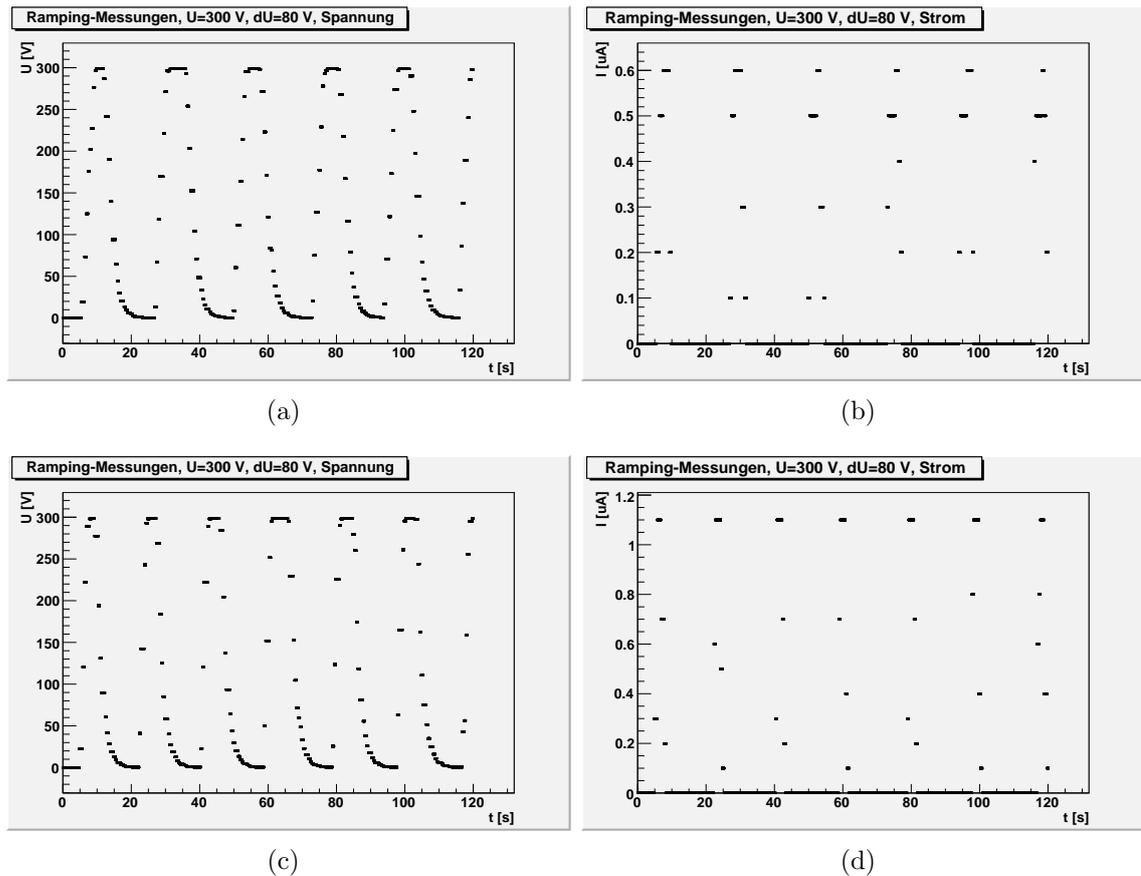


Abbildung 3.8: Auswertung der Ramping-Messungen; (a) $S = 80 \frac{\text{V}}{\text{s}}$, Spannung; (b) $S = 80 \frac{\text{V}}{\text{s}}$, Strom; (c) $S = 160 \frac{\text{V}}{\text{s}}$, Spannung; (d) $S = 160 \frac{\text{V}}{\text{s}}$, Strom.

Plateaus bei den Maxima der Spannung sind durch die manuelle Steuerung der HV-Kanäle entstanden. Auffallend ist, dass die Spannung beim Ausschalten des Kanals nicht linear direkt auf 0 V abfällt, sondern sich nur exponentiell diesem Wert annähert. Es scheint sich hierbei um eine Charakteristik der HV-Versorgung zu handeln, die im Folgenden jedoch keine Auswirkungen hat und daher nicht weiter betrachtet wird, zumal aufgrund der Ergebnisse der in den vorigen Abschnitten betrachteten Spannungsmessungen davon auszugehen ist, dass auch von der hier verwendeten HV-Versorgung nur interne Spannungen gemessen werden, die von der tatsächlich anliegenden abweichen.

Betrachtet man nun die Strom-Graphen, so ist bei jedem Zyklus zuerst ein Anstieg bis auf ein Maximum I_{max} festzustellen, gefolgt von einem Abfall. Ein Vergleich mit den Spannungs-Graphen zeigt, dass das Maximum genau dann erreicht wird, wenn auch die Spannung ihr Maximum erreicht und damit konstant bleibt. Damit ist auch der Abfall des Stroms nach dem Maximum zu erklären, da es sich dann um den bekannten Fall des Aufladens einer Kapazität bei konstanter Spannung handelt, der Ladestrom fällt in diesem Fall exponentiell ab. Ein solcher exponentieller Abfall ist

zwar in den abgebildeten Graphen nicht direkt zu erkennen, dies kann aber auch durch die begrenzte Auflösung der Strommessung bedingt sein. Auch der Anstieg des Stroms ist im Prinzip erwartet, da die an die Testbox angelegte Spannung ebenfalls ansteigt. Für den Entladevorgang würde im Betrag eigentlich derselbe Verlauf erwartet, in diesem Fall konnten allerdings die fließenden Ströme nicht gemessen werden, da die verwendete HV-Versorgung nur in der Lage ist, Ströme in einer bestimmten Richtung zu messen, im vorliegenden Fall also nur die Ladeströme und nicht die entgegengesetzt gerichteten Entladeströme.

S [$\frac{\text{V}}{\text{s}}$]	I_{max} [μA]	ΔI_{max} [μA]	S [$\frac{\text{V}}{\text{s}}$]	I_{max} [μA]	ΔI_{max} [μA]
10	0	0,04	160	1,1	0,04
20	0,1	0,04	170	1,21	0,04
30	0,1	0,04	180	1,27	0,04
40	0,2	0,04	190	1,3	0,04
50	0,3	0,04	200	1,34	0,04
60	0,4	0,04	210	1,41	0,04
70	0,5	0,04	220	1,5	0,04
80	0,6	0,04	230	1,51	0,04
90	0,6	0,04	240	1,6	0,04
100	0,7	0,04	250	1,6	0,04
110	0,8	0,04	300	1,76	0,04
120	0,8	0,04	350	2	0,04
130	0,9	0,04	400	1,97	0,04
140	1	0,04	450	1,99	0,04
150	1,12	0,04	500	2,12	0,04

Tabelle 3.8: Auswertung der Ramping-Messungen, maximaler Strom I_{max} in Abhängigkeit der Ramping-Geschwindigkeit S .

Aus den einzelnen Strom-Graphen für die verschiedenen Ramping-Geschwindigkeiten S wurde dann zuerst für jeden Zyklus einzeln der maximale Strom bestimmt und anschließend daraus für jedes S der Mittelwert gebildet. In Tab. 3.8 sind die so bestimmten Werte aufgelistet. In Abb. 3.9 sind diese Werte in Abhängigkeit von der Ramping-Geschwindigkeit S dargestellt. Man erkennt, dass im Bereich bis etwa $200 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ ein nahezu linearer Anstieg vorliegt, der danach abflacht, bis im Bereich ab $350 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ ein Plateau erreicht wird. Dieser Verlauf, insbesondere das Abflachen des Graphen bei hohen Ramping-Geschwindigkeiten, entspricht nicht den Erwartungen, nach denen eigentlich ein konstant linearer Anstieg erwartet wurde. Eine mögliche Erklärung wäre eine veränderte Ramping-Charakteristik der HV-Versorgung bei hohen Ramping-Geschwindigkeiten, bei der beispielsweise die Spannungswerte in kleineren, d.h kürzeren, Schritten hochgefahren werden, so dass die effektive Ramping-Geschwindigkeit S beibehalten wird, der insgesamt fließende Strom aber sinkt. Aus den Handbüchern der HV-Versorgung [33] geht jedoch nicht die genaue Ramping-

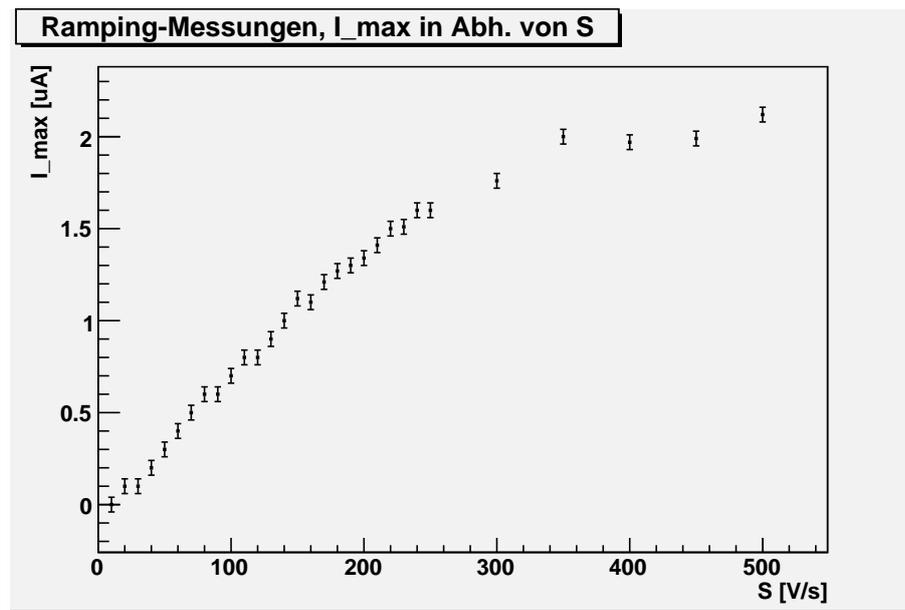


Abbildung 3.9: Auswertung der Ramping-Messungen, maximaler Strom I_{max} in Abhängigkeit von der Ramping-Geschwindigkeit S .

Charakteristik hervor, so dass an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden kann.

Abschließend soll die eingangs gestellte Frage nach einer „sicheren“ Ramping-Geschwindigkeit beantwortet werden. Es sollte vorher jedoch explizit festgehalten werden, dass die durch die oben beschriebenen Messungen bestimmten Ströme die im gesamten Stromkreis fließenden Ladeströme bezeichnen und nicht etwa die direkt durch die GEM fließenden Ströme. Die gemessenen Ströme quantifizieren den Ladungstransport von der HV-Versorgung auf die GEM, so dass die GEM im Prinzip auch hohe Ladeströme aushalten können sollte. Die zu Anfang des Abschnitts erwähnten Beschädigungen können nur dann entstehen, wenn der Strom eine in der HV-Versorgung festgelegte Grenze überschreiten, die zum Tripping, also dem schnellen Herunterfahren des jeweiligen aktiven HV-Kanals führt. Dabei können sich in den Löchern der GEM-Folie hohe Felder bilden, die dann zu Funken und damit Beschädigungen führen können. Die Festlegung einer „sicheren“ Ramping-Geschwindigkeit hängt somit vor allem von den Einstellungen und Charakteristika der HV-Versorgung ab. Es ist üblich, als Stromgrenze $3 - 10 \mu\text{A}$ zu wählen, diese Werte werden etwa für die HV-Versorgung einiger GEM-Module für den Large Prototype genutzt [39].

Wählt man beispielsweise $3 \mu\text{A}$ als Tripping-Grenze, so stellt man anhand von Abb. 3.9 fest, dass alle bei den durchgeführten Ramping-Messungen bestimmten maximalen Ströme unter dieser Grenze liegen. Bei der Auswahl einer geeigneten Ramping-Geschwindigkeit spielt jedoch auch eine Rolle, dass die Spannungen und

Ströme möglichst kontinuierlich überwacht und gemessen werden sollen. Diese kontinuierliche Überwachung ist jedoch aufgrund der Charakteristika der HV-Versorgung und des verwendeten Ausleseprogramms nur eingeschränkt möglich, was sich insbesondere bei hohen Ramping-Geschwindigkeiten bemerkbar macht (siehe dazu Abb. 3.8; die dort sichtbaren Stufen im Spannungsverlauf werden für höhere Ramping-Geschwindigkeiten immer größer). Daher sollte die Ramping-Geschwindigkeit eher niedriger, d.h. im Bereich bis maximal $100 \frac{\text{V}}{\text{s}}$, gewählt werden. Dies führt auch zu einem gewissen Sicherheitsspielraum, da der für diese Ramping-Geschwindigkeiten gemessene maximale Strom im Bereich von $0,5 \mu\text{A}$ liegt. Bei der HV-Versorgung einiger GEM-Module für den Large Prototype wird sogar nur eine Ramping-Geschwindigkeit von $30 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ verwendet [39], so dass der Sicherheitsspielraum noch größer ist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Entwicklung und der Bau einer Testbox zur GEM-Simulation beschrieben. Die GEM wird dabei in der Testbox durch einen Kondensator simuliert, der das Kernstück des jeweiligen in die Testbox eingebauten Schaltkreises bildet. Um möglichst flexibel zu sein und schnell und ohne großen Aufwand den Schaltkreis ändern zu können, wurde eine „halb-fliegende“ Konstruktion gewählt, bei der die einzelnen Bauteile auf Lötösen gelötet wurden, die dann beliebig zu Schaltkreisen zusammengesetzt werden können. Zusätzlich besitzt die Testbox zum Anschluss von Spannungsversorgungs- und Messgeräten insgesamt vier SHV-Anschlüsse sowie eine Bananenbuchse. Die Testbox bietet zudem genügend Platz, um selbst GEMs in den Schaltkreis zu integrieren, was Vergleichsmessungen zwischen Kondensator- und GEM-Aufbau ermöglicht.

Mit Hilfe der Testbox sollte in dieser Arbeit die Frage beantwortet werden, ob man mit der Testbox eine GEM hinreichend genau simulieren kann, um damit beispielsweise Hochspannungs-Tests durchzuführen. Solche Tests sind etwa beim Large Prototype – dem gerade am DESY in Betrieb genommenen Prototypen einer großen Zeitprojektionskammer mit auf GEM-Folien und MicroMEGAS basierender Gasverstärkungstechnologie – nötig, um die benötigten Steuerungsprogramme für die HV-Versorgung zu testen, ohne an den eigentlichen Aufbau gehen zu müssen und diesen so der Gefahr von Beschädigungen durch eventuelle Fehlfunktionen auszusetzen. Um diese Frage zu beantworten, wurden mit der Testbox mehrere Messungen durchgeführt, die im Folgenden zusammengefasst werden sollen.

In den zuerst durchgeführten Messungen wurde die Zeitkonstante des aus Kondensator bzw. GEM und den in die Testbox eingebauten Widerständen bestehenden RC-Gliedes bestimmt. Die gemessenen Werte liegen sowohl für den Kondensator- als auch für den GEM-Aufbau jeweils in der erwarteten Größenordnung und sind auch untereinander vergleichbar, so dass anzunehmen ist, dass die Testbox in der Lage ist, eine GEM hinreichend genau zu simulieren. Diese These wird auch durch die ebenfalls durchgeführten Spannungsmessungen gestützt, bei denen der Einfluss der Testbox auf die im Stromkreis gemessenen Spannungen untersucht wurde, wobei festgestellt wurde, dass sich Kondensator- und GEM-Aufbau kaum unterscheiden. Aus diesen Messungen wurden zusätzlich Kalibrierungsgeraden erstellt, mit denen die Abweichungen der real anliegenden Spannung von der eingestellten korrigiert werden können. Abschließend wurden mit einem reinen GEM-Aufbau Ramping-Messungen durchgeführt, bei denen der beim Laden der GEM fließende Strom im Stromkreis gemessen wurde. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse können dabei helfen, für den konkreten Aufbau – beispielsweise den Large Prototype – eine „sichere“ Ramping-Geschwindigkeit zu wählen, an die auch die in der HV-Versorgung gesetzten Stromgrenzen angepasst werden können, um so Beschädigungen der GEM zu vermeiden.

Auch wenn die Ergebnisse der durchgeführten Messungen nahelegen, dass die Testbox eine GEM in gewisser Hinsicht ersetzen kann, so sind dennoch Unterschiede festzustellen, beispielsweise ist die gemessene Zeitkonstante für den Entladevorgang beim GEM-Aufbau höher als erwartet. Die verwendete GEM wies zudem eine Beschädigung auf, die im Bereich ab 650 V Messungen unmöglich machte. Zukünftige weitere Messungen sollten sich daher vor allem auf diese beiden Punkte konzentrieren, um von den Ergebnissen dieser Arbeit ausgehend die hierdurch aufgeworfenen Fragen zu beantworten. Bei den Ramping-Messungen können zum Beispiel zusätzliche Messungen an einem Kondensator-Aufbau durchgeführt werden, die anschließend mit den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen des GEM-Aufbaus verglichen werden können. Durch die oben angesprochene Flexibilität der Testbox, was den Einbau der verschiedenen Bauteile angeht, sind auch gänzlich andere Einsatzzwecke denkbar. Da die Testbox staubdicht ist, ist sie in gewissem Maße auch gasdicht (nicht zu hohen Druck des Gases vorausgesetzt), so dass beispielsweise Messungen oder Tests mit GEMs in einer Gasumgebung denkbar wären, wofür lediglich Eintritts- und Austrittsöffnungen für das Gas in die Box eingebaut werden müssten. So könnte die Testbox einfache Messungen mit GEMs ermöglichen, für die dann nicht auf eine richtige Testkammer zurückgegriffen werden müsste, sofern diese nicht zwingend erforderlich ist.

Anhänge

A. Quellcodes der verwendeten Programme

A.1. Ausleseprogramm für die HV-Versorgung

```

1  /* Dieses Programm dient der Netzwerk-Auslese einer HV-Versorgung CAEN SY2527 */
2  /* Die verwendeten Bibliotheken wurden bisher noch nicht veröffentlicht. */
3  /* Autoren: Marcus Niechciol und Bakul Gaur; Universität Siegen, September 2008 */

4
5  #include <iostream>
6  #include <fstream>
7  #include "../include/interface_device_manager.h" /* Einbinden der nötigen
8     Bibliotheken*/

9  using namespace std;

10
11 int main(int argc, char* argv [])
12 {
13     ofstream messung;
14     measurement.open("measurement.csv"); /* Öffnen eines Filestreams zum
15     Speichern der Messwerte*/
16     cout<<endl;
17     DeviceManager* dmManager=new DeviceManager( INTERFACE_TCPIP_SY2527,
18     /*NAME*/,
19     /*IP_ADDRESS*/,
20     /*LOGIN*/,
21     /*PASSWORD*/ ); /*
22     Anmelden an HV-
23     Versorgung und
24     Initialisieren*/
25     if(dmManager->hvdDevice()->bInterfaceNotGood()) cout<<"\tError: \Device_
26     initialization_error!"<<endl;
27     else
28     {
29         cout<<"\tDevice_initialization_success!"<<endl;
30         cout<<"\tActive_connection:_"<<dmManager->hvdDevice()->sConID()<<
31         endl<<endl;
32         List<HVModule>* IHVModules=dmManager->hvdDevice()->lModules();
33         cout<<"\t"<<IHVModules->iGetElementCount()<<"\t_modules_detected!_
34         Listing_details..."<<endl;
35         cout<<"\t"_____"<<endl;
36         cout<<"\tSlot\tModule\t\t\t\tChannels\tSerial\tFirmware"<<endl;
37         IHVModules->tGetFirstElement();
38         while(IHVModules->tGetCurrentElement()) /* Überprüfen, welche Module
39         eingebaut sind*/
40         {
41             cout<<"\t"<<IHVModules->tGetCurrentElement()->nSlotID()
42             <<"\t"<<IHVModules->tGetCurrentElement()->sModel()
43             <<"\t"<<IHVModules->tGetCurrentElement()->
44             sDescription()
45             <<"\t"<<IHVModules->tGetCurrentElement()->
46             nChannels()
47             <<"\t\t"<<IHVModules->tGetCurrentElement()->nSerial()
48             <<"\t"<<IHVModules->tGetCurrentElement()->
49             sFirmwareRelease()<<endl;
50             IHVModules->tGetNextElement();
51         }
52     }
53     if(IHVModules->tGetFirstElement())
54     {

```

```

cout<<endl<<"\tReading_all_set_parameters_from_Slot_#0,
Channel_#0..."<<endl;
45 cout<<"\t-----"<<endl;
dmManager->hvdDevice()->iUpdate(0,0); /*Definieren des
auszulesenden Moduls bzw. Kanals*/
47 HVChannel* hvcChannel=IHVModules->tGetCurrentElement()
->hvcChannel(0); /*Auslesen*/
49 if(hvcChannel)
{
cout<<"\tV0set:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_V0SET)<<endl;
51 cout<<"\tV1set:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_V1SET)<<endl;
cout<<"\tI0set:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_I0SET)<<endl;
53 cout<<"\tI1set:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_I1SET)<<endl;
cout<<"\tRup:\t"<<hvcChannel->fGet(INTERFACE.CH_RUP
)<<endl;
55 cout<<"\tRdwn:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_RDWN)<<endl;
cout<<"\tTrip:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_TRIP)<<endl;
57 cout<<"\tSVmax:\t"<<hvcChannel->fGet(
INTERFACE.CH_SVMAX)<<endl; /*Ausgabe der
Messwerte*/
}
59 else
cout<<"\tError:_Channel_not_found!"<<endl;
61 cout<<"\tThese_parameters_were_read_"<<dmManager->hvdDevice
()->iTimeOfUpdate()<<"_millisecond(s)_since_the_program
_start_"<<endl; /*Zeitmessung*/
cout<<"\nMeasurement:\nTime_in_s, _Current_in_uA"<<endl;
63 while(dmManager->hvdDevice()->iTimeOfUpdate()<10000) {
dmManager->hvdDevice()->iUpdate(0,0);
65 cout<<dmManager->hvdDevice()->iTimeOfUpdate()*0.001<<"_,"<<
hvcChannel->fGet(INTERFACE.CH_IMON)<<"_,"<<hvcChannel->
fGet(INTERFACE.CH_VMON)<<endl;
messung<<dmManager->hvdDevice()->iTimeOfUpdate()*0.001<<"_,"
<<hvcChannel->fGet(INTERFACE.CH_IMON)<<"_,"<<hvcChannel
->fGet(INTERFACE.CH_VMON)<<endl;
67 } /*Speichern der Zeit-, Spannungs- und Strommesswerte des
Kanals*/
messung.close();
69 }
}
71 if(dmManager) delete dmManager;
cout<<endl;
73 return 0;
}

```

A.2. Auswertungsskript für die Zeitkonstantenmessungen

```

/* Dieses ROOT-Skript dient der Auswertung der mit dem Oszilloskop */
2 /* aufgenommenen Messwerte */
/* Ziel: Bestimmung der Zeitkonstanten des gegebenen Aufbaus */
4 /* Autor: Marcus Niechciol, Universität Siegen, Januar 2009 */

6 {
gROOT->Reset();
8
Double_t t_abs[5000], t_rel[5000], V[5000];
10 Double_t bin_t[100], bin_V[100], bin_dV[100], bin_dt[100];
char dummy;
12 Double_t sum_V, sum_dV; /*Variablendefinitionen*/

```

```

14     ifstream in;
15     in.open("messwerte.csv");
16
17     for(Int_t n=0; in >> t_abs[n] >> dummy >> t_rel[n] >> dummy >> V[n]; n++) {
18         cout << t_abs[n] << " | " << t_rel[n] << " | " << V[n] << endl;
19     } /*Schleife zum Einlesen der Messwerte*/
20
21     in.close();
22
23     for(Int_t a=0; a<=99; a++){
24         bin_t[a]=(a+0.5)*0.00499;
25         sum_V=0;
26         sum_dV=0;
27         for(Int_t b=a*50; b<(a+1)*50; b++){
28             sum_V += V[b];
29         }
30         bin_V[a]=sum_V/50;
31         for(Int_t b=a*50; b<(a+1)*50; b++){
32             sum_dV += TMath::Power((V[b]-bin_V[a]),2);
33         }
34         bin_dV[a] = TMath::Sqrt(sum_dV/49);
35         cout << bin_t[a] << " | " << bin_V[a] << " | " << bin_dV[a] <<
36         endl;
37     } /*Schleife zum Binnens der Messwerte in 100 Bins; Zusätzlich Bestimmung
38     von Mittelwert und Standardabweichung*/
39
40     TF1* expfunc = new TF1("expfunc", "[0]*TMath::Exp(-x/[1])", .0, .5);
41     expfunc->SetParName(0, "V_max");
42     expfunc->SetParameter(0, -1.0);
43     expfunc->SetParName(1, "tau");
44     expfunc->SetLineColor(2); /*Definieren der zu fittenden Exponentialfunktion
45     , bzw. ihrer Parameter*/
46
47     graph = new TGraphErrors(100, bin_t, bin_V, 0, bin_dV);
48     graph->Fit("expfunc", "LRE", "same");
49     graph->SetMarkerStyle(21);
50     graph->SetMarkerSize(.4);
51     gStyle->SetOptFit(0111);
52     graph->SetTitle("Best. der Zeitkonst., GEM, Entladev., Mess.#7");
53     graph->GetXaxis()->SetTitle("t [s]");
54     graph->GetYaxis()->SetTitle("U_O [V]"); /*Definieren der Parameter des zu
55     zeichnenden Graphen*/
56
57     graph->Draw("AP");
58     c1->Print("graph.pdf");
59     delete c1; /*Anzeige des Graphen auf dem Bildschirm, Speichern des Graphen
60     in einer Datei*/
61 }

```

A.3. Auswertungsskript für die Spannungsmessungen

```

1  /* Dieses ROOT-Skript dient der Auswertung der Spannungsmessungen */
2  /* Ziel: Bestimmung von Kalibrierungsgeraden für die gemessene */
3  /* Spannung auf den einzelnen Messgeräten (HV-Vers. und HV-Messg.) */
4  /* Autor: Marcus Niechciol, Universität Siegen, Februar 2009 */
5
6  {
7
8     gROOT->Reset();
9
10    Int_t N = 81; /*N: Anzahl der Datenpunkte*/
11    Double_t V_set0[N], V_set1[N], V_sup0[N], V_sup1[N], V_meas0[N], V_meas1[N]
12    ], dV_sup[N], dV_meas[N];
13    char dummy; /*Variablendefinitionen*/

```

```

13     ifstream in;
14     in.open("200.csv");
15
16     for (Int_t n=0; n<N; n++) {
17         in >> V_set0[n] >> dummy >> V_set1[n] >> dummy >> V_sup0[n] >>
            dummy >> V_sup1[n] >> dummy >> V_meas0[n] >> dummy >> V_meas1[n]
18         ];
19         cout << V_set0[n] << " | " << V_set1[n] << " | " << V_sup0[n] << " | "
20         << V_sup1[n] << " | " << V_meas0[n] << " | " << V_meas1[n]
21         << endl;
22         dV_meas[n]=1.0, dV_sup[n]=0.1;
23     } /*Schleife zum Einlesen der Messwerte*/
24
25     in.close();
26
27     for (Int_t n=0; n<4; n++) {
28         TF1* straight = new TF1("straight", "[0]*x+[1]", 0., 1000.);
29         straight->SetLineColor(2);
30         if (n==0) {
31             graph = new TGraphErrors(N, V_set0, V_sup0, 0, dV_sup);
32             graph->SetTitle("Spannungsmess., dU=200_V, ohne Testbox, Ch
33             .0, HV-V.");
34         }
35         else if (n==1) {
36             graph = new TGraphErrors(N, V_set1, V_sup1, 0, dV_sup);
37             graph->SetTitle("Spannungsmess., dU=200_V, ohne Testbox, Ch
38             .1, HV-V.");
39         }
40         else if (n==2) {
41             graph = new TGraphErrors(N, V_set0, V_meas0, 0, dV_meas);
42             graph->SetTitle("Spannungsmess., dU=200_V, ohne Testbox, Ch
43             .0, HV-Messg.");
44         }
45         else if (n==3) {
46             graph = new TGraphErrors(N, V_set1, V_meas1, 0, dV_meas);
47             graph->SetTitle("Spannungsmess., dU=200_V, ohne Testbox, Ch
48             .1, HV-Messg.");
49         }
50         graph->Fit("straight", "LRE", "same");
51         graph->SetMarkerStyle(21);
52         graph->SetMarkerSize(0.5);
53         gStyle->SetOptFit(0111);
54         graph->GetXaxis()->SetTitle("U_set_[V]");
55         graph->GetYaxis()->SetTitle("U_[V]");
56         graph->Draw("AP");
57         if (n==0) {
58             c1->Print("200-Ch0_HVV.pdf"), c1->Clear();
59         }
60         if (n==1) {
61             c1->Print("200-Ch1_HVV.pdf"), c1->Clear();
62         }
63         if (n==2) {
64             c1->Print("200-Ch0_HVM.pdf"), c1->Clear();
65         }
66         if (n==3) {
67             c1->Print("200-Ch1_HVM.pdf"), c1->Clear();
68         }
69         delete graph; delete straight;
70     } /*Schleife zum Darstellen der Messwerte in einem Graphen, Fitten einer
71     Geraden und Speichern in einer Datei, jeweils getrennt für die beiden
72     Kanäle sowie die beiden Messgeräte*/
73 }

```

A.4. Auswertungsskript für die Ramping-Messungen

```

/* Dieses ROOT-Skript dient der Auswertung der Ramping-Messungen */
2 /* Ziel: Bestimmen einer sicheren Ramping-Geschwindigkeit, bei der */
/* der fließende Strom begrenzt wird */
4 /* Marcus Niechciol, Universität Siegen, Februar 2009 */

6 {
    gROOT->Reset();

8
    Double_t t[100000], I[100000], V[100000];
10    Double_t dI[100000], dV[100000];
    Int_t N;
12    char dummy; /* Variablendefinitionen */

14    ifstream in;
    in.open("300_10.csv");

16
    for(Int_t n=0; in >> t[n] >> dummy >> I[n] >> dummy >> V[n]; n++) {
18        N=N+1;
        dI[n]=0.1, dV[n]=0.5;
20        cout << N << " | " << t[n] << " | " << I[n] << " | " << V[n] <<
            endl;
    } /* Schleife zum Einlesen der Messwerte */

22
    in.close();

24
    graph = new TGraphErrors(N,t,I,0,0);
26    graph->SetMarkerStyle(21);
    graph->SetMarkerSize(.4);
28    gStyle->SetOptFit(0111);
    graph->SetTitle("Ramping-Messungen, I-Kanal, U=300_V, dU=10_V, Strom");
30    graph->GetXaxis()->SetTitle("t [s]");
    graph->GetYaxis()->SetTitle("I [uA]"); /* Definieren des Graphen für die
        Strommesswerte */

32
    graph->Draw("AP");
34    c1->Print("300_10-I.pdf");
    delete c1; delete graph; /* Anzeige des Graphen auf dem Bildschirm,
        Speichern des Graphen in einer Datei */

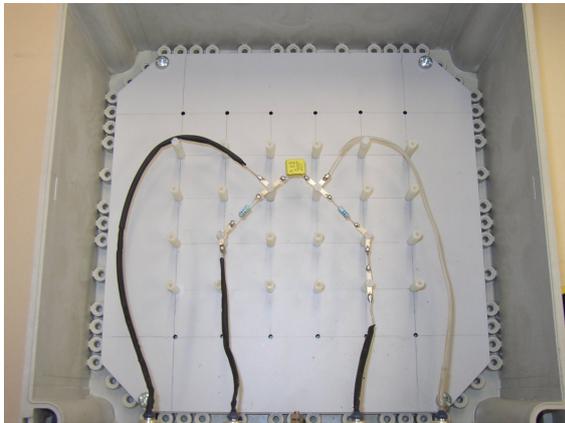
36
    graph = new TGraphErrors(N,t,V,0,dV);
38    graph->SetMarkerStyle(21);
    graph->SetMarkerSize(.4);
40    gStyle->SetOptFit(0111);
    graph->SetTitle("Ramping-Messungen, I-Kanal, U=300_V, dU=10_V, Spannung");
42    graph->GetXaxis()->SetTitle("t [s]");
    graph->GetYaxis()->SetTitle("U [V]"); /* Definieren des Graphen für die
        Spannungsmesswerte */

44
    graph->Draw("AP");
46    c1->Print("300_10-U.pdf");
    delete c1; delete graph; /* Anzeige des Graphen auf dem Bildschirm,
        Speichern des Graphen in einer Datei */

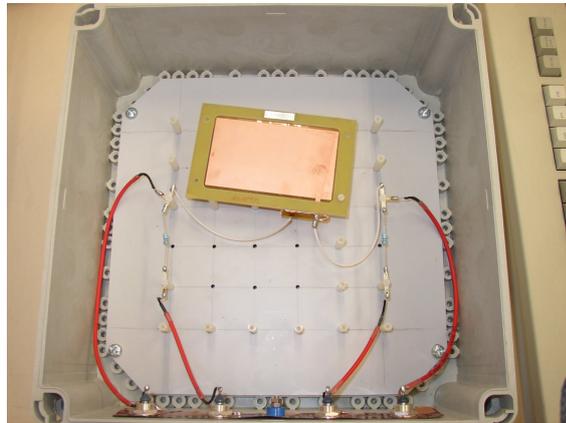
48 }

```

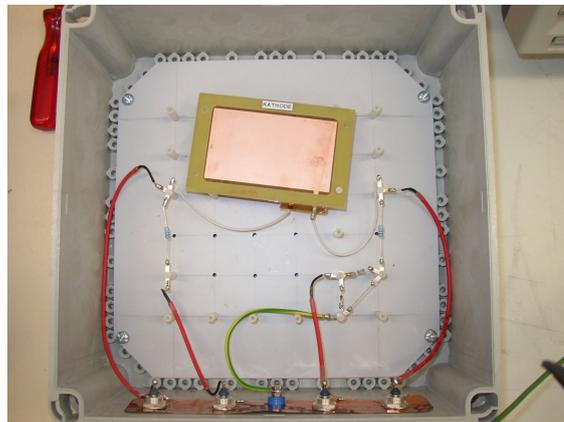
B. Weitere Bilder der Testbox



(a)



(b)



(c)

Abbildung B.1: Weitere Bilder der Testbox, Innenansichten: (a) zweite Ausführung mit Kondensator, (b) dritte Ausführung mit GEM, (c) vierte Ausführung mit GEM

C. Detaillierte Ergebnisse der Funktionsüberprüfung der HV-Module

Modul-Typ: A834N, Anzahl getestete Module: 12

nicht nutzbare Module	Gründe
834.5	verliert alle Einstellungen bei Neustart
834.6	auf allen Kanälen Strom messbar selbst bei abgeschaltetem Kanal
834.7	wie 834.6
834.8	wie 834.6, verliert zusätzlich alle Einstellungen
834.11	wie 834.6
834.12	wie 834.6

Modul-Typ: A835N, Anzahl getestete Module: 4, alle in Ordnung

Modul-Typ: A753N, Anzahl getestete Module: 2

nicht nutzbare Module	Gründe
753.1	anscheinend Hardware-Limit für Spannung gesetzt, lässt sich nicht verändern
753.2	kein Strom messbar

Modul-Typ: A734N, Anzahl getestete Module: 5

nicht nutzbare Module	Gründe
734.2	alle Kanäle trippen sofort, selbst bei offenem Stromkreis
734.3	wie 734.2
734.4	wie 734.2
734.5	wie 734.2

Tabelle C.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Funktionsüberprüfung der HV-Module.

D. Literaturverzeichnis

- [1] SHELDON L. GLASHOW:
Partial-Symmetries of Weak Interactions, Nucl. Phys. **22** (1961) S. 579-588.
- [2] ABDUS SALAM:
Weak and Electromagnetic Interactions, zuerst erschienen in N. Svartholm (Editor): *Elementary Particle Theory*, Proceedings of the Nobel Symposium held 1968 at Lerum, Sweden, S. 367-368; Stockholm, 1968.
- [3] STEVEN WEINBERG:
A Model of Leptons, Phys. Rev. Lett. **19** (1967), S. 1264-1266.
- [4] GERHARD MATERLIK, PAUL SÖDING, UTE WILHELMSSEN:
TESLA - an international, interdisciplinary center for research (TESLA Brochure), DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg, 2001.
- [5] PETER W. HIGGS:
Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons, Phys. Rev. Lett. **13** (1964), S. 508-509.
- [6] CLAUS GRUPEN, BORIS SHWARTZ:
Particle Detectors (Second Edition), Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [7] ILC COLLABORATION:
ILC Reference Design Report, Volume 1: Executive Summary (Editors: J.Brau, Y.Okada, N.Walker), ILC Global Design Effort and Worldwide Study, August 2007.
- [8] ILC COLLABORATION:
ILC Reference Design Report, Volume 2: Physics at the ILC (Editors: A.Djouadi, J.Lykken, K.Mönig, Y.Okada, M.Oreglia, S.Yamashita), ILC Global Design Effort and Worldwide Study, August 2007.
- [9] ILC COLLABORATION:
ILC Reference Design Report, Volume 3: Accelerator (Editors: N.Phinney, N.Toge, N.Walker), ILC Global Design Effort and Worldwide Study, August 2007.
- [10] ILC COLLABORATION:
ILC Reference Design Report, Volume 4: Detectors (Editors: T.Behnke, C.Damerell, J.Jaros, A.Miyamoto), ILC Global Design Effort and Worldwide Study, August 2007.

- [11] INTERNATIONAL COMMITTEE FOR FUTURE ACCELERATORS (ICFA): *Parameters for the Linear Collider (Update November 20, 2006)*, <http://www.fnal.gov/directorate/icfa/para-Nov20-final.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [12] THE SiD CONCEPT GROUP: *SiD Detector Outline Document (Version of 19 May 2006)*, <http://hep.uchicago.edu/~oreglia/siddod.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [13] THE 4TH CONCEPT GROUP: *Detector Outline Document for the 4th Concept Detector at the ILC*, <http://www.physics.iastate.edu/getfiles/1965.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [14] THE LDC GROUP: *Detector Outline Document for the Large Detector Concept (July 2006)*, <http://www.ilcldc.org/documents/dod/outline.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [15] GLD CONCEPT STUDY GROUP: *GLD Detector Outline Document Version 1.2.1 (October 2006)*, <http://ilcphys.kek.jp/gld/documents/dod/gliddod.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [16] ILD JOINT STEERING BOARD: *Definition of the ILD Reference Detector (Updated Version: November 13, 2008)*, <http://www.ilcild.org/documents/ild-discussion-documents/ILDreferencedetector-20081113.pdf/view>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [17] WALTER BLUM, LUIGI RONALDI: *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer Verlag, Berlin, 1994.
- [18] HANS A. BETHE: *Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie*, Ann. d. Phys. **5** (1930), S. 325-400.
- [19] CLAUDE AMSLER ET AL.: *Review of Particle Physics*, Physics Letters **B667** 1, (2008), S. 1-1340.
- [20] IOANNIS GIOMATARIS, PHILIPPE REBOURGEARD, JEAN-PIERRE ROBERT, GEORGES CHARPAK: *MICROMEGAS: A High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments*, Nucl. Instrum. Meth. A **376**

- (1996), S. 29-35.
- [21] FABIO SAULI:
GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors, Nucl. Instrum. Meth. A **386** (1997), S. 531-534.
- [22] Zum Beispiel „Kapton“ von E. I. du Pont de Nemours and Company (DuPont), Wilmington, USA.
- [23] BLANKA SOBLOHER:
Simulationsstudien zu GEM-Folien für die Auslese einer TPC, Diplomarbeit, III. Physikalisches Institut, RWTH Aachen, 2002.
- [24] KLAUS DEHMELT FOR THE LCTPC COLLABORATION:
Status of the Large TPC Prototype, EUDET-Memo-2008-46, 19. Dezember 2008.
- [25] INGRID-MARIA GREGOR, JOACHIM MNICH:
EUDET: Detector R&D Towards the International Linear Collider, EUDET-Report-2008-03, 3. Dezember 2008.
- [26] BAKUL GAUR:
Private Mitteilung, Siegen, Januar 2009.
- [27] OLAF HENSLER, KAY REHLICH:
DOOCS: A Distributed Object Oriented Control System, <http://tesla.desy.de/doocs/papers/Protvino/DOOCS.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [28] MI-Leergehäuse Mi210, Gustav Hensel GmbH & Co. KG, Lennestadt.
- [29] Polykarbonat-Folienkondensator FKC3, WIMA Spezialvertrieb elektronischer Bauelemente GmbH & Co.KG, Mannheim.
- [30] DUPONT ELECTRONICS:
Summary of Properties for Kapton(c) Polyimide Films, http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/assets/downloads/pdf/summaryofprop.pdf, zuletzt abgerufen am 08.03.2009.
- [31] CAEN SY527, CAEN S.p.A., Viareggio, Italien.
- [32] H.S.CAENNET, High Speed CAEN Network.
- [33] CAEN SY2527, CAEN S.p.A., Viareggio, Italien.
- [34] Tektronix AFG3022, Tektronix Inc., Beaverton, USA.

-
- [35] Der genaue Typ des Messgeräts ist unbekannt, daher wird es durchgehend als „HV-Messgerät“ bezeichnet.
- [36] Tektronix TDS3032, Tektronix Inc., Beaverton, USA.
- [37] BAKUL GAUR:
Private Mitteilung, Siegen, September 2008.
- [38] RENE BRUN, FONS RADEMAKERS:
ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A **389** (1997), S. 81-86; <http://www.root-cern.ch>.
- [39] BAKUL GAUR:
Private Mitteilung, Siegen, Februar 2009.

E. Abbildungsverzeichnis

1.1.	Die Teilchen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik. . . .	3
1.2.	Schematische Darstellung des geplanten Elektron-Positron-Linearcol- liders ILC.	5
1.3.	(a) 1,3 GHz-9-Zellen-Niob-Kavität; (b) Kryomodul für den ILC. . . .	7
1.4.	Schematische und nicht vollständige Darstellung des Aufbaus der De- tektorkonzepte LDC (a) und GLD (b).	9
1.5.	Spezifischer Energieverlust für verschiedene geladene Teilchen in Ma- terie.	12
1.6.	Funktionsprinzip einer TPC.	13
1.7.	(a) Aufnahme einer ungerahmten GEM-Folie; (b) Elektronenmikro- skopaufnahme einer GEM-Folie.	15
1.8.	Simulierte Feldkonfiguration in den Löchern einer GEM-Folie. . . .	16
1.9.	(a) Schematische Zeichnung der Large Prototype TPC innerhalb des PCMAG; (b) Simulierte Feldkonfiguration innerhalb des PCMAG. . .	18
1.10.	(a) Der PCMAG im Teststrahl-Bereich am DESY; (b) Der Feldkäfig für den Large Prototype mit bereits installierter Anoden-Endplatte. .	19
2.1.	Bilder der Testbox.	22
2.2.	Schaltbilder der Testbox.	23
2.3.	Blockdiagramm des Aufbaus für die Messung der Zeitkonstanten. . .	30
2.4.	Blockdiagramm des Aufbaus für die Spannungsmessungen.	31
2.5.	Blockdiagramm des Aufbaus für die Ramping-Messungen.	32
3.1.	(a) Die mit dem Funktionsgenerator an die Testbox angelegte Recht- eckspannung; (b) Anzeige des Oszilloskops während der Messungen. .	33
3.2.	(a) Mit dem Oszilloskop aufgenommene Datenpunkte; (b) Daten- punkte nach der Bearbeitung.	34
3.3.	Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, Kon- densator-Aufbau.	35
3.4.	Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, GEM- Aufbau.	37
3.5.	Auswertung der Spannungsmessungen, Aufbau ohne Testbox.	41
3.6.	Auswertung der Spannungsmessungen, Kondensator-Aufbau.	43
3.7.	Auswertung der Spannungsmessungen, GEM-Aufbau.	45
3.8.	Auswertung der Ramping-Messungen.	49
3.9.	Auswertung der Ramping-Messungen, maximaler Strom I_{max} in Ab- hängigkeit von der Ramping-Geschwindigkeit S	51
B.1.	Weitere Bilder der Testbox.	60

F. Tabellenverzeichnis

3.1. Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, Kondensator-Aufbau; (a) Ladevorgang, (b) Entladevorgang.	36
3.2. Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten, GEM-Aufbau; (a) Ladevorgang, (b) Entladevorgang.	38
3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten.	39
3.4. Auswertung der Spannungsmessungen, Aufbau ohne Testbox; (a) Messung mit der HV-Versorgung; (b) Messung mit dem HV-Messgerät.	42
3.5. Auswertung der Spannungsmessungen, Kondensator-Aufbau; (a) Messung mit der HV-Versorgung; (b) Messung mit dem HV-Messgerät.	44
3.6. Auswertung der Spannungsmessungen, GEM-Aufbau; (a) Messung mit der HV-Versorgung; (b) Messung mit dem HV-Messgerät.	46
3.7. Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungsmessungen.	47
3.8. Auswertung der Ramping-Messungen, maximaler Strom I_{max} in Abhängigkeit der Ramping-Geschwindigkeit S	50
C.1. Zusammenfassung der Ergebnisse der Funktionsüberprüfung der HV-Module.	61

G. Abkürzungsverzeichnis

ATLAS	A Toroidal LHC Apparatus
BESS	Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CLIC	Compact Linear Collider
CMS	Compact Muon Solenoid
COMPASS	Common Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
DOOCS	Distributed Object Oriented Control System
ECAL	Electromagnetic Calorimeter
EUDET	Detector R&D towards the International Linear Collider
FLASH	Freie-Elektronen-Laser in Hamburg
HCAL	Hadronic Calorimeter
HERA	Hadron-Elektron-Ring-Anlage
HV	High Voltage
GDD	Gas Detector Development Group
GEM	Gas Electron Multiplier
GLC	Global Linear Collider
GLD	Global Large Detector
GSW	Glashow-Weinberg-Salam-Theorie
GUT	Grand Unified Theory
ICFA	International Committee for Future Accelerators
ILC	International Linear Collider
ILCSC	International Linear Collider Steering Committee
ILD	International Large Detector
ITRP	International Technology Recommendation Panel
KEK	Kō Enerugī Kasokuki Kenkyū Kikō
LDC	Large Detector Concept

LEP	Large Electron-Positron Collider
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider Beauty Experiment
LoI	Letter of Intent
LCTPC	Linear Collider Time Projection Chamber
MicroMEGAS	MicroMesh Gaseous Structure
NLC	Next Linear Collider
PCMAG	Permanent Current Magnet
PETRA	Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage
QCD	Quantenchromodynamik
QED	Quantenelektrodynamik
RDR	Reference Design Report
SCRF	Superconducting Radio-Frequency
SiD	Silicon Detector
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
SM	Standardmodell der Elementarteilchenphysik
SUSY	Supersymmetrie
TDR	Technical Design Report
TESLA	TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator
TPC	Time Projection Chamber
X-FEL	European X-Ray Free Electron Laser

Danksagung

Abschließend möchte ich die Gelegenheit nutzen und all denjenigen danken, die zum Gelingen dieser Bachelor-Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei:

- Prof. Dr. Peter Buchholz für die exzellente Betreuung und dafür, dass er mir die Gelegenheit gab, am Large-Prototype-Projekt mitzuarbeiten und damit ein kleiner Teil der LCTPC-Kollaboration zu werden.
- Bakul Gaur, der sowohl in Hamburg als auch in Siegen immer ein offenes Ohr für mich hatte, der mir half, wenn ich einmal nicht weiterkam, und der nicht zuletzt auch stets bereit war, einen Teil seiner Zeit zu opfern, um sein Wissen mit mir zu teilen und mir selbst kompliziertere Sachverhalte verständlich und anschaulich zu erklären.
- Dr. Ties Behnke dafür, dass er es mir in Absprache mit Prof. Buchholz ermöglichte, zwei lehrreiche und spannende Monate in seiner Arbeitsgruppe am DESY in Hamburg zu verbringen und dort den Forschungsalltag rund um ILC und Large Prototype hautnah mitzuerleben.
- Den gesamten Arbeitsgruppen Experimentelle Teilchenphysik an der Universität Siegen und FLC-TPC am DESY in Hamburg für die freundliche Aufnahme und die angenehme Arbeitsatmosphäre.
- Meinen Kommilitonen Stefan Gadatsch und Martin Tigges, mit denen ich vor drei Jahren mein Physik-Studium in Siegen begann und die so manch langweilige Vorlesung erträglich machten.

Der größte Dank gebührt jedoch meinen Eltern und meiner gesamten Familie, die mich nicht nur während meines Studiums in jeder Hinsicht unterstützt haben und mir so den Rückhalt gaben, ohne den das alles gar nicht möglich gewesen wäre.

Danke!

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate und Ergebnisse Anderer kenntlich gemacht habe.

.....
(Ort) (Datum)

.....
(Unterschrift)